



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

ENERGETICKÁ ÚČINNOST VYUŽITÍ VODÍKU V DOPRAVĚ

ENERGY EFFICIENCY OF HYDROGEN UTILIZATION IN TRANSPORT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karel Mikulénka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vopařil

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Karel Mikulenka
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jan Vopařil
Akademický rok:	2019/20

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:

Energetická účinnost využití vodíku v dopravě

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vzhledem k silicímú tlaku na bezemisní dopravu a problematickému skladování elektrické energie se jako možná další alternativa uvažuje vodík. Ten může být využit ve vozidle jakožto palivo pro spalovací motor či může být „přeměněn“ v palivových článcích na elektrickou energii.

Bakalářská práce rešeršního charakteru by měla souhrnně objasnit problematiku využívání vodíku v dopravě, přičemž by se měla zaměřit zejména na energetickou účinnost celého procesu.

Cíle bakalářské práce:

Uvést důvody pro využívání vodíku v dopravě.

Objasnit problematiku spalování vodíku a palivových článků.

Provést rešerši současných možností využívání vodíku (dostupná vozidla, čerpací stanice apod.).

Kriticky zohlednit energetickou náročnost možných způsobů využívání vodíku v dopravě.

Seznam doporučené literatury:

HEYWOOD, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. 1st edition. New York: McGraw-Hill, 1988. ISBN 0-07-028637-X.

HEIRETH, H., PRENNINGER, P. Charging the Internal Combustion Engine. Wien: Springer-Verlag, 2007. ISBN 978-3-211-22033-3.

FÍK, J. Spalování plyných paliv a plynové hořáky. 1. vydání. Praha: GAS,s.r.o., 1998. ISBN 80-86176-01-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá analýzou soudobých možností využití vodíku v dopravě. Vodík je vědeckou obcí považován za možnou odpověď na stále se zvyšující emise z dopravy a jejich negativní dopad na životní prostředí. V práci jsou uvedeny nejvýznamnější výhody používání vodíku jakožto paliva pro dopravní prostředky ve srovnání s jeho hlavními protějšky: konvenčními spalovacími motory a bateriovými elektromobily. Práce popisuje oba možné způsoby získávání energie z vodíku přímo ve vozidle, kterými jsou spalování a palivové články a dále analyzuje současné možnosti konečného potenciálního zákazníka v oblastech dostupnosti vozidel a čerpacích stanic. Závěrem popisuje obecně problematiku zavedení vodíkové dopravy v České republice – její energetickou náročnost a zejména účinnost, a to v kontextu kompletního vodíkového hospodářství.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodík, doprava, elektromobilita, životní prostředí, vodíkové hospodářství, elektromobil, palivové články.

ABSTRACT

This bachelor thesis analyses current possibilities of hydrogen usage in transport. Hydrogen is by scientific community viewed as a possible answer to ever growing emissions from transport and their negative affect on the environment. The work introduces the most significant advantages of hydrogen usage as a fuel in comparison to its counterpart combustion engine and battery vehicles. Two means of obtaining energy from hydrogen in a vehicle itself shall be described which are hydrogen combustion and fuel cells. Further shall be made analysis of current possibilities for potential end customer pertaining vehicle and fuel availability. In the end is given a general description of hydrogen transport implementation in Czech Republic and its energetic cost and efficiency within an overall hydrogen economy.

KEYWORDS

Hydrogen, transport, electromobility, environment, hydrogen economy, electromobile, fuel cell.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MIKULENKA, Karel. *Energetická účinnost využití vodíku v dopravě*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124858>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 56 s. Vedoucí práce Jan Vopařil.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26. června 2020

.....

Karel Mikulénka

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych vyjádřil poděkování panu Ing. Janu Vopařilovi za odborné vedení, věcné rady, trpělivost, jeho cenný čas a ochotu při zpracování této bakalářské práce.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Důvody využívání vodíku v dopravě.....	12
1.1 Ekologie.....	12
1.1.1 Emise v závislosti na využitých zdrojích energie.....	12
1.1.2 Nové šetrnější spalovací motory.....	15
1.1.3 Dopad nejen na životní prostředí.....	16
1.1.4 Finální fáze života vozidel.....	16
1.2 Zvýšení soběstačnosti v oblasti pohonných hmot.....	16
1.3 Vyrovnavání zátěže elektrické sítě.....	18
2 Výroba Vodíku.....	20
2.1 Termální procesy.....	20
2.1.1 Parní reformování.....	20
2.1.2 Parciální oxidace.....	21
2.1.3 Plazmové reformování.....	22
2.1.4 Zplyňování.....	22
2.2 Elektrolytické procesy.....	23
2.2.1 Princip.....	23
2.3 Fotolytické procesy.....	24
3 Skladování a distribuce.....	25
3.1 Komprese.....	25
3.2 Zkapalnění.....	27
4 Spalování vodíku.....	29
4.1 Vlastnosti vodíku.....	29
4.1.1 Široké pásmo možného zapálení.....	29
4.1.2 Nízká zážehová energie.....	29
4.1.3 Malá vzdálenost vyhasnutí.....	29
4.1.4 Vysoká samozápalná teplota.....	30
4.1.5 Vysoká rychlost plamene.....	30
4.1.6 Vysoká difuzivita.....	30
4.1.7 Nízká hustota.....	30
4.2 Poměr vzduchu a paliva.....	30
4.3 Předčasný zážeh.....	31
4.4 Zážehové systémy.....	31
4.5 Termální účinnost.....	32
4.6 Emise.....	32
5 palivové články.....	34
5.1.1 Proton exchange membrane fuel cell (pemfc).....	34
5.1.2 Solid acid fuel cell (safc).....	36
5.1.3 Alkalín fuel cell (afc).....	37
5.1.4 Phosphoric acid fuel cell (pafc).....	38
5.1.5 Molten carbonate fuel cell (mfc).....	38

6	Vozidla.....	40
6.1	Dostupnost vozidel.....	Chyba! Záložka není definována.
6.1.1	Automobily se spalovacím motorem na vodík	41
6.1.2	Automobily s palivovými články	42
7	Energetická náročnost využití vodíku.....	45
7.1	Tank to wheel	45
7.1.1	Spalovací motor s kapalným vodíkem	45
7.1.2	Spalovací motor se stlačeným vodíkem	45
7.1.3	Využití v FCEV	45
7.1.4	Srovnání s konvenčními palivy	46
7.1.5	Srovnání s BEV	46
7.2	Well to tank	46
7.2.1	Výroba benzínu	46
7.2.2	Výroba nafty	47
7.2.3	Výroba elektřiny pro bev	47
7.2.4	Výroba vodíku.....	47
7.3	Well to wheel.....	47
7.3.1	HICEV	47
7.3.2	FCEV	48
7.3.3	BEV	48
7.3.4	ICEV	48
7.4	Nahrazení ropy vodíkem	48
8	Budoucí výhledy	50
	Závěr	52
	Seznam použitých zkratk a symbolů	57

ÚVOD

V současné době je hojně diskutovaným tématem neblahý vliv lidstva na životní prostředí. Ve velkém se na tomto znečišťování podílí doprava. Jednou z alternativ ke klasickým palivům je vodík.

Vodík jako prvek byl objeven v 17. století. Od 18. století, kdy Henry Cavendish sledoval jak reakce železa a slabých kyselin tvoří, jak jej nazval „hořlavý vzduch“, je znám jakožto nosič energie. Vodík je nejjednodušší chemický prvek, jenž tvoří většinu známého vesmíru. Je to bezbarvý, lehký plyn, jenž nemá chuť ani zápach. Za normální teploty je stabilní, kdy se slučuje jen s fluorem. Výrazně reaktivnějším se stává po zahřátí, zvláště s kyslíkem a halogeny se slučuje v prudkých reakcích. Vodík vytváří sloučeniny se všemi prvky periodické tabulky s výjimkou vzácných plynů.

Tato práce se zabývá důvody a výhodami využití vodíku jako paliva dopravních prostředků a motivací jeho rozšířenému využití ve společnosti. Práce uvádí způsoby, jakými je v dnešní době vodík získáván ze sloučenin a jak se tyto způsoby budou pravděpodobně do budoucna vyvíjet. Budou uvedeny metody skladování a uchovávání vodíku, které jsou v dnešní době jednou z komplikací v komerční dopravě. Budou uvedeny způsoby využití ve spalovacích motorech a palivových článcích, jejich srovnání na úrovni energetické účinnosti a jejich výhody a nevýhody s ohledem na ekologii a jejich využití v dopravních prostředcích. Budou představena vozidla, která mají v současné době potenciál nahradit vozidla se spalovacími motory, a která jsou již dnes uváděna do sériové výroby.

Cílem této práce je posoudit, zda může být vodík již dnes v globálním měřítku použit jako palivo pro vozidla, popřípadě jaké jsou překážky v jeho zavedení, a zda je jeho využití, jakožto běžného paliva, energeticky a ekologicky opodstatnitelné. V závěru bude uveden vývoj, jakým se nadále vodíková technologie bude s největší pravděpodobností ubírat.

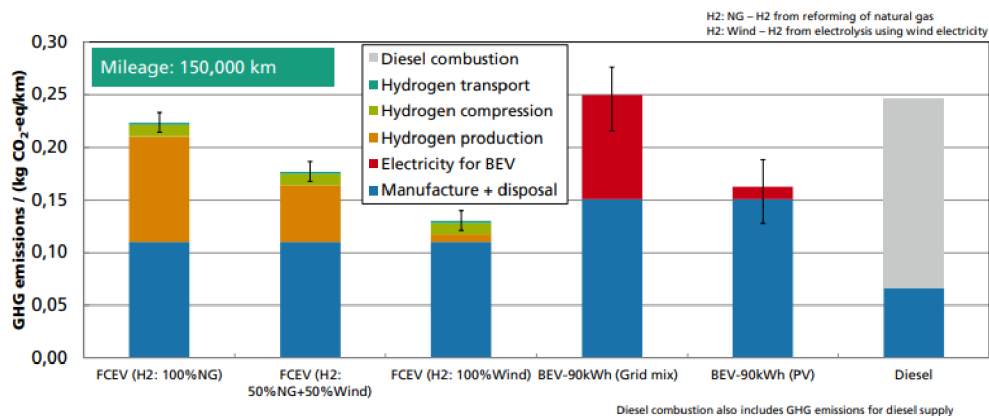
1 DŮVODY VYUŽÍVÁNÍ VODÍKU V DOPRAVĚ

Přechod na vodík, jako palivo pro širokou veřejnost, s sebou nese nemalé výzvy a překážky, se kterými se budou lidé potýkat nejen na osobní úrovni v každodenním životě, ale také na úrovni vlád zemí a nadnárodních organizací. Pro zhodnocení, zda má vůbec smysl se těmito překážkami zabývat, je nutné zohlednit důvody, proč vodík využívat a jaké výhody či nevýhody z toho plynou. Tímto se bude zabývat následující kapitola.

1.1 EKOLOGIE

Ekologie je primárním a nejpodstatnějším důvodem pro zavedení vodíku jako paliva. Celosvětový trend globálního oteplování je většinou populace uznáván a vnímán jako potenciální hrozba let budoucích. Jen v Evropě se v roce 1990 podílela doprava 15 procenty na celkových emisích skleníkových plynů. V roce 2017 již tento podíl vzrostl na 25 %. Využití vodíku nebo elektromobility pro pohon v dopravě je ale i nyní stále v poměrně rané fázi.

Pro opodstatněné využívání vodíku v dopravě a elektromobility obecně uvedeme výhody s ní spojené. Než se tím ale tato práce začne zabývat, je nutné vyvrátit mylnou domněnku, že samotná výroba FCEV nebo EV často vyprodukuje více emisí CO₂, než klasický spalovací motor za celou dobu svého provozu atd. Na pomoc je zde hned několik studií a zpráv, jež povětšinou srovnávají konvenční vozidla a elektromobily. Jak lze vidět v následujícím grafu, emise vyprodukované samotnou výrobou FCEV a BEV jsou téměř srovnatelné a v porovnání s výrobou ICE o něco vyšší, avšak v porovnání s celkovými emisemi diesellového motoru je však zřejmé, že se tato vyšší počáteční „investice“, v podobě vyšších emisí, vyplatí.



Obrázek 1 Emise provozu vozidel včetně produkce [1]

Jelikož jsou tyto hodnoty pro BEV a FCEV srovnatelné, není nutno mezi nimi činit rozdíly a v následujících odstavcích bude srovnáváno EV s ICEV, a to z důvodu většího množství dat a studií, provedených právě k jejich srovnání.

1.1.1 EMISE V ZÁVISLOSTI NA VYUŽITÝCH ZDROJÍCH ENERGIE

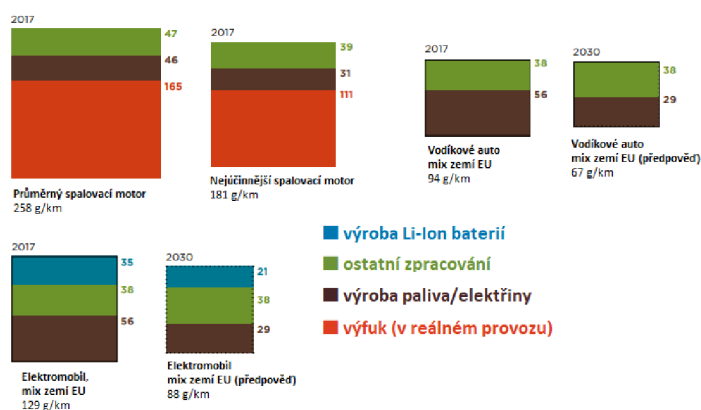
Existují dva hlavní pohledy na emise, a sice buď tzv. tank-to-wheel (TTW), neboli od nádrže ke kolům, anebo well-to-wheel (WTW), tedy od zdroje ke kolům. V případě TTW je výhoda FCEV a BEV zřejmá, především pak ve městech. BEV neprodukuje žádné emise a FCEV produkuje neškodnou vodu. Zohledníme však WTW emise, pak i EV nepřímo produkuje emise, a to ještě dříve než se rozjedou a to v elektrárnách.

To, jestli jsou FCEV a BEV smysluplnou náhradou ICEV, zaleží v nejvyšší míře na tom, z čeho je získávána elektřina, jíž je vozidlo nabíjeno, popřípadě na účinnosti získávání vodíku. Většina elektráren v dnešní době stále používá jako palivo uhlí, zemní plyn či obecně fosilní paliva.

Jaké zdroje energie jsou využívány, se liší v závislosti na dané zemi. V souvislosti s tímto kritériem je používán tzv. uhlíkový ekvivalent (CO_2e), který vyjadřuje vliv skleníkových plynů ve společné jednotce. Neboli množství skleníkového plynu se stejným vlivem, který by mělo jiné množství oxidu uhličitého. Následující statistiky ukazují, kolik gramů CO_2e vyprodukuje různé země pro nabití EV v závislosti na zdrojích, které využívají.

EVROPA

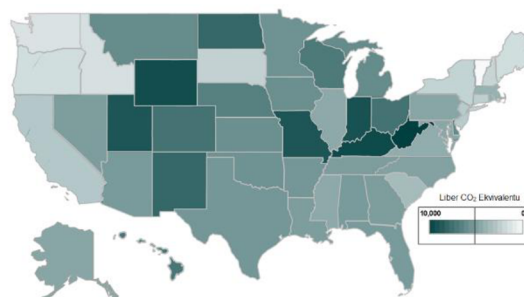
Ze statistiky pro evropský trh vozů (European vehicle market statistic) pro rok 2018/2019 vyplývá, že již dnešní elektromobily předčí konvenční motory přibližně o 50 % nižšími emisemi. [2] Pro diagram bylo užito vozidlo kategorie M1 (do 3,5 tun) s životním cyklem 150 tis. km.



Obrázek 2 Vliv energetického mixu na vyprodukovaný oxid uhličitý na ujetý kilometr [2]

USA

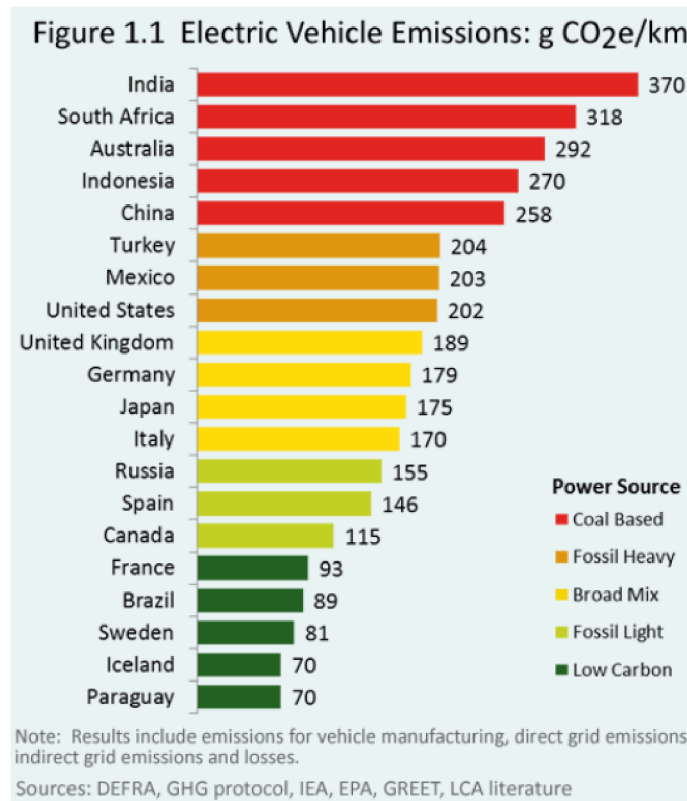
Na podobný problém se zaměřil článek odkazující se na americký úřad vozových technologií (Vehicle Technologies Office of the US Department of Energy), který říká, že elektromobily v národním průměru produkují 4815 liber ekvivalentu, zatímco benzínové motory produkují 11435 liber toho samého. [3] To znamená, že průměrný konvenční automobil vyprodukuje více než dvojnásobek emisí než průměrný elektromobil. Dokonce i v případě států jako Utah, které získávají energii primárně z neobnovitelných zdrojů, prospěje člověk ekologii. Celkové emise jsou sníženy již v horizontu 10 let, což je méně než průměrná životnost baterie.



Obrázek 3 Uhlíkový ekvivalent v USA [3]

SVĚT 21

Jak bylo zmíněno již dříve, odpověď na otázku, zda je elektromobilita smysluplná není černobílá, ale pohybuje se na škále šedi, a to v závislosti převážně na tom, z jakých zdrojů je čerpána energie pro pohon EV. Jak lze vidět z následující statistiky, některé země skutečně produkují více skleníkových plynů podporou EM, než kdyby zůstaly u konvenčních způsobů dopravy. [4] Jsou to země jako Indie, Austrálie nebo Čína. Jak si která země stojí je patrné na následujícím grafu.

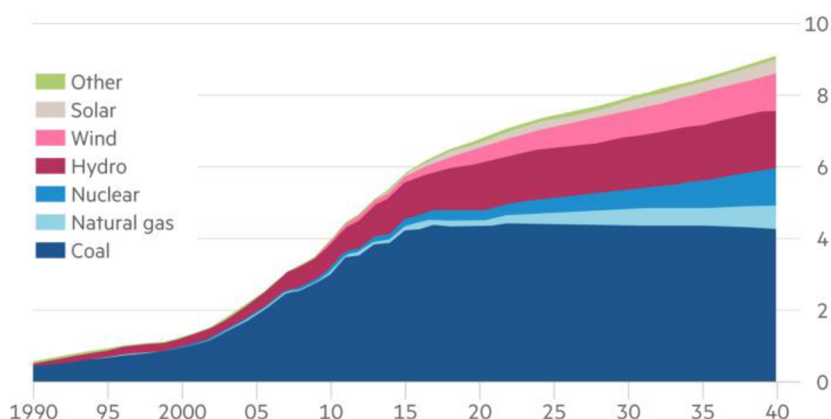


Obrázek 4 Ekvivalent dioxidu uhliku v gramech v různých světových zemích [4]

Vezmeme-li v potaz, že průměrné americké auto vyprodukovalo v roce 2013 300 gramů uhlíkového ekvivalentu, pak je z diagramu jasné, ve kterých zemích jsou EV pro životní prostředí prospěšná.

ČÍNA

Zájem Číny na rozšíření elektromobilů, jako hlavního způsobu osobní dopravy, se potýká se skepsí. Deník Financial Times totiž uvedl, že konkrétně pro ni nejsou EV vhodnou alternativou vzhledem k tomu, odkud její energie pochází. [5] I přes to čínská vláda investovala odhadem 60 miliard dolarů, vyžadující od výrobců aut velké objemy EV, a sice mezi 2,4 a 2,7 milionů aut za rok do roku 2020. Důvody Číny se tedy zdají být spíše politické. Čína se tak částečně zbaví nutnosti importu ropy ze zahraničí, ale také hospodářské, díky tomu že se velkou produkční kapacitou chystá na dobu, kdy bude infrastruktura pro EV na světovém trhu dostatečná pro to, aby lidé začali kupovat EV v podobném množství, jako teď kupují konvenční vozy. Čína navíc není na světové úrovni konkurence schopná, co se týče produkce kvalitních ICEV, ale je silnější ve výrobě baterií. Tyto spekulace se opírají o studii, na které spolupracovali výzkumníci z Harvardovy univerzity a Univerzity Tsingua v Pekingu. Ta doporučuje vlastníkům EV, aby neužívali rychlodobíjecích stanic, a místo toho nabíjeli své vozy přes noc za užití obyčejné rozvodné sítě. Pokud by spotřebitel nabíjel vozy v tomto pomalém módu, využil by mimošpičkovou větrnou energii, zatímco užití rychlodobíjecí stanice by vedlo k vyššímu znečištění. Dle další studie Michiganského institutu pro transport by bylo ekologičtější, kdyby v případě užití vozu se spotřebou 7 litrů na 100 km a nižší, lidé jezdili konvenčními vozy. Jak ukazuje následující graf, hlavním zdrojem elektrické energie je uhlí. Odhady však naznačují, že by se jeho podíl na celkové produkci měl do budoucna snižovat a ustoupit obnovitelným zdrojům a jaderné energii.



Obrázek 5 Poměr různých zdrojů el. energie v Číně [6]

ČESKÁ REPUBLIKA

Užijeme-li stejná kritéria jako jsme užili ve statice výše pro Evropu, musíme počítat s emisemi vyššími (okolo 163 g/km). [7] To je dáno energetickým mixem země. I přesto budou emise skleníkových plynů nižší o 37 %. Do budoucna by se díky klesajícímu podílu uhlí na výrobě energie měla tato úspora emisí navýšit až na 70 %.

1.1.2 NOVÉ ŠETRNĚJŠÍ SPALOVACÍ MOTORY

I přes výše jmenované argumenty není názor, že elektromobilita je řešením emisí v dopravě, sdílen všemi. Článek serveru auto.cz vyzdvihuje nové modely Peugeot 508, který vyprodukuje 124 g/km a Mercedes-Benz třídy E, který je na tom ještě lépe s 109 g/km. [8] Byť jsou tyto hodnoty pokrokem a je prospěšné, že si automobilky dávají záležet na zlepšování jejich spalovacích motorů i přes jejich ohroženou budoucnost, nejsou tyto hodnoty vypovídající, a to

z následujících důvodů. Zaprvé článek uvádí jen emise vyprodukované samotnou jízdou, tedy zanedbává emise související s výrobou vozu a produkcí paliva. Zadruhé, jak již bylo zmíněno, je ekologie EV závislá primárně na zdroji energie. Pokud tedy země získá nové zdroje energie, například výstavbou nové vodní elektrárny, ekvivalent oxidu uhličitého klesne okamžitě bez nutnosti koupě nového EV nebo jakékoli změny na stávajícím voze. Na závěr uveďme, že se požadavky nadále budou zpřisňovat. Evropská Unie požaduje pro vozy typu M1 do roku 2025 emise 81 g/km. To je proveditelné i bez EV, ale je nutná úprava motorů, která stojí automobilky 500 Eur za kus. Na rok 2030 však EU výhledově požaduje emise 59 g/km, což již bez EV proveditelné není.

1.1.3 DOPAD NEJEN NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Jádro celého problému oteplování planety není jen samotný fakt, že nyní v atmosféře naměříme o několik stupňů Celsia více. Krom zjevných událostí, jako je například zvyšování hladiny oceánů, které byly vyvolány klimatickou změnou, je nutno zohlednit samotný dopad na zdraví lidí samotných. Znovu vezměme v potaz námitku mnohých, že EV produkují stejně či více skleníkových plynů, jen mají svoje výfuky v komínech elektráren. Přehlédněme nyní výše zmíněná fakta, která toto tvrzení vyvracejí, a čistě hypoteticky dejme tomu, že by existovaly EV, které by produkovaly tolik skleníkových plynů jako spalovací motory na gram přesně. Přesto i v tomto případě je užití EV přínosem pro společnost, protože skleníkové plyny jsou produkovány daleko od hustě obydlených oblastí, tedy měst. Dle deníku Time, stojí kontaminované ovzduší globální ekonomii více než 5000 miliard dolarů ročně. [9] Přestože EV snižuje jen minoritní podíl znečištění, doprava tvoří jen asi 22 % celkových emisí a z toho jen 40 % je ta automobilová, při pohledu na 5000 miliard to není zanedbatelná částka. Dalším faktorem zvyšujícím kvalitu života v hustě zalidněných oblastech je snížení hlukového znečištění.

1.1.4 FINÁLNÍ FÁZE ŽIVOTA VOZIDEL

Klimatický dopad finální etapy EV a ICEV je srovnatelný. Nezanedbatelnou výhodou by byla možnost úspory mezi 23 až 43 % emisí recyklací baterií oproti zpracování ze surových materiálů, kdyby se potvrdil předpoklad možnosti recyklace. [10] Podle internetové stránky youmatter je však praxe přesně opačná. [11] Na rozdíl od baterií na bázi olova, z nichž je 99 % recyklováno, lithium-iontové baterie obsahují tak malé množství lithia, že jejich recyklace nepředstavuje pro trh finančně lákavou příležitost. V důsledku tak bylo v roce 2011 na evropském trhu recyklováno pouze 5 % lithia a zbytek byl buď spálen, nebo vyvezen na skládku.

1.2 ZVÝŠENÍ SOBĚSTAČNOSTI V OBLASTI POHONNÝCH HMOT

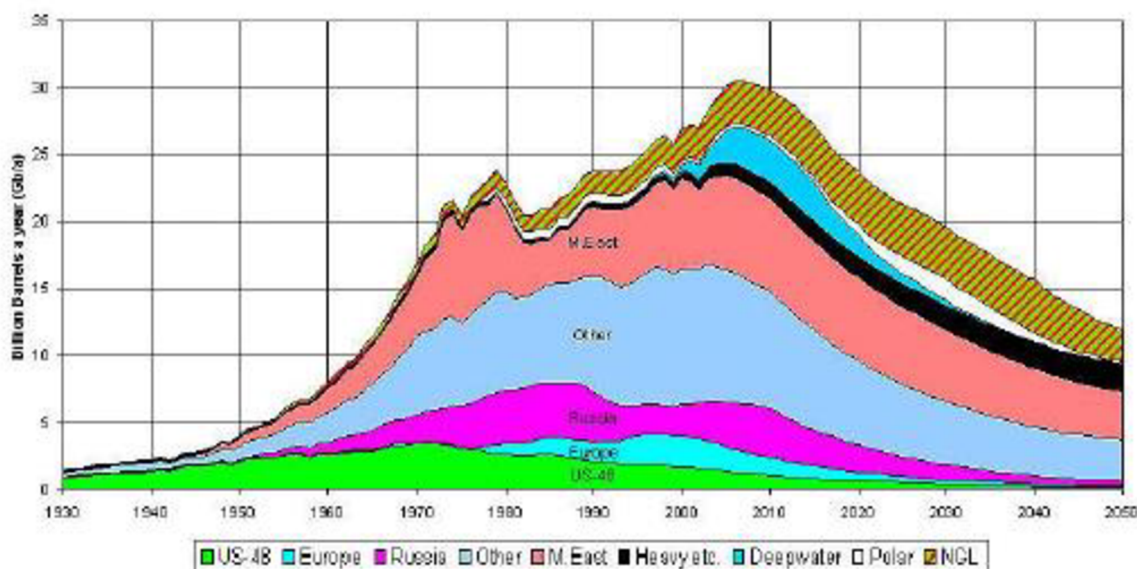
Žijeme v době neustálého zvyšování se spotřeby energie. Již byly učiněny pokroky ve snižování energetické náročnosti, jako například zvyšování účinnosti elektráren či snižování spotřeby paliv u dopravních prostředků. Nárůst spotřeby obyvatel i globální nárůst obyvatel obecně je však stále v převaze. Zmíněné úspěchy se tak neprojevují v takové míře, aby celkový nárůst spotřeby energie významně zpomalily, natož zastavily.

V dnešní době relativního míru se může zdát, že soběstačnost z politického hlediska lehce ztrácí na významu, nicméně není nutné chodit daleko do historie pro události, při kterých se energetické zdroje staly vlivným nástrojem. Přerušení dodávek zemního plynu přes Ukrajinu do Polska, Bulharska a dalších států EU se v tehdejší zimě na přelomu let 2008/2009 částečně dotkly také České republiky. Tato obava je předním argumentem politického dění kolem

alternativních paliv. I z hlediska ekonomického je pro stát nezávislost na ropě popřípadě zemním plynu velkou výhodou.

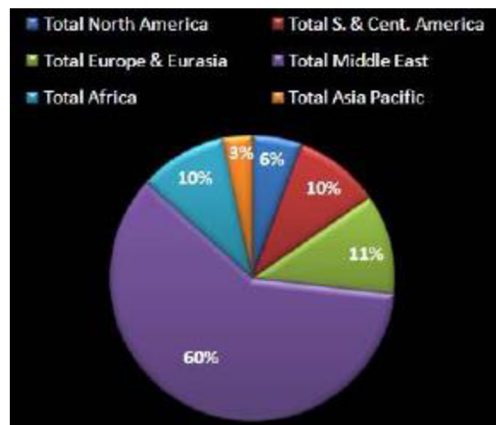
To jsou důvody, díky kterým sílí přesvědčení, že je třeba zásadní změny energetického systému, pokud má být nadále udržitelný. Toto mínění je dále podporováno prognózami, které tvrdí, že termín dosažení maximální těžby ropy se pohybuje v rozmezí let 2015 a 2030. [12] Dosažení maxima nadále přibližuje Čína a Indie, jejichž poptávku by neuspokojil ani přímý ropovod ze Saudské Arábie. Naopak k oddálení by mohlo dojít nalezením nových ložisek v oceánech či ropných píscích, ty s sebou ale nesou větší náklady na těžbu, než u klasických zdrojů.

V poslední době se setkáváme se stále častěji se vyskytujícím pojmem ropná krize. Za několik desítek let dosáhneme tzv. Ropného vrcholu (Oil-Peak, nebo také Hubbertův ropný zlom). Ten neříká, že nutně dojde k vyčerpání veškeré ropy na zemi, ale spíše popisuje stav, kdy bude cena ropy neúnosně vysoká, začne po ní klesat poptávka a s tím také objem její těžby. K jejímu úplnému vyčerpání dojde zřejmě až za několik set let, nicméně jako zdroj energie bude ekonomicky a poté i energeticky nezajímavá. Výjimkou bude chemický a farmaceutický průmysl, kde je nezastupitelným zdrojem uhlovodíků.



Obrázek 6 Předpokládaný scénář průběhu ropných zásob [12]

Graf výše ukazuje předpokládané rezervy různých oblastí. To je však velmi hrubý odhad. Korporace velmi zřídka zveřejňují skutečný stav svých rezerv, a to z komerčních důvodů. Firmy v praxi nejprve záměrně podhodnotí velikost nově objevených nalezišť, aby mohly do budoucna vydávat pozitivní zprávy a zvýšit tak hodnotu svých akcií, či ropy jako komodity. Závažnější je ale opačný problém, kdy byly v 80. letech odhady rezerv zemí OPEC (Organizace zemí vyvážející ropy) značně nadhodnocovány. Americký úřad o ropných zásobách vydal zprávu, která tvrdí, že jsou dnes světové zásoby ropy vyčerpávány třikrát rychleji, než jsou objeveny nové.

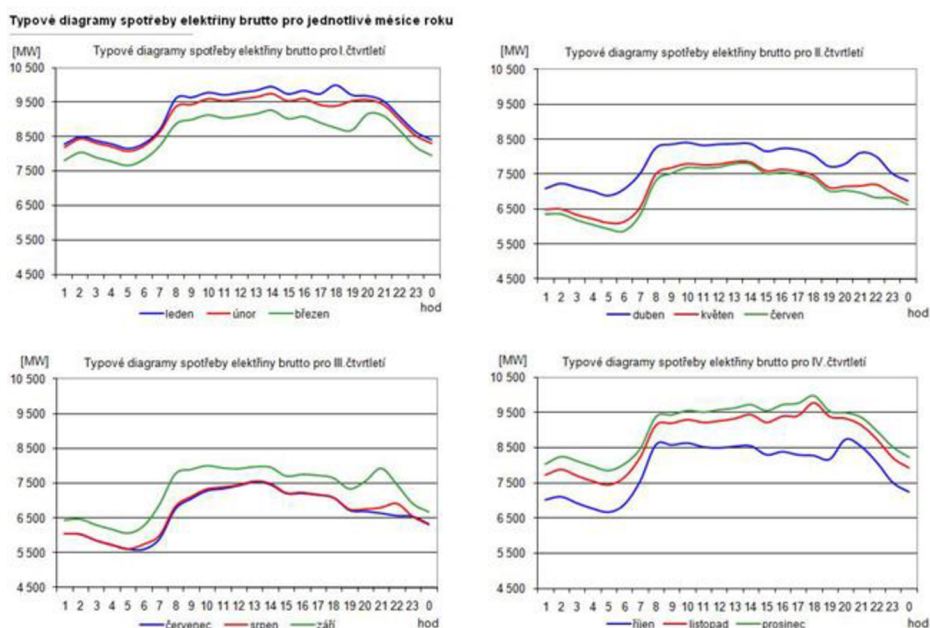


Obrázek 7 Rozložení ověřených zásob světové ropy [12]

Využívání ropy je zatím stále praktické (relativní dostupnost, přijatelná cena), ale jak lze z grafu vidět, rozmístění zásob není pro západní státy ideální. Přední průmyslové a vědeckovýzkumné instituce zabývající se nalezením alternativních paliv se nacházejí právě v USA, EU a Japonsku.

1.3 VYROVNÁVÁNÍ ZÁTĚŽE ELEKTRICKÉ SÍTĚ

Následující graf ukazuje spotřebu elektrické energie v závislosti na denní době:



Obrázek 8 Spotřeba elektrické energie v závislosti na denní době [13]

Jak lze vidět, v závislosti na ročním období se sice mění absolutní hodnota spotřebované energie, nicméně křivka spotřeby v průběhu dne je po celý rok velmi podobná. To je dáno pracovní dobou, návyky lidí atd. Přestože se tento průběh každý den opakuje více méně stejně, problémy s tím spjaté se energetickým společenstvem nijak neulehčují. Každou hodinu musí řídicí centra vyrovnávat zátěžové špičky v celostátní síti, aby nedošlo k výpadku proudu. Úkol nezlehčuje ani rozmach obnovitelných zdrojů, především pak solárních panelů a větrných elektráren, které jsou velmi nestálé a závislé na počasí.

Uložení energie vyrobené v době s nízkou spotřebou do vodíku a následně jejím opětovným využitím v době špiček se do budoucna zdá být vhodným řešením. V současné době tuto funkci zastávají především přečerpávací nádrže a baterie. Ty s sebou však nesou obtíže. V případě přečerpávací nádrže to je dlouhý náběh systému (jednotky minut). V případě baterií to jsou ztráty energie v případě dlouhodobého uskladňování. V současné době je však 99 % veškeré akumulací kapacity tvořeno přečerpávacími vodními elektrárnami.

To by se v blízké budoucnosti mělo změnit s nástupem technologie Power-to-Gas (P2G), neboli technologie přeměny elektrické energie na plynná paliva konkrétně vodík či metan. Ty je následně možné přidat do stávající infrastruktury plynovodů a zásobníků, která např. v Německu dosahuje kapacity 200 000 GWh. [14] To je kapacita dostatečná k pokrytí spotřeby Německa na několik měsíců. Pro srovnání, veškerá kapacita německých přečerpávacích vodních elektráren činí 40 GWh.

Vodík lze do soustavy zemního plynu přidat až do 2 % bez změny spalovacích vlastností plynu. Další možností je následná výroba syntetického plynu metanizací, neboli sloučením vodíku a oxidu uhličitého Sabatierovou reakcí za vysoké teploty. Při dostatečné čistotě plynu je pak možno jej přidávat do soustavy neomezeně. Do budoucna lze počítat se scénářem, kdy bude vodík vyráběn u významného zdroje energie (jako je např. jaderná elektrárna) a následně jej vlastní distribuční síť rozvádět do čerpacích stanic. Na to ovšem zatím není připravena jak infrastruktura, tak ani dostatečný počet vodíkových vozů, které by tvořily poptávku.

Výroba vodíku elektrolýzou může dosahovat až 80 % a následná účinnost výroby metanu se za příznivých okolností pohybuje okolo 90 %. Celý proces výroby metanu tak dosahuje účinnosti kolem 72 %. Proces využití elektrické energie k získání plynu a následně opětovná výroba elektřiny spalováním plynu dosahuje účinnosti 45 % v případě vodíku a 40 % v případě metanu.

2 VÝROBA VODÍKU

Vodík je nejhojnější prvek známého vesmíru, který z něj tvoří až 75 %. V elementární formě se však vyskytuje velmi vzácně, v naprosté většině případů je vázán ve sloučeninách. V následující kapitole se budeme zabývat procesy, jimiž se vodík ze sloučenin získává a které jsou často již dlouho známé, jelikož je vodík nezbytným prvkem pro mnoho pochodů v chemickém průmyslu. Roku 2019 se celosvětově vyprodukovalo odhadem 70 milionů tun vodíku na rozličné účely, jako například rafinování ropy, amoniaku či metanolu.

Existují 4 hlavní typy komerčního získávání vodíku, a sice ze zemního plynu (48 %), ropy (30 %), uhlí (18 %) a z vody (4 %). Ze zmíněných procent je zřejmé, že drtivá většina vodíku je stále získávána z fosilních zdrojů.

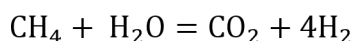
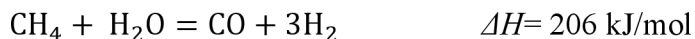
Technologie pro získávání vodíku se dají rozdělit do tří hlavních kategorií. Jsou to termální, elektrolytické a fotolytické procesy.

2.1 TERMÁLNÍ PROCESY

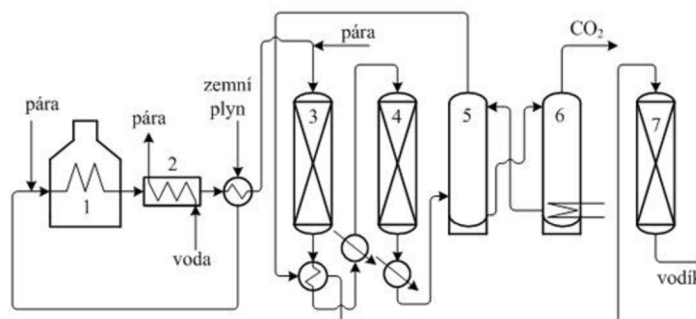
2.1.1 PARNÍ REFORMOVÁNÍ

Tato technologie je v současnosti nejlevnějším a nejrozšířenějším způsobem výroby vodíku. Nejčastější surovinou pro tento způsob zpracování je zemní plyn. Obsahuje-li sloučenina nepřijatelné množství síry, musí se ještě před samotným reformováním odsířit, jelikož sloučeniny síry působí na katalyzátory parního reformování jako tzv. katalytický jed.

Proces probíhá v peci při teplotách 750–800 °C a za tlaku 3–5 MPa [14] v potrubí naplněném katalyzátorem na bázi oxidu nikelnatého. Metan, což je majoritní složka zemního plynu, reaguje s vodní párou což má za následek vznik oxidu uhelnatého či oxidu uhličitého a vodíku.

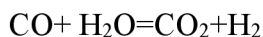


Poměr vodní páry a zemního plynu je přibližně 3:1, vodní páry je více, aby se uhlík neusazoval na katalyzátoru a aby se posouvala rovnováha těchto endotermních reakcí blíže k reakčním produktům.



Obrázek 9 Schéma parního reformování [14]

Reakční produkty o teplotě cca 750 °C jsou vedeny kotlem na výrobu páry a výměníkem, kde jsou ochlazeny na zhruba 360 °C, do konvertorů, kde jsou reakcí s oxidem uhelnatým a další vodní párou přeměněny na CO₂.



Tato exotermní reakce je obvykle realizována ve dvou stupních. V tom prvním, tzv. vysokoteplotním stupni, je užíváno katalyzátoru, na bázi oxidů železa a chrómu, jenž je odolnější proti sirným nečistotám. V těchto konvertorech dochází, díky probíhající exotermní reakci, ke vzrůstu teploty produktů na přibližně 500 °C. Vyšší teplota snižuje rovnovážný výtěžek CO₂ a H₂, to je důvod, proto se produkty ochlazují a jsou vedeny do nízkoteplotního konvertoru. V nízkoteplotním konvertoru, jenž je naplněn vysoce aktivním měděným katalyzátorem, dojde za teploty 180 - 230 °C ke snížení koncentrace oxidu uhelnatého až na 0,2 - 0,3 % obj.

Na každou tunu vodíku, která se takovýmto způsobem vyprodukuje, připadne 9 tun oxidu uhličitého. Tento vedlejší produkt však nemusí znečišťovat ovzduší. Pokud je v továrně, reformující páru, zařízení na pohlcování CO₂, pak se plyn pochyty a uskladní pod zemí. To se ovšem děje za zvýšení energetické náročnosti a tím i nákladů.

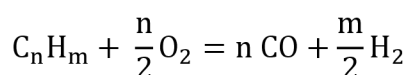
Účinnost takového procesu závisí na poměru uhlíku a páry ve směsi a pohybuje se mezi 65 a 80 procenty. V současné době se jedná o nejpoužívanější metodu výroby vodíku v komerční sféře.

2.1.2 PARCIÁLNÍ OXIDACE

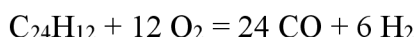
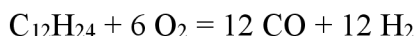
Hlavní surovinou pro tento proces je opět zemní plyn nebo jiné uhlovodíky, ať již plynné či kapalné, nejčastěji pak těžké ropné frakce. Jedná se o rozšířený způsob výroby syntetických plynů. Parciální oxidace je reakce suroviny a kyslíku, kterého je přítomno menší množství, než je třeba k plnohodnotnému hoření.

Suroviny jsou zplyňovány kyslíkem a vodní parou o teplotách 1300 až 1500 °C a tlacích 3 až 8 MPa. [15]

Chemická rovnice procesu ve svojí obecné formě vypadá následovně:



Za ideálních podmínek by pak konkrétní případy vypadaly takto:



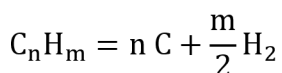
Zplyňování kyslíkem je vysoce exotermní. Za použití vodní páry dostaneme větší množství vodíku než při zplyňování kyslíkem a zároveň snižujeme teplotu produktů na požadovanou úroveň okolo 1350 °C.

Účinnost parciální oxidace uhlí se pohybuje okolo 55 %. V případě těžké ropy se účinnost blíží 70 %.

2.1.3 PLAZMOVÉ REFORMOVÁNÍ

Tzv. Kværnerův proces je metoda reformování plazmou, přičemž se vytváří saze a vodík, a to z uhlovodíků, jako jsou metan, zemní plyn a bioplyn. Proces byl vynalezen v 80. letech 20. století norskou inženýrskou firmou Kværner a byl komerčně využíván až do roku 1999.

Endotermická reakce separuje uhlovodíky na uhlík a vodík v plazmovém hořáku za teplot kolem 1600 °C. Výsledné částice, uhlík a vodík, jsou přítomny jako směs ve formě aerosolu.



Na rozdíl od ostatních forem reformace, jako jsou parní reformování a parciální oxidace, se při plazmovém reformování přetvoří zemní plyn účinně a kompletně a je přeměněn na čistý uhlík a vodík. Po separaci směsi mohou být částice uhlíku použity například jako aktivovaný uhlík či grafit. Získaný uhlík je ve formě pevného prášku a tvoří technický produkt, jenž může být použit jako plnivo v gumařském průmyslu. Vodík může být dále zpracován v chemickém průmyslu nebo jako palivo v energetickém odvětví.

Z vložené energie je uloženo cca 48 % ve vodíku, 40 % v aktivovaném uhlíku a 10 % v přehřáté páře. [18]

2.1.4 ZPLYŇOVÁNÍ

Zplyňování je proces, při němž jsou uhlíkaté látky transformovány na produkty cennější a lépe využitelné. Zplyňování i spalování transformují látky pevné na plynné, ovšem zplyňování funguje za omezeného množství kyslíku, zatímco u spalování je spotřeba kyslíku mnohonásobně větší. Zároveň při spalování dochází k tepelné destrukci materiálů za vzniku tepelné energie. Naopak při zplyňování dochází k transformaci paliva na produkty, které mohou být využity různými způsoby, jako například chemikálie nebo paliva. Zplyňování je tedy šetrnější k životnímu prostředí. Zplyňování je proces velmi podobný parciální oxidaci s tím rozdílem, že, kvůli tekutému stavu ropy či plynů, nedochází k některým stádiím zplyňování, jako je např. pyrolýza, buď vůbec, nebo jen velmi málo.

Uhlíkaté látky, použité k těmto procesům, obsahují zároveň vodík, dusík, kyslík, chlór a síru. Sloučeniny získané hořením jsou CO₂, H₂O, SO₂, NO, NO₂ a HCl. Produkty zplyňování pak jsou syntetické plyny obsahující CO, H₂, H₂O, CO₂, NH₃, N₂, CH₄, H₂S, HCl, COS, HCN. Spalováním vzniklé plyny dále podstupují řadu procesů, již mají za úkol separaci nepatrných částic, těžkých kovů a anorganických látek. K tomu jsou využívány např. elektrostatické odlučovače popílků či odsiřovací zařízení. To zvyšuje energetickou náročnost procesu a tím i náklady a vzniká množství odpadu, které musí být dále zpracováno. Při zplyňování je však proces čištění snazší a efektivnější. Zbytkové pevné částice navíc nejsou tvořeny popelem, kdežto struskou, která může být použita např. pro výstavbu silnic, jelikož škodlivé látky jsou uzavřeny ve strusce a nekontaminují okolí. Výsledný syntetický plyn se pak dá dále parně reformovat (viz výše).

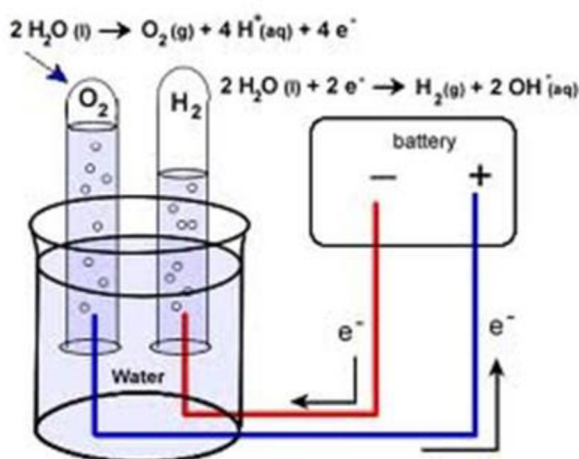
Zplyňovat se dají, kromě uhlí, i další suroviny jako např. ropný koks (pevný zbytek po rafinování ropy) či biomasa. Energetická účinnost konverze z biomasy na vodík dosahuje 68,9 %. [16]

2.2 ELEKTROLYTICKÉ PROCESY

Na rozdíl od způsobů zmíněných v předchozí podkapitole, které využívají fosilních zdrojů, koncept získávání vodíku elektrolýzou spočívá v štěpení vody na vodík a kyslík za dodání elektrického proudu. To znamená, že je tento proces dlouhodobě udržitelný a ekologický do té míry, nakolik je k výrobě elektřiny využíváno obnovitelných zdrojů. Je-li elektřina, potřebná k výrobě vodíku, obnovitelný zdroj, pak i vodík je obnovitelným zdrojem energie.

2.2.1 PRINCIP

Zdroj elektrické energie stejnosměrného proudu je připojen ke dvěma elektrodám umístěným ve vodě. Jakmile začne proud protékat, začne se vodík objevovat na katodě (kde elektrony vstupují do vody) a kyslík se začne hromadit u anody. Na negativně nabitě katodě dochází k redukční reakci, kde se elektrony přivedené katodou spojí s kationty vodíku a tvoří čistý vodík v plynné podobě. Na pozitivně nabitě anodě nastává oxidační reakce za vzniku plynného kyslíku a za odevzdání elektronů anodě, čímž je cyklus uzavřen.



Obrázek 10 Schéma elektrolýzy [17]

Pokud bychom předpokládali Faradayovu účinnost, mělo by množství atomů vodíku být oproti množství atomů kyslíku dvojnásobné a obojí je proporcionální k celkovému elektrickému náboji, který protekl roztokem. Nicméně v mnoha případech vyvstávají vedlejší reakce, které vedou k méně než ideální Faradayově účinnosti.

Elektrolýza čisté vody vyžaduje přílišnou energii ve formě vysokého potenciálu, aby překonala aktivační bariéru. Bez této nadměrné energie elektrolýza probíhá velmi pomalu či vůbec. Z tohoto důvodu je účinnost elektrolýzy zvyšována přidáním elektrolytu (jako např. sůl, kyselina či zásada), který v roztoku figuruje jako elektrokatalyzátor.

Přidáním elektrolytu rozpustného ve vodě značně vzroste vodivost roztoku. Dochází k disociaci elektrolytu na anionty a kationty. Anionty se pohybují směrem k anodě a neutralizují nárůst pozitivně nabitých kationtů vodíku. Stejně tak na druhé straně kationty elektrolytu směřují ke katodě a neutralizují negativně nabitě ionty OH^- . To umožňuje stálý tok elektřiny.

Při výběru elektrolytu je nutná rozvaha. Aniont elektrolytu se totiž, tak jako hydroxidový aniont, chce vzdát elektronu. Má-li elektrolyt nižší elektrodový potenciál než hydroxid, bude

oxidován namísto hydroxidu a nebude vznikat žádný kyslík. Kationt s vyšším elektrodoým potenciálem bude redukován namísto vodíkových kationtů a taktěž nebude vznikat žádný plynný vodík.

Z tohoto hlediska jsou vhodné následující kationty, jelikož mají nižší elektrodoým potenciál: Li^+ , Rb^+ , K^+ , Cs^+ , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ a Mg^{2+} . Z těchto je často používán sodík a lithium, a to proto, že to jsou levné a lehce rozpustné soli. Je-li jako elektrolyt užita kyselina, kationt elektrolytu je také H^+ a v roztoku tedy nekonkuruje kationům H^+ vytvořeným disociací vody. Nejběžněji užívanou kyselinou je H_2SO_4 a nejběžnějšími zásadami jsou KOH a NaOH pro jejich dobré vodivé vlastnosti. [19]

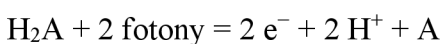
Jako elektrolyt jsou v dnešní době používány speciální polymery, které, ve spojení s katalyzátorem na každé straně membrány, dokážou efektivně štěpit molekuly vody již při 1,5 voltech.

Na principu elektrolýzy fungují i palivové články, ovšem s tím rozdílem, že zde jsme jmenovali elektrolýzu jako způsob výroby vodíku, zatímco palivové články vodík spotřebovávají, aby produkovaly elektrickou energii. Pro oba procesy ale můžeme použít stejné typy elektrolytů. O různých typech elektrolytů tedy bude více pojednáno v páté kapitole Palivové články.

Účinnost elektrolýzy rovněž závisí na použitém elektrolytu a bude uvedena dále.

2.3 FOTOLYTICKÉ PROCESY

Fotolýza je proces, při kterém dochází k štěpení látky v důsledku absorpce světla nebo jiného elektromagnetického záření. Foton světla reaguje s cílovou molekulou. Při tomto jevu závisí na energii fotonu, která je přímo úměrná frekvenci elektromagnetického záření, proto se takovéto reakce týkají frekvencí viditelného světla nebo vyšších. Reakce takového procesu vypadá následovně:



kde A zastupuje obecný prvek, tvořící sloučeniny s vodíkem, nejčastěji pak kyslík nebo síru.

Fotolýza stále podléhá výzkumu a v současné době není rentabilním způsobem produkce vodíku. Její účinnost se pohybuje pod 10 %, to by se ale v budoucnu mohlo díky nastupujícímu trendu vodíku změnit. [18]

3 SKLADOVÁNÍ A DISTRIBUCE

Moderní auta se spalovacím motorem spalují mezi 5 až 6 kg paliva na 100 km. Energetická hustota vodíku je 2,5 až 3krát vyšší než tradičních tekutých paliv, to značí, že je třeba okolo 2 kg vodíku na 100 km, potažmo 1 kg v případě palivových článků. Z hmotnostního hlediska se tedy vodík jeví jako výhodnější řešení, problém nastává, zohledníme-li volumetrické hledisko. Za pokojové teploty a atmosférického tlaku zaujímá 1 kg vodíku objem 11 m³. Zde narážíme na jednu z největších překážek pro uvedení vodíkových vozů do běžného života. V následujících podkapitolách se budeme zabývat možnostmi přechovávání vodíku způsobem, jenž je použitelný v osobních vozech, které vyžadují kompaktní nádrž.

3.1 KOMPRESSE

První známé využití stlačeného vodíku sahá do počátku 80. let 19. století, kdy britské expediční jednotky užívaly vodík převážený v kovaných svařených nádobách, aby naplnily válečné balóny při jejich tažení Afrikou a Asií. Tyto nádoby vážily 500 kg a většinu hmotnosti tvořily tlusté stěny železa, jež měly malou pevnost v tahu (okolo 350 MPa). [20] Byly schopny pojmout 25 m³ plynu, což odpovídá technické účinnosti pouze 0,05 m³/kg. Tato čísla se nadále zlepšovala, hlavně díky vývoji nových materiálů a nových výrobních procesů.

Na počátku 20. století se začaly, díky výrazným průlomům v technologii výroby oceli, produkovat vysoko- a nízkouhlíkové oceli, na něž v zápětí v 40. letech navázaly oceli hořčíkové, které poté byly nahrazeny ocelmi s příměsí chromu a molybdenu. Zapojením těchto, v té době průlomových, objevů vzrostla technická účinnost nádob z 0,05 m³/kg na 0,13 m³/kg, což znamená nárůst o 160 %. Náhlá stagnace nastala v 70. letech. Na vině bylo tzv. vodíkové zkřehnutí, známé z jiných aplikací, které se ale doposud neprojevovalo v oblasti vodíkového transportu. Tato závada se stala o to záhadnější, když se zjistilo, že postihuje jen nádrže, plněné několikrát za týden. V případě nádrží, plněných jen několikrát za rok, se problém nevyskytoval, jinými slovy hrálo roli únavové selhání. Přestože tlakové nádoby prodělaly mnohé testy v prototypové fázi, byly testovány jen hydraulicky, ne pneumaticky, natož s užitím vodíku. Tato selhání, která nastala napříč západní Evropou, vyvolala mnohá výzkumná vědecká šetření, sponzorovaná převážně vládami zemí, aby bylo zamezeno potenciálnímu veřejnému ohrožení, způsobenému únikem vodíku. Začátkem 80. let výsledky nezávislých studií přisoudily hlavní příčinu poruch vysoké tahové síle ocelí. To vysvětlilo, proč se tyto problémy vyskytovaly v Evropě, kde vysoké nároky na účinnost vyžadovaly ocele s vysokou pevností v tahu. Naproti tomu v jiných oblastech na světě, zvláště pak v severní Americe, tyto problémy nebyly, jelikož zde byly užívány měkčí ocele.

Za stejně závažný problém, jako byl ten s vysokou pevností v tahu, byl považován koncept lokalizovaného napětí, jelikož byly mnohé nádoby porušeny právě v tzv. kloubových oblastech (oblast, kde plášť přechází v základnu válce). V případech, kde se v náhlé změně profilu vyskytovala mikroskopická výrobní chyba, byla tato změna koncentrátor napětí a oblastí počátku poruchy.

Z těchto výsledků bylo vyvozeno, že maximální pevnost nádob v tahu by neměla přesahovat 950 MPa. Ještě striktnější maximální limit byl zaveden na velikost defektů vnitřního povrchu válců – ne více než 3 % tloušťky stěny válce. Tyto závěry si rychle osvojilo mnoho národních a mezinárodních standardů a norem. Jejich úspěšná implementace způsobila, že po téměř 40 let nedošlo k žádné závadě, vyvolané vodíkovým křehnutím. Tento problém se navíc vyskytoval

jen u válců vyrobených z oceli a nebyl problém, pokud byly jako materiál použity slitiny na bázi hliníku.

Hliníkové slitiny jsou proti vodíkovému křehnutí imunní, jelikož jejich FCC mřížka neposkytuje dostatek prostoru, aby vodík vyvinul dostatečné napětí. Přes tuto výhodu, je jejich použití limitováno dvěma faktory, z nichž jedním byla vysoká cena, a druhým byl mechanismus křehnutí tekutými kovy. Vodík se totiž často získával jako vedlejší produkt elektrolýzy solanky, kdy je rtuť užitá jako jedna z elektrod. Přítomnost rtuti, i při koncentracích jedna ku milionu, je škodlivá pro integritu tlakové nádoby, vyrobené z hliníkových sloučenin. Tento faktor rovněž omezil užití tlakových nádob na bázi hliníku. Z těchto důvodů se velké plynové společnosti ubíraly směrem ocelových nádob, které ale, kvůli dříve zmíněným omezením na tahovou pevnost, musely být těžší.

Společnosti operující s vodíkem však našly způsob, jak zvýšit technickou účinnost nádrží. Než aby používaly běžné nádrže o objemu pěti až osmdesáti litrů nádrže, zvolily jako vhodnější metodu tzv. Jumbo trubice pro přepravu vodíku. Počátkem 90. let tak tyto trubice, s vnitřním objemem okolo 3000 litrů a natlakováním na 20 MPa, posunuly hranici technické účinnosti na $0,16 \text{ m}^3/\text{kg}$. To znamenalo zlepšení účinnosti o 23 %.



Obrázek 11 Návěs se stlačeným vodíkem [20]

Od poloviny 90. let bylo prováděno širokosáhlé šetření, zda je možné tuto účinnost nadále zvyšovat. Práce, financovaná společně Evropskou asociací průmyslových plynů (European Industrial Gases Association-EIGA) a Evropskými producenty válců (European Cylinder Makers-ECM), měla za následek vydání nového standardu ISO TC58, jehož cílem je identifikovat nové třídy ocelí s nižším obsahem síry a fosforu, které by snížily počet inkluzí, a tím i počet možných míst iniciace jevu vodíkového křehnutí.

V dnešní době se vývoj zaměřil na kompozity vyztužené skelnými, aramidovými či uhlíkovými vlákny. Ty jsou schopny dnes ustát tlak 70 MPa, což vede k technické účinnosti $0,7 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Samotný vývoj nádoby, schopné ustát takový tlak, však není jediný problém. Stlačování vodíku je energeticky náročné a snižuje tak celkovou účinnost celého systému jeho užívání. Pro kompresi na zmíněný tlak se spotřebuje cca 13 % celkové energie obsažené ve stlačeném množství plynu. [21]

3.2 ZKAPALNĚNÍ

Před více než 120 lety James Dewer jako první zdárně zkapalnil vodík. Tímto způsobem byl vodík o kryogenické teplotě 20 K (-253 °C) převážen bezpečným a spolehlivým způsobem již 90 let. Před 40 lety začali výrobci automobilů implementovat tento způsob uchovávání do jejich prvních prototypů. Očekávané veřejné užití kryogenických paliv, jako je zkapalněný vodík, bude vyžadovat vhodný, bezpečný a spolehlivý způsob uchování a tankování, zvláště v porovnání s konvenčními čerpacími stanicemi, které už nemohou být výrazněji pohodlnější.

V následujících odstavcích budou diskutovány výhody zkapalněného vodíku (LH2) a nezbytnost nového konceptu systému nádrží specificky navrženému pro tento účel.

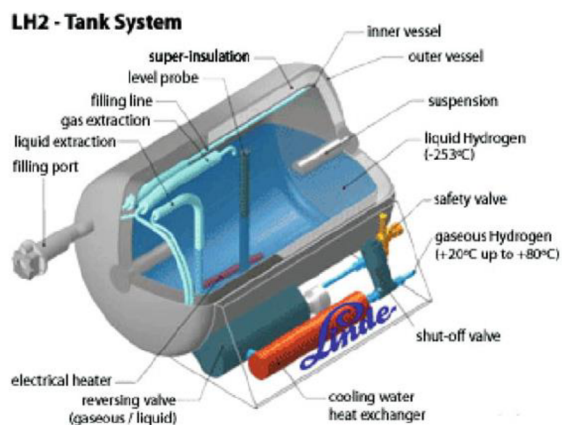
Skladování kryogenických kapalin jako LH2 vyžaduje speciální vybavení. Tzv. kryostaty jsou kovové nádoby s dvojitou stěnou, v níž je vložena izolace. Pro snížení teplotních ztrát je důležité si uvědomit, jak se teplo šíří, a sice radiací, konvekcí a kondukcí.

Pro snížení teplotní výměny radiací je vnitřní nádoba vybavena vícevrstvou izolací, sestávající z několika vrstev kovové fólie a skelné vaty. Izolovaná vnitřní vrstva nádoby je k té vnější uchycena speciálně navrženými vnitřními fixátory. Zbývající prostor mezi těmito dvěma vrstvami je vakuován, aby nedocházelo k teplotním ztrátám prouděním. Toto je též známé pod názvem vakuová superizolace. Pro minimalizaci ztrát, způsobených vedením, je nutná širší znalost kryogeniky pro vhodný design a výběr materiálu vnitřních úchyťů nádob a trubicového systému pro vpravování a extrahování vodíku. [22]

Finální rozložení, design a rozměry takovéto nádrže v konečném důsledku záleží na jeho účelu, ať už je to autobus, nákladní auto nebo osobní auto. Tvar kryogenického úložného systému musí být navržen, aby pasoval do omezeného prostoru vozidla. Koncipování tvaru nádrže na dostupném montážním prostoru znamená různé užité objemy. Užité objem může například vzrůst z 50 % (při použití klasického válcového tvaru) až na 100 % za užití tvaru odpovídajícímu montážnímu prostoru.

Kromě specifického tvaru nádržového systému jsou pro uchovávání vodíku nutná i další opatření. Na principu termosky, jež udržuje chladné chladným a naopak, i nádrž ochrání do značné míry vodík před tepelnou výměnou. Nicméně je fyzikálním zákonem, že se kryogenická kapalina vypaří. Vliv tepla může být snížen, nedá se mu však plně vyhnout. Za určitou dobu také v nádrži vzroste tlak. Výsledkem je, že pokud není vozidlo užíváno relativně krátkou dobu, je dosažena kritická hodnota tlaku, jež má za následek neúnosné výparné ztráty vodíku. Tak tomu bylo po dlouhou dobu.

Tento problém byl však vyřešen inovací, která umožňuje skladování po 12 dní, než se objeví výparné ztráty. Linde vymyslelo mechanismus, kde je obklopující vzduch vysušen a následně zkapalněn pomocí energie, získané z plynného vodíku, který se vypařil z tekutého. Zkapalněný vzduch (-191 °C) pak putuje skrz chladicí plášť nádrže a snižuje teplotu obsahu.



Obrázek 12 Schéma kryogenické nádrže firmy Linde [23]

Zkapalňování vodíku stojí energii, která je rovna 40 % energie obsažené ve zkapalněném vodíku. Energetická účinnost zkapalnění je tedy 60 %. [21]

4 SPALOVÁNÍ VODÍKU

V průběhu let vývoje vodíkových pohonů se vývojáři a automobilky soustředili na dva základní principy využití vodíku, a sice jako motor s vnitřním spalováním, anebo pomocí palivových článků. Pro úplnost uveďme, že je možné jej spalovat v plynových turbínách s kombinovaným cyklem podobně jako zemní plyn, tato metoda v praxi však nenašla uplatnění (podobně jako nenašly uplatnění plynové turbíny v autech poháněných zemním plynem, nýbrž se přistoupilo k motoru s vnitřním spalováním).

První pokusy sestavit vodíkový motor sahají zpět do roku 1820 k pokusům Reverenda W. Cecila. Motor pracoval na vakuovém principu, při němž atmosférický tlak tlačí válec proti vakuu a produkuje výkon. Vakuum je vytvořeno hořením směsi vodíku a vzduchu, která se rozepnula a následně se zchladla. Byť motor běžel uspokojivě, vakuové motory se nikdy nestaly rozšířenými.

V letech 1860 až 1870 N. A. Otto, vynálezce Ottova cyklu, údajně používal synteticky vytvořený plyn jako palivo, který v sobě pravděpodobně měl přes 50 % vodíku. Otto experimentoval i s benzínem, ale shledal ho být nebezpečným, což jej vedlo zpět k plynným palivům. S vývojem karburátoru však tyto problémy ustoupily, benzín se začal bezpečně používat v praxi a zájem o jiná paliva ustoupil do pozadí.

O vodík znovu začal být zájem až s nástupem vesmírných programů, díky jeho vysokému poměru energie k hmotnosti. V kapalném stavu sloužil jako palivo v misích Apollo, Skylab, Viking a Voyager. [24]

4.1 VLASTNOSTI VODÍKU

4.1.1 ŠIROKÉ PÁSMO MOŽNÉHO ZAPÁLENÍ

V porovnání s ostatními palivy lze vodík zapálit v širokém pásmu poměrů směsi a paliva. To znamená, že má vodík značnou výhodu, jelikož může pracovat i s chudým poměrem směsi. Chudá směs je taková, kde je množství paliva menší, než je potřebné teoretické, stechiometrické nebo chemicky ideální množství. To je důvodem, proč je poněkud jednoduché rozjet motor na vodík.

Obecně je lepší spotřeba a kompletnější spalovací reakce, pokud motor funguje na chudší směsi. Také finální spalovací teplota je většinou nižší, což snižuje množství emisí jako oxid dusičitý. Nevýhodou je, že s chudší směsí zároveň klesá výkon.

4.1.2 NÍZKÁ ZÁŽEHOVÁ ENERGIE

Množství energie potřebné k zapálení vodíku je 0,02 mJ, což je až desetkrát nižší než u benzínových motorů. To umožňuje vodíku zapalovat chudší směsi a používat méně výkonné svíčky. Nevýhodou ovšem je, že horké plyny a horké oblasti ve válci mohou způsobit zážeh a vyvolat tak předčasné spalování a zpětný ráz. Zamezení tomuto problému je jedna z největších konstrukčních výzev vodíkového motoru.

4.1.3 MALÁ VZDÁLENOST VYHASNUTÍ

Vzdálenost vyhasnutí je taková vzdálenost od stěny válce, ve které zaniká plamen. Vodík má tuto vzdálenost menší než benzín. Hasící vzdálenost plamene vodíku je 0,6 mm od stěny válce, zatímco vzdálenost benzínu je 2 mm. To znamená, že je obtížnější uhasit vodíkový plamen. To

může také zvýšit tendenci k zpětným rázům, jelikož plamen snáze pronikne ne zcela zavřeným sacím ventilem.

4.1.4 VYSOKÁ SAMOZÁPALNÁ TEPLOTA

Vodík má poměrně vysokou teplotu samovznícení. Ta hraje roli při stlačení vodíko-vzduchové směsi. Tato teplota je hlavním faktorem pro určení kompresního poměru, použitelného v motoru.

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1}$$

Kde: T_2 = finální teplota

T_1 = počáteční teplota

$\frac{V_1}{V_2}$ = kompresní poměr

κ = poissonova konstanta

Konečná teplota nesmí přesáhnout teplotu samovznícení, tudíž konečná teplota je limitována kompresním poměrem. Vysoká teplota samovznícení vodíku (536 °C) umožňuje vyšší kompresní poměr než u benzínu (cca 260 °C). Vyšší kompresní poměr souvisí s termální účinností. Na druhou stranu je obtížné zapálit vodík kompresním zážehem nebo v dieslové konfiguraci.

4.1.5 VYSOKÁ RYCHLOST PLAMENE

Plamen vodíku má mnohonásobně vyšší rychlost šíření plamene (296 cm/s pro vodík a 42 cm/s pro benzín). To vede k rychlejšímu zažehnutí a lepšímu využití tlaku produkovaného plamenem. To znamená, že se vodíkové motory více blíží termodynamicky ideálnímu cyklu. S chudší směsí však tato rychlost výrazně klesá.

4.1.6 VYSOKÁ DIFUZIVITA

Difuzivita je schopnost rozptýlit se ve vzduchu. Vysoká difuzivita je výhodou ze dvou důvodů. Zaprvé napomáhá vytvořit jednotnou směs paliva a vzduchu a za druhé, pokud by mělo dojít k úniku vodíku z nádrže, plyn se rychle rozptýlí do takové míry, kdy již nehrozí jeho vznícení.

4.1.7 NÍZKÁ HUSTOTA

Vodík má nízkou hustotu a to způsobuje, že ve válci zabírá velký prostor, který by byl jinak zaujat oxidem uhličitým. V benzínovém motoru palivo zaujímá pouze asi 2 % objemu, zatímco ve vodíkovém asi 29 % (při stechiometrickém poměru 34,2:1). To snižuje hustotu energie směsi a tím i výkon. Tento problém je řešen různými způsoby vstřikování paliva či celé směsi, které budou vysvětleny dále.

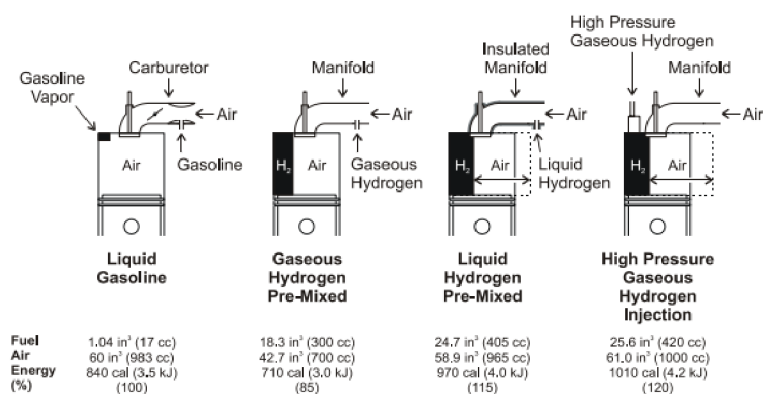
4.2 POMĚR VZDUCHU A PALIVA

Teoretický neboli stechiometrický poměr hoření vodíku a kyslíku je 2:1, to znamená, že potřebujeme dva moly vodíku na jeden mol kyslíku, aby proběhlo kompletní hoření. Jelikož se ale ve vodíkových motorech nepoužívá jako kyslík nýbrž vzduch, je nutné jej zahrnout do

výpočtů. Vzduch je tvořen z 78 % dusíkem, 21 % kyslíkem a 1 % tvoří zbytkové látky. Stechiometrický neboli chemicky správný hmotnostní poměr vzduchu a paliva pro kompletní hoření je 34:1. Neboli aby nastalo dokonalé hoření, je třeba 34 kg vzduchu na 1 kg vodíku. To je mnohem více než poměr 14:1, který je platný pro benzín.

Jelikož je vodík za běžných podmínek plyn, rozplyne se do prostoru mnohem rychleji než benzín, což v praxi znamená, že méně spalovacího prostoru zaujímá vzduch. Za stochiometrických podmínek zaujímá vodík okolo 30 % spalovací komory, zatímco benzín jen 1 až 2 %. Následující schéma znázorňuje objemy a obsahy energie pro benzín a různé aplikace vodíku.

V závislosti na metodě vpravení vodíku o komory může být výkon o 15 % menší či o 20 % větší v porovnání s benzínovým motorem. Tyto hodnoty ovšem platí pro stochiometrické spalování. Vodík lze však spalovat až do poměru 180:1.



Obrázek 13 Schéma prostoru, zújatého vzduchem a palivem [24]

4.3 PŘEDČASNÝ ZÁŽEH

Primárním problémem vodíkových motorů, na rozdíl od ostatních motorů s vnitřním spalováním, je předčasný zážeh, a to hlavně kvůli nízké energii potřebné k zážehu, širokému pásmu hořlavosti a nízké vzdálenosti vyhasnutí. Předčasný zážeh nastává, je-li směs vzduchu a paliva zažehnuta jinak než zapalovací svíčkou a způsobuje neefektivní běh motoru či zpětný ráz, při kterém plamen putuje skrz sací ventil do palivových rozvodů.

Bylo provedeno několik studií za účelem zjistit, co způsobuje předčasný zážeh ve vodíkových motorech. Výsledky ukazují, že mohou být způsobeny horkými oblastmi ve spalovací komoře, jako jsou zapalovací svíčka či výfukový ventil. Jiné studie naznačují, že ke zpětnému rázu dochází v případě překrytí otevření sacího a výfukového ventilu.

Jako řešení těchto problémů se nabízí změna designu vstřikovacího systému nebo termální ředění, kdy se recirkuluje 25 až 30 % výfukového plynu, čímž se sníží teplota hoření, ale i výkon. Nejeefektivnější je však změnit design motoru, zejména spalovací komoru a chladicí systém.

4.4 ZÁŽEHOVÉ SYSTÉMY

Díky nízké zážehové energii vodíku je snadné jej zapálit a může být užito klasických zážehových systémů jako při benzínu. Při chudé směsi (poměr vzduch palivo 130:1 až 180:1)

je rychlost plamene značně snížena a nevhodnější je systém s dvěma zapalovacími svíčkami. Systém zapalování svíčky v každé horní úvrati válce není vhodný, funguje sice dobře u benzínových motorů, kde je jednoduchým a levným řešením, avšak u vodíkových motorů je zdrojem předčasného zážehu.

Zapalovací svíčky vodíkových motorů by neměly mít platinové špičky, jelikož platina působí na vodík jako katalyzátor a vodík je oxidován přítomným vzduchem.

4.5 TERMÁLNÍ ÚČINNOST

Teoretická termodynamická účinnost motoru s Ottovým cyklem je založena na kompresním poměru motoru a specifického poměru tepel paliva jak je zřejmé z následující rovnice:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1}}$$

Kde: $\frac{V_1}{V_2}$ = kompresní poměr

κ = poissonova konstanta

η_t = teoretická termální účinnost

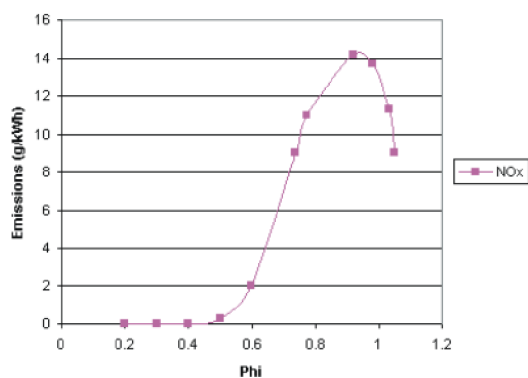
Čím vyšší stupeň komprese anebo také poměr specifických tepel, tím vyšší termodynamická účinnost. Poměr specifického tepla se odvíjí od molekulární struktury paliva. Čím jednodušší je molekulární struktura, tím vyšší poměr specifického tepla. Vodík ($\kappa=1,4$) má mnohem jednodušší molekulární strukturu než benzín ($\kappa=1,1$).

Vodík má zpravidla proti benzínovým motorům 15–25% výhodu v účinnosti. [25]

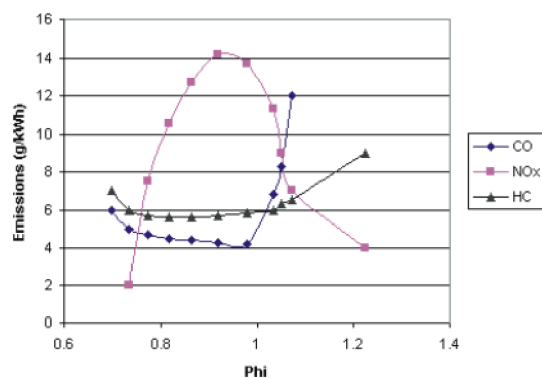
4.6 EMISE

Hoření vodíku s kyslíkem produkuje pouze vodu, nicméně spalování vodíku a vzduchu také vytváří emise oxidů dusíku. Množství oxidů dusíku vytvořených během hoření závisí na poměru vzduchu a paliva, kompresním poměru, rychlosti motoru, časování zážehu a na tom, zda probíhá termální ředění.

Kromě oxidů dusíku mohou být ve výfukových plynech přítomny i stopy CO či CO₂, a to kvůli spalování oleje ve spalovací komoře. Tyto stopy jsou však ve srovnání s emisemi dusíku zanedbatelné. Následující dva grafy zobrazují množství vyprodukovaných emisí v závislosti na ϕ pro vodíkový (vlevo) a benzínový motor (vpravo).



Obrázek 15 Emise vodíkového motoru v závislosti na ϕ [24]

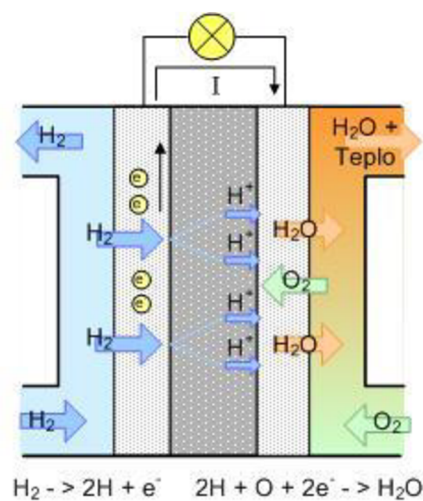


Obrázek 14 Emise benzínového motoru v závislosti na ϕ [24]

ϕ je poměr stechiometricky dokonalého poměru palivo-vzduch se skutečným poměrem palivo-vzduch směsi, která je v konkrétním případě používána. Nabývá tedy hodnot nula a jedna včetně.

5 PALIVOVÉ ČLÁNKY

Palivový článek je elektrochemický článek, který přeměňuje energii paliva a oxidantu na elektrickou energii redoxní reakcí. První takový článek vyvinul William Grove roku 1838. Jeho komerční využití přišlo až v roce 1932, kdy Francis Thomas Bacon vytvořil vodíkovo-kyslíkový článek, který NASA od 60. let minulého století užívala ve svých vesmírných programech pro napájení satelitů. Od té doby byly palivové články použity v mnoha různých aplikacích. Primární a záložní zdroje komerčních, průmyslových a residenčních budov nebo také ve vzdálených či těžko dostupných oblastech. Později byly také užívány pro napájení vozidel včetně aut, autobusů, lodí, motocyklů, ponorech a vysokozdvizných vozíků.



Obrázek 16 Schéma fungování palivového článku [26]

Existuje mnoho typů palivových článků, nicméně všechny sestávají z anody, katody a elektrolytu, jenž umožňuje iontům, často pozitivně nabitým vodíkovým protonům, pohybovat se mezi dvěma stranami palivového článku. Na anodě katalyzátor způsobuje, že palivo podléhá oxidaci, jež dělí palivo na kladně nabité ionty a elektrony. Ionty se pohybují od anody ke katodě skrze elektrolyt, zatímco elektrony tečou od anody ke katodě vnějším okruhem, produkující stejnosměrný elektrický proud. Na katodě způsobuje další katalyzátor, že spolu kladné ionty, elektrony a oxidační činidlo reagují za vzniku vody, případně jiných produktů. Názorně je tento proces zobrazen na následujícím obrázku.

Palivové články se rozdělují v závislosti na typu elektrolytu, jež užívají, a v závislosti na času, potřebném k začátku provozu, který se pohybuje od 1 sekundy až po 10 minut.

Soubor dvou elektrod a elektrolytu se nazývá palivová cela, palivový článek se nazývá uskupení několika palivových cel. Počet palivových cel v článku se odvíjí od požadovaného napětí a výkonu.

5.1.1 PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)

V prvních podobách takovýchto článků obsahoval protony propouštějící polymer (většinou nafion) roztok elektrolytu, který odděloval anodu a katodu. Tehdy takový článek nazýval Polymer electrolyte membrane fuel cell (palivová cela s polymerovou membránou jako elektrolytem), jelikož mechanismus prostupu protonů tehdy (70. léta 20. století) ještě nebyl dobře znám.

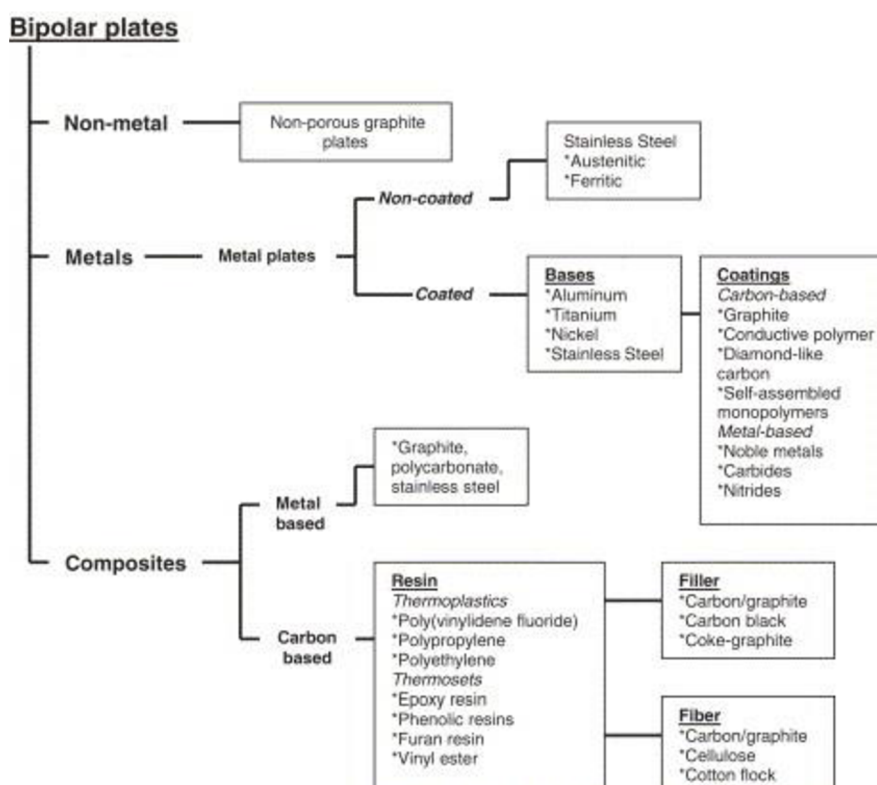
Na straně anody vodík prostupuje do anodového katalyzátoru, kde se později dělí na protony a elektrony. Tyto protony často reagují s oxidanty, což způsobuje tzv. mnohočetné protonové membrány. Protony prochází membránou ke katodě, ale elektrony jsou nuceny putovat vnějším okruhem, jelikož je membrána elektricky izolační. Na straně katodového katalyzátoru reagují molekuly kyslíku s elektrony, které sem doputovaly vnějším okruhem, a s protony a tvoří tak vodu.

Článek sestává z následujících komponent:

1. Bipolární desky
2. Elektrody
3. Katalyzátor
4. Membrána
5. další příslušenství jako těsnění či sběrače proudu

Bipolární desky váží 80 % hmotnosti a stojí až 45 % ceny článku. [27] Mají na starost důležité funkce, a sice distribuci paliva a oxidantu uvnitř cely, vyrovnávat množství vody, separovat jednotlivé cely v článku, odvádět proud z cely a vyrovnávat. Z tohoto hlediska jsou důležité fyzikální a chemické vlastnosti jako propustnost vodíku, odolnost proti korozi, elektrická a tepelná vodivost, a kompresní pevnost a hydrofóbnost.

Následující schéma ukazuje kategorizaci materiálů, jež je možno použít pro bipolární desky.



Obrázek 17 Rozdělení materiálů vhodných pro bipolární desky [27]

V současné době je nejvíce výzkumu věnováno kompozitům grafitu a kovům, obzvláště pak nerezové oceli. Grafit s sebou nese problém v oblasti malé vodivosti (20 S/cm, přičemž cíl je

100 S/cm), zatímco nepotažená nerezová ocel má stále problém s izolační povrchovou vrstvou. Náročnost výroby a ekonomická návratnost budou určujícími faktory, které rozhodnou o jejich aplikaci.

Dalším klíčovým článkem pro funkci soustavy je membrána. Ta musí propouštět pouze vodíkové kationty ale žádné elektrony, jelikož by to vedlo ke zkratu. Membrána taktéž nesmí propustit žádný plyn a zároveň musí být odolná proti silně reduktivnímu prostředí na katodě a oxidačnímu na anodě.

Pro štěpení molekuly vodíku se jako nejvhodnější katalyzátor osvědčila platina, jako relativně jednoduché řešení. Štěpení molekuly kyslíku je o něco složitější a způsobuje vysoké elektrické ztráty. V současné době nebyl pro tuto aplikaci vyvinut ideální katalyzátor, a proto se platina stále jeví jako nejlepší možnost.

Platina představuje největší výzvu v poli palivových článků. Jakožto omezený zdroj je velmi drahá a je hlavní limitující faktor pro uvedení palivových článků do běžného života. Novinkou ve světě katalyzátorů je úspěch profesora Matolína z Univerzity Karlovy, který se svým týmem vyvinul anodu, jež obsahuje jen kolem 6 g platiny na centimetr čtvereční, při zachování výkonu a ostatních parametrů. To je přibližně 50krát nižší množství, než je současný standard. Nyní se jeho tým zaměřuje na snížení obsahu platiny v katodě.

PEM článek je v současné době nejslibnějším typem článku pro mobilní aplikace, a to kvůli relativně nízkým provozním teplotám (okolo 100 °C) a kvůli jeho kompaktnosti. Nabývá účinnosti 60 % a v případě kogenerace, tj. využití odpadního tepla, až 80 %. [28]

5.1.2 SOLID ACID FUEL CELL (SAFC)

Neboli článek s kyselinou v pevném stavu je charakteristický tím, že používá pevnou kyselinu jako elektrolyt. Podobně jako PEM získávají elektřinu elektrochemickou konverzí plynů obsahujících vodík a kyslík na vodu. Operují v pásmu teplot mezi 200 a 300 °C.

Pevné kyseliny se, z chemického hlediska, nachází na pomezí solí a kyselin. Pevné kyseliny vhodné pro aplikaci v palivových článcích jsou ty, jež jsou založeny na skupinách kyslíkových aniontů (SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , SeO_4^{2-} , AsO_4^{3-}), spojeny vodíkovými vazbami a jejichž náboje jsou vyrovnány kationty (Cs^+ , Rb^+ , NH_4^+ , K^+). [26]

Při nízkých teplotách mají pevné kyseliny uspořádané molekulární struktury jako většina solí. Při zvýšených teplotách (150 °C pro CsHSO_4) podstupují některé kyseliny přechod k tzv. superprotonické struktuře, která navyšuje jejich vodivost o několik řádů. Tato vysoká vodivost umožňuje účinnost až 50 % s různými palivy.

První SAFC, vyvíjený kolem roku 2000, používal jako elektrolyt CsHSO_4 , nicméně tyto články tvořily vedlejší produkty, které degradovaly anodu a snižovaly tak výkon, a to již po mírném používání.

Nynější SAFC používají hydrogensíran cesný (CsH_2PO_4), který se ukázal být schopný fungovat po několik tisíc hodin. Při superprotonickém přechodu se jeho vodivost zvyšuje čtyřikrát. Dále se zjistilo, že je tato sloučenina schopna stabilně vydržet superprotonický přechod ve vlhké atmosféře a při střední teplotě 250 °C, což z ní dělá ideální elektrolyt pro palivový článek, jelikož je vlhké prostředí v článku nezbytné, aby nedošlo k dehydrataci a disociaci na sůl a vodní páru.

SAFC se nachází na pomezí chladných a horkých palivových článků. To znamená, že na jednu stranu využívají výhod horkých palivových článků, jejichž teploty se pohybují mezi 500 a 1000 °C, ale přitom nepotřebují speciální materiály, které by tyto teploty snášely. Zároveň je jejich systém jednodušší než chladných palivových článků. Další výhodou je, že nepotřebují extrémně čistá paliva, jelikož jsou odolné vůči nečistotám. Mohou také využívat konvenční paliva jako metanol, propan. I přes potenciální použití fosilních paliv je toto výhodou kvůli vyšší účinnosti, nižším hlukem a nižšími vibracemi, v porovnání se spalovacími motory.

Díky těmto výhodám jsou SAFC používány v lokalitách, kde by jiné typy článků byly nepraktické. Využívají se např. při těžbě ropy pro napájení vrtných hlav, čímž snižují potřebu pneumatických komponent, které vypouštějí metan a další skleníkové plyny do atmosféry. V současné době se vyvíjí aplikace, použitelná americkou armádou, která by za palivo měla lodní plynový olej či JP8. V roce 2014 byla vyvinuta toaleta, která za pomoci SAFC a solární energie, transformuje lidský odpad na hnojivo a vodík, který pak používá jako záložní zdroj energie.

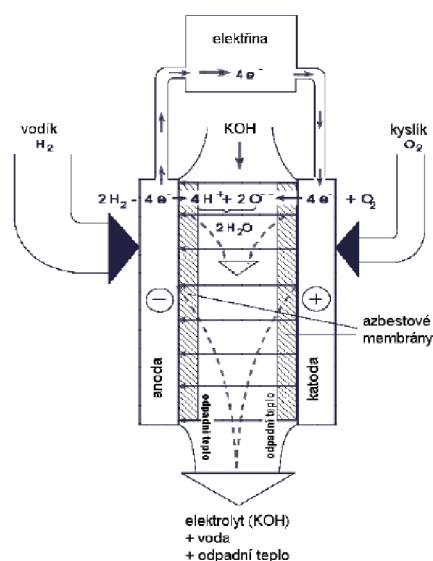
5.1.3 ALKALIN FUEL CELL (AFC)

Palivové články s alkalickým elektrolytem za sebou mají historicky nejdelší vývoj. První známý článek byl právě alkalického typu. Jeho výhodou je dobrý výkon ve srovnání s ostatními typy, díky aktivní kyslíkové kinetice elektrod, a široký rozsah možných katalyzátorů. Nevýhodou bývá potřeba velmi čistého paliva.

Určitá konstrukční řešení řeší vznikající teplo cirkulujícím elektrolytem a omezují možnost varu vody.

AFC pracující při teplotě kolem 260 °C má za elektrolyt 85% KOH, zatímco při nižších pracovních teplotách je použito 35÷50 procentního roztoku. KOH je upřednostňován zejména pro jeho vodivost, jež je z alkalických hydroxidů nejvyšší. Elektrolyt je fixován v matrici, která je většinou z azbestu, a jako katalyzátor lze použít celá škála prvků (nikl, stříbro, MeO, korund, vzácné kovy a oxidy kovů).

Obrázek 18 Schéma alkalického palivového článku [26]



Jako oxidant se používá buď čistý kyslík, nebo vzduch, ochuzený o CO_2 , jelikož by reagoval s KOH na K_2CO_3 , a tím by znehodnotil elektrolyt. Palivo bývá čistý vodík.

Účinnost AFC při použití čistého vodíku je 60 % a s využitím platinové katody dosahuje AFC vyšší účinnosti než PACF při vyšší proudové hustotě. [28]

5.1.4 PHOSPHORIC ACID FUEL CELL (PAFC)

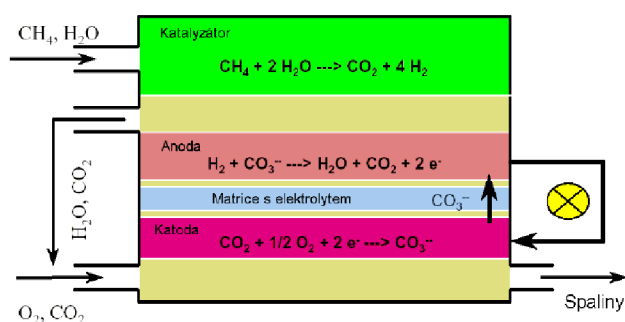
Neboli články s kyselinou fosforečnou jsou prozatím jediný komerčně používaný typ palivových článků. Dříve byla porézní vrstva elektrody tvořena PTFE (polytetrafluorethylenem), potaženým vrstvou platinové černě (drobné platinové částičky s velkým aktivním povrchem a porozitou). Tato aplikace vyžadovala přílišné množství platiny (9 mg na cm^2), a proto byla postupem let nahrazena grafitem s příměsí platiny, což snížilo její množství na současných $0,1 \text{ mg/cm}^2$ na anodě a $0,5 \text{ mg/cm}^2$ na katodě.

Běžnou pracovní teplotou je $200 \text{ }^\circ\text{C}$ a elektrolyt je tvořen 100% kyselinou fosforečnou (H_3PO_4), což minimalizuje parciální tlak vodních par a kyselina je tak stabilnější a je jednodušší udržet správný vodní režim. Matrixem pro fixaci elektrolytu bývá SiC . Ve velkých aplikacích s vysokým výkonem 11 MW překračuje vnitřní tlak 8 atm. Při nižších teplotách má kyselina fosforečná horší protonovou vodivost a problém CO jako katalytického jedu pro platinu je markantnější.

U PAFC je nutné zajistit odvod tepla, abychom se vyhnuli energetickým ztrátám. To je dosaženo chladicími kanálky, které jsou většinou umístěny za každou pátu celou článku. Pro chlazení se používá buď účinnější kapalina, anebo méně náročné a levnější chlazení vzduchem. Účinnost PAFC se pohybuje okolo 40 %, nicméně se dá nadále zvyšovat použitím odpadního tepla pro kogeneraci.

5.1.5 MOLTEN CARBONATE FUEL CELL (MCFC)

Palivové články s uhličitánovou taveninou se řadí mezi vysokoteplotní palivové články. Pracují při teplotě okolo $650 \text{ }^\circ\text{C}$, což je teplota dostatečná pro zajištění vodivosti uhličitánového elektrolytu, ale ne tak vysoká, aby nebylo možné použít levnější kovové součásti. Díky vysoké teplotě není zapotřebí katalyzátoru, čímž se výrazně snižuje potřeba drahých kovů jako např. platina. MCFC jsou vyvíjeny pro použití zemního a uhlého plynu.



Obrázek 19 Schéma MCFC článku [26]

Elektrolyt je tavenina obsahující 62 mol% Li_2CO_3 a 38 mol% K_2CO_3 fixovaná v matrici LiAlO_2 . Anoda bývá ze slitin niklu (Ni a Cr nebo Ni a Al) a katoda z NiO

Zásadní výhodou MCFC oproti jiným, nízko- a středněteplotním, typům palivových článků je vnitřní reformace paliva, což značně zjednodušuje palivový systém a zvyšuje elektrickou účinnost. Účinnost tohoto typu článku se pohybuje mezi 45 a 50 %, ale dá se navýšit připojením turbíny, která využívá odpadního tepla. [28]

Typ článku	Pracovní teplota [°C]	Účinnost [%]	Využití	Výhody	Nevýhody
PEM	80	60 80 při kogeneraci	Záložní zdroj Transport Přenosný zdroj	Nízká teplota Rychlý náběh Pevný elektrolyt redukuje korozi	Drahý katalyzátor Náchylný k nečistotám paliva
AFC	95 200	60	Vesmír Armáda	Levné komponenty	Citlivý na CO_2
PAFC	180 350	40	Distribuce zdrojů elektřiny	Nenáročný na čistotu paliva	Dlouhý náběh
MCFC	650 1180	45-50	Distribuce zdrojů elektřiny	Různá paliva Různé katalyzátory	Dlouhý náběh Nízká hustota energie
SOFC	850 1500	60	Záložní zdroj Distribuce zdrojů elektřiny	Různá paliva Různé katalyzátory Pevný elektrolyt	Vysoká teplota rozkládá komponenty článku Dlouhý náběh

Tabulka 1 Souhrn stěžejních dat pro různé typy palivových článků

6 VOZIDLA

Pro úspěšné zavedení vodíku, jako paliva, mezi širokou veřejnost je třeba širokopásmové výroby dostupných vozidel, která budou dávat koncovým zákazníkům smysl, ideálně pak i výhodu oproti ICEV.

6.1 AUTOMOBILY SE SPALOVACÍM MOTOREM NA VODÍK

Automobilů na vodíkový pohon je relativně dost (v řádu desítek). Zde zmíníme jen ty nejvýznamnější.

6.1.1 BMW HYDROGEN 7

Limitovaný model Hydrogen 7 byl vyráběn v letech 2005–2007. Byl založen na tradičním typu 7. řady E65 konkrétně modelu 760Li a používal stejný 6 litrový motor V12 jako jeho benzínový protějšek. Byl ale modifikován, aby byl schopen spalovat jak vodík, tak benzín. Bylo vyrobeno pouze 100 modelů, které byly propůjčeny prominentním osobám, aby tak BMW zviditelnilo vodíkovou technologii a rozšířilo její povědomí mezi veřejností. BMW tvrdilo, že se jednalo o první vodíkové auto na světě, připravené na sériovou výrobu.



Obrázek 20 BMW Hydrogen 7 [30]

I přesto kolem auta stále panují pochyby, a to zejména kvůli jeho vysoké spotřebě. Ta činí 13,9 l na 100km v případě benzínu a 50 l na 100 km v případě vodíku. Důvodem k tak velkému rozdílu spotřeb je, že hustota energie benzínu je 34,6 MJ/l, zatímco u tekutého vodíku je to jen 10,1 MJ/l. Vodík byl skladován ve 170litrové kryogenické nádrži při teplotě pod $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vypařováním rostl vnitřní tlak a nebyl-li vůz provozován po 17 hodin, nahromaděný plyn byl bezpečně vypuštěn. Auto mělo dojezd 200 km na vodík a 480 km na benzín. Systém zapalování sestával z kombinace zážehového a vznětového spalování. I díky tomu motor konkuroval s účinností 42 % těm nejlepším turbodieslovým motorům. [29]

6.1.2 BMW H2R

V roce 2004 postavilo BMW závodní auto k překonání rekordů na poli aut poháněných vodíkem. Má také 6litrový motor V12, jenž mu dodává výkon 173 kW a umožňuje maximální rychlost 301 km/h. Zrychlení z 0 na 100 km/h dosahovalo za 6 sekund. [31]



Obrázek 21 BMW H2R [31]

Auto mělo za úkol zviditelnit vodíkovou technologii a dokázat, že je, co se výkonnostních stránek týče, na stejné či dokonce vyšší úrovni než konvenční pohony, což se mu povedlo dosažením několika rekordů. Praktické zavedení vodíku do všedního života však výrazně neovlivnilo.

6.1.3 MAZDA RX-8 HYDROGEN RE

Mazda roku 2003 postavila svůj v pořadí pátý model, který byl vybaven motorem na vodík. Zajímavostí je, že Mazda nepoužívá klasický pístový motor, ale Wanklův rotační motor. Mazda má dvě nádrže a je schopna spalovat, tak jako BMW 7, benzín a vodík. Na rozdíl od BMW však Mazda nepoužila pro uskladnění vodíku zkapalnění, nýbrž má nádrž z hliníku a nanovláken, která má kapacitu 110 litrů a při tlaku 350 bar pojme 2,4 kg vodíku.



Obrázek 22 Mazda RX-8 Hydrogen RE [32]

Benzínová nádrž má kapacitu 61 litrů a auto je schopno dojezdu 100 km na vodík a 549 km na benzín. V případě vodíku má auto nižší výkon (80 kW oproti 154 kW u benzínu), ale i přesto je schopno jet maximální rychlostí 170 km/h při spalování vodíku. [32]

6.2 AUTOMOBILY S PALIVOVÝMI ČLÁNKY

Mnohé automobilky se v minulosti snažily přinést veřejnosti automobil, jenž by využil výhod vodíku. Valným přínosem pro trh však byl až vývoj japonských automobilek Toyota a Honda a jihokorejského Hyundai.

6.2.1 TOYOTA MIRAI

Toyota začala vývoj auta, poháněného palivovými články, již roku 1992. Prototyp Toyota FCV-R byl představen roku 2011 a již 3 roky na to, tedy roku 2014, Toyota odhalila svůj model Mirai na auto show v Los Angeles. Za první tři roky se prodalo přes 5 tisíc kusů, více než polovina z toho na americkém trhu.

Mirai je čtyřdveřový sedan. Je poháněn elektrickým trakčním motorem o výkonu 113 kW, což mu dovoluje zrychlení z 0 na 97 km/h za 9 sekund. Pojme 5 kg paliva při tlaku 70 MPa, díky tomu má jeho první generace dojezd 502 km. Jeho druhá generace, model 2020, má dojezd 643 km.



Obrázek 24 Toyota Mirai 1. generace [33]



Obrázek 23 Toyota Mirai 2. generace [33]

Prodeje začaly v prosinci 2014 v Japonsku na ceně ¥ 6 700 000 (tedy asi 57 400 dolarů). Nový model 2020 začíná na ceně 64 000 dolarů.

6.2.2 HONDA CLARITY

Clarity není označení pro konkrétní model, ale spíše pro rodinu aut, která využívají nekonvenčních zdrojů energie pro pohon. První prototyp, Honda FCX Concept, byl vytvořen roku 2006 a již 2 roky později v listopadu 2008 byl představen v Japonsku. Auta však nebyla prodávána, nýbrž pronajímána, a sice po deseti kusech v Japonsku a Evropě a 48 kusů v USA. Důvodem byl nízký počet čerpacích stanic, vybavených vodíkem.



Obrázek 25 Honda Clarity 1. generace [34]



Obrázek 26 Honda Clarity 2. generace [34]

Model FCX Clarity byl vybaven palivovými články o výkonu 100 kW. Stejný výkon měl i jeho elektromotor. Byl vybaven regenerativním brzděním, jež akumulovalo energii do samostatné baterie. Kapacita jeho nádrže byla 4,1 kg.

Od roku 2016 Honda vyrábí druhou generaci vozů Clarity a to jak v BEV tak v FCEV a hybridním PHEV provedení. BEV a PHEV prodává, FCEV jsou stále zatím na leasing. První generace FCEV měla dojezd 390 km. Ta druhá jej zvýšila na 589 km, čímž předčila bateriovou verzi (143 km) i PHEV verzi (547 km).

6.2.3 HYUNDAI IX35 FCEV

Vývoj modelu začal již v roce 2005 prvním prototypem Hyundai Tuscon. Ten disponoval elektromotorem o výkonu 80 kW a 152 litrovou nádrží na vodík. [35] Auto mělo dojezd 300 km a maximální rychlost 150 km/h.



Obrázek 28 Hyundai Tuscon FCEV [35]



Obrázek 27 Hyundai ix35 FCEV [35]

Model vyráběný od roku 2012 má motor o výkonu 100 kW a nádrž, která je při 700 barech schopna pojmout 5,6 kg vodíku. To auto stačí na 594 km dojezdu.

6.2.4 HYUNDAI NEXO

Nexo je nástupcem modelu Tuscon. Má dojezd 666 km. [36] Nexo má tři oddělené nádrže na vodík s celkovou kapacitou 156 litrů a pojme 6,3 kg vodíku. Na rozdíl od jeho předchůdce, který použil platformu klasického Tusconu, na niž byla namontována opora pro nádrže, Nexo bylo prvoplánově stavěno jako FCEV. Díky tomu má lehčí konstrukci, vyšší dojezd a silnější pohon (elektromotor o výkonu 120 kW).



Obrázek 29 Hyundai Nexo [36]

7 ENERGETICKÁ NÁROČNOST VYUŽITÍ VODÍKU

V předchozích kapitolách jsme se zaměřili na způsoby výroby, uskladnění a samotné využití vodíku v dopravním prostředku. V této kapitole shrneme výše uvedené poznatky a zaměříme se na dva nejpravděpodobnější scénáře využití vodíku v porovnání s konvenčními palivy. V každé z fází budou v potaz brána optimistická řešení, tedy ta s největší účinností, bez ohledu na současný stav nebo běžnou praxi. Ani v jednom z následujících případů nebudeme započítávat ztráty spojené s přepravou paliv, jelikož jsou dány primárně vzdáleností. Je však možné předpokládat, že v případě vodíku by byly ztráty menší než při převozu produktů ropy. Vodík by se totiž produkoval lokálně v rámci země, zatímco ropu je nutno převážet často přes celé kontinenty. Tím by vodík částečně vyrovnal ztráty spojené s uskladněním (kompresí či zkapalněním), které se na ropné produkty nevztahují.

7.1 TANK TO WHEEL

V následující části bude rozebrána účinnost vodíku z nádrže ke kolům v různých modelových příkladech.

7.1.1 SPALOVACÍ MOTOR S KAPALNÝM VODÍKEM

Jak je uvedeno v 4. kapitole, spalování kapalného vodíku má vůči spalování benzínu o 15 % vyšší výkon. Pro tuto aplikaci je ale třeba vodík zkapalnit, což je náročnější než jeho stlačení. Zkapalnění plynu vyžaduje 40 % energie v něm obsažené.

Účinnost spalovacího motoru se odvíjí především z účinnosti používaného termického cyklu. U vodíkového motoru je tato účinnost v nejlepším případě 40 %.

$$\eta = 0,60 \cdot 0,42 = 0,25$$

Po zohlednění těchto předpokladů činí celková účinnost 25 %.

7.1.2 SPALOVACÍ MOTOR SE STLAČENÝM VODÍKEM

Stlačení vodíku vyžaduje 13 % celkové energie v něm obsažené. Z toho vyplývá energetická účinnost 87 %.

Spalování stlačeného vodíku má v závislosti na způsobu vstřikování o 15 % nižší (vstřikována předpřipravená směs) nebo o 20 % vyšší (vstřikování samotného vodíku pod vysokým tlakem) výkon vůči spalování benzínu. Energetická účinnost je tedy srovnatelná s použitím kapalného vodíku a je maximálně 42 %.

$$\eta = 0,87 \cdot 0,42 = 0,37$$

Po zohlednění těchto předpokladů činí celková účinnost 37 %.

Jak lze vidět, komprese je vhodnějším řešením skladování vodíku ve spojení se spalovacím vodíkovým motorem.

7.1.3 VYUŽITÍ V FCEV

Zkapalněný vodík nemá v palivovém článku oproti stlačenému žádnou výhodu, naopak palivové články využívají plynný vodík, což by znamenalo, že by vozidlo muselo obsahovat

mechanismus pro kontrolované vypařování vodíku. Pro FCEV je tedy ideální systém skladování komprese, jejíž energetická účinnost je 87 %.

Ze všech existujících palivových článků se jako jediný vhodný pro mobilní použití naskytuje PEM článek. Jeho nízká provozní teplota a rychlá reakce na změny požadavků produkce energie, v porovnání s ostatními typy článků, z něj činí jasnou volbu pro použití ve vozidlech. Jak jsme si uvedli dříve PEM článek má maximální účinnost 80 %. To se ale týká případů, kdy je použito odpadní teplo ke kogeneraci. V případě automobilů je však kogenerace z konstrukčního hlediska nereálná. Nelze tak počítat s výhodami, spojenými s odpadním teplem, naopak je možné, že část energie bude spotřebována chlazením článků. Pro články aplikované v dopravě je tedy uvažována účinnost 60 %.

Samotné články však vůz nepohání a je tedy nutné započítat ztráty spojené s elektromotorem, jenž články nabíjí. V tomto případě se reálné hodnoty účinnosti elektromotoru pohybují okolo 95 %.

$$\eta = 0,87 \cdot 0,60 \cdot 0,95 = 0,50$$

Po započítání všech těchto faktorů činí celková účinnost 50 %.

7.1.4 SROVNÁNÍ S KONVENČNÍMI PALIVY

Účinnost konvenčních paliv od nádrže ke kolům je dána spalovacím motorem vozidla. Benzínové motory mají účinnost, jež se pohybuje v nejlepších případech kolem 35 %. V případě nafty je tato hodnota o něco vyšší, a sice 45 %.

7.1.5 SROVNÁNÍ S BEV

V rozvodné síti teče proud střídavý, zatímco baterie potřebují k uložení náboj proud stejnosměrný. Jako referenční hodnota je zde brána nabíječka Tesla s maximální účinností 92 %.

Baterie použité v dnešních elektromobilech podléhají negativním faktorům, jako např. únik elektrolytu. I díky tomu mají účinnost přibližně 90 %.

Účinnost elektromotoru činí 95 %.

$$\eta = 0,92 \cdot 0,90 \cdot 0,95 = 0,79$$

Celková účinnost BEV od baterie ke kolům je tedy 79 % či menší.

7.2 WELL TO TANK

7.2.1 VÝROBA BENZÍNU

Rafrinace ropy pro výrobu benzínu je proces, který má v průměru 85% energetickou účinnost. Samotná těžba ropy vyžaduje energii. Energetická účinnost těžby ropy se liší od povahy ložiska a v současné době se pohybuje mezi 83 % (ropné písky) a 95 % (klasické vrty), v průměru tedy 90 %.

$$\eta = 0,90 \cdot 0,85 = 0,77$$

Po započítání všech těchto faktorů činí celková účinnost 77 %.

7.2.2 VÝROBA NAFTY

Získávání nafty z ropy je o něco efektivnější než v případě benzínu, energetická účinnost rafinace je 93 %. Účinnost těžby je stejná jako v případě benzínu 90 %.

$$\eta = 0,90 \cdot 0,93 = 0,83$$

Po započítání všech těchto faktorů činí celková účinnost 83 %.

7.2.3 VÝROBA ELEKTRINY PRO BEV

Většina globálně produkovávané elektrické energie pochází z tepelných elektráren, především pak z uhelných a jaderných. Účinnost jaderných elektráren se pohybuje kolem 37 %.

Je nutné také započítat ztráty v rozvodné síti. Ty v sobě zahrnují transformaci na vysoké napětí, přenos v síti, zpětnou transformaci na nízké napětí a rozvod k spotřebiteli domů či ke komerční nabíječce. Ty se pohybují mezi 8 a 15 %, průměrně tedy bude uvažováno 11 %. Energetická účinnost tedy činí 89 %.

$$\eta = 0,37 \cdot 0,89 = 0,33$$

Po započítání všech těchto faktorů činí celková účinnost 33 %.

7.2.4 VÝROBA VODÍKU

Jak bylo ukázáno v kapitole 2, nejúčinnějším způsobem produkce vodíku je parní reformování a elektrolyza v PEM článcích. Parní reformování je nejčastější způsob výroby vodíku, technologie je tedy dostupná již dnes. Manifest prof. Ad van Wijka počítá s dočasnou produkcí vodíku parním reformováním pro pokrytí jeho rostoucích potřeb do té doby, než bude produkce zcela pokryta obnovitelnými zdroji. V zájmu snížení uhlíkové stopy však není možné jej dlouhodobě získávat z fosilních paliv. Elektrolyza v PEM článcích je tedy zatím jediným známým způsobem obnovitelné výroby vodíku s dostatečnou účinností. Bez ohledu na zvolený způsob je účinnost procesu 80 %.

Ekologie vodíku tedy přímo závisí na způsobu získávání energie pro elektrolyzu. Účinnost získávání této energie je, stejně jako předchozím případě pro BEV, 37 %.

$$\eta = 0,37 \cdot 0,80 = 0,30$$

Po započítání všech těchto faktorů činí celková účinnost 30 %.

7.3 WELL TO WHEEL

Well to wheel označuje účinnost od zdroje ke kolům. Tedy celkovou účinnost, se kterou se energie přemění z primárního zdroje na mechanický pohyb.

7.3.1 HICEV

Nadále bude uvažován pouze model, využívající kompresi, jelikož model využívající zkapalněný vodík není energeticky výhodný, jak bylo ukázáno dříve. WTT účinnost je 30 % a TTW účinnost je tedy 37 %.

$$\eta = 0,30 \cdot 0,37 = 0,11$$

Výsledná účinnost tedy činí 11 %.

7.3.2 FCEV

Energetická účinnost samotného FCEV je 50 %. Po započtení energetické náročnosti spojené s výrobou vodíku (30 %), vychází celková účinnost následovně:

$$\eta = 0,50 \cdot 0,30 = 0,15$$

Výsledná účinnost tedy činí 15 %.

7.3.3 BEV

Energetická účinnost samotného BEV je 79 %. Po započtení energetické náročnosti spojené s výrobou elektrické energie a její distribuce (33 %), vychází celková účinnost následovně:

$$\eta = 0,79 \cdot 0,33 = 0,26$$

Výsledná účinnost tedy činí 26 %.

7.3.4 ICEV

BENZÍN

Energetická účinnost samotného ICEV je 35 %. Po započtení energetické náročnosti spojené s těžbou ropy a její rafinací (77 %), vychází celková účinnost následovně:

$$\eta = 0,35 \cdot 0,77 = 0,27$$

Výsledná účinnost tedy činí 27 %.

DIESEL

Energetická účinnost samotného ICEV je 45 %. Po započtení energetické náročnosti spojené s těžbou ropy a její rafinací (83 %), vychází celková účinnost následovně:

$$\eta = 0,45 \cdot 0,83 = 0,37$$

Výsledná účinnost tedy činí 37 %.

7.4 NAHRAZENÍ ROPY VODÍKEM

V následujícím modelu bude ukázáno kolik vodíku, potažmo elektřiny, je nutné vyrobit, aby na českých silnicích vůbec nejezdila auta na benzín a diesel.

V roce 2018 bylo v ČR spotřebováno 2126 mld. litrů benzínu a 5877 mld. litrů motorové nafty. Započtením těchto hodnot, následně vynásobených energií, obsaženou v jednom litru, a následným součinem s účinností samotných vozidel lze zjistit, kolik energie se skutečně přeměnilo v mechanický pohyb. V jednom litru benzínu je obsaženo 34,2 MJ potenciální energie a v motorové naftě je 38,6 MJ na litr. Za účinnost benzínového motoru bude brána hodnota 35 % a za účinnost dieselového motoru hodnota 45 %.

$$\begin{aligned}
 E_{\text{kinetická}} &= E_{\text{benzín}} \cdot m_{\text{benzín}} \cdot \eta_{\text{benzín}} + E_{\text{diesel}} \cdot m_{\text{diesel}} \cdot \eta_{\text{diesel}} = \\
 &= 34,2 \cdot 10^6 \cdot 2126 \cdot 10^9 \cdot 0,35 + 38,6 \cdot 10^6 \cdot 5877 \cdot 10^9 \cdot 0,45 = \\
 E_{\text{kinetická}} &= 1,275 \cdot 10^{20} \text{ [J]}
 \end{aligned}$$

Kde: E ... energie [J]

m ... množství [l]

η ... účinnost [-]

Reverzním výpočtem, v němž je započítána celková účinnost vodíku well-to-wheel, lze zjistit kolik energie je potřeba k výrobě množství vodíku, které by energeticky odpovídalo množství spotřebovaného benzínu a nafty.

$$E_{\text{elektrická}} = \frac{E_{\text{kinetická}}}{\eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{PEM}} \cdot \eta_{\text{komprese}} \cdot \eta_{\text{Elektrolýza}}} = \frac{1,275 \cdot 10^{20}}{0,95 \cdot 0,6 \cdot 0,87 \cdot 0,8}$$

$$E_{\text{elektrická}} = 3,214 \cdot 10^{20} \text{ [J]}$$

Získaná energie ve Wh odpovídá:

$$3,1875 \cdot 10^{20} \text{ [J]} = 8,925 \cdot 10^{16} \text{ [Wh]} = 8,925 \cdot 10^4 \text{ [TWh]}$$

Z výpočtů tedy plyne, že aby byla ČR schopna nahradit roční energetické pokryté benzinem a naftou vodíkem, musela by být schopna vyprodukovat 88 541 TWh elektrické energie, ideálně pak z obnovitelných zdrojů. Pro srovnání obě jaderné elektrárny za rok 2018 dohromady vyprodukovaly 29,92 TWh.

Následující výpočet ukazuje, kolik energie je potřeba k produkci 6 kg vodíku, což je běžná kapacita nádrže dnešních FCEV, která poskytuje srovnatelný dojezd jako ICEV.

$$E_{\text{nádrž}} = \frac{E_{\text{kinetická}} \cdot m}{\eta_{\text{TTW}} \cdot \eta_{\text{PEM}}} = \frac{1,275 \cdot 10^{20} \cdot 6}{0,87 \cdot 0,8} = 1120 \text{ [MJ]} = 311,1 \text{ [kWh]}$$

Pokud by producent vodíku prodával palivo za běžnou cenu elektrické energie (4,76 za 1 kWh v roce 2020), kterou k výrobě spotřeboval, lze cenu za natankování jedné nádrže vypočítat takto:

$$E_{\text{nádrž}} \cdot \text{cena}_{\text{kWh}} = 311,1 \cdot 4,76 = 1480,8 \text{ [Kč]}$$

Tato suma se v porovnání s cenou jedné nádrže konvenčního paliva nezdá příliš drahá, nejsou ovšem započítány náklady s výstavbou infrastruktury, systému palivových článků pro produkci vodíku, ani náklady spojené s výstavbou nových elektráren, které by tvořily největší podíl. Dále výpočet vychází z předpokladu, že by si producent nepřipočítal marži.

8 BUDOUCÍ VÝHLEDY

Do prvního pololetí roku 2020 má vzniknout první veřejná čerpací stanice na vodík v rámci sítě Benzina v Řeži u Prahy. Dalších pět by mělo vzniknout do roku 2023. Ministerstvo průmyslu a obchodu předpokládá, že bude vystavena dostatečná infrastruktura tak, aby do roku 2030 v ČR jezdilo mezi 60 a 90 tisíci FCEV. [45]

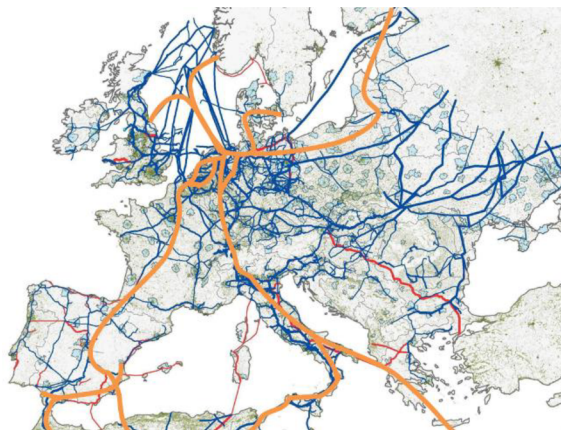
Toyota oznámila svůj záměr začít prodávat novou generaci vozů Mirai jakmile pro ně bude v Česku vybudovaná infrastruktura.

V Ústí nad Labem mají do roku 2021 jezdit autobusy městské hromadné dopravy na vodík. Ten je zde však vyráběn jako vedlejší produkt místní chemičky. [46]

Olympijské hry v Tokiu měly být příležitostí prezentovat 100 vodíkových autobusů, které firma Toyota speciálně postavila pro tuto příležitost. Autobusy mají zajistit veškerou přepravu návštěvníků mezi různými stanovišti olympiády. [47] Dále poskytuje 500 vozů Mirai pro pořadatele. Projekt slouží i jako testování v menším měřítku pro zimní pekingskou olympiádu, kde by stejnou funkci mělo plnit 1000 autobusů na vodík.

Dle profesora Ad van Wijka z delftské univerzity by do roku 2050 mělo být 50 % energetické spotřeby pokryto vodíkem. Evropská elektrická síť nevystačí 100% elektrifikaci v dopravě. V Německu byla v roce 2018 vyplývána energie z větrných elektráren v hodnotě 1 miliardy eur díky nedostatečné přenosové kapacitě elektrické sítě. [48] Elektrická energie má navíc svá omezení zvláště v přepravě na velké vzdálenosti. Vodík však taková omezení nemá, může navíc využívat stávající plynovou rozvodnou síť. Autor tvrdí, že pokud by se realizace provedla rychle a ve velkém měřítku, vodík by mohl být cenově stejně dostupný jako zemní plyn. Vodík by tak mohl v energetice kompletně nahradit uhlovodíky. Evropa má navíc potenciál být společně s USA a Japonskem průkopníkem a leadrem na trhu s vodíkem.

Výstavba nových vodičů napětí vyžaduje dlouhodobé plánování a je nákladná. Plynové potrubí je však cenově mnohem výhodnější. Za stejnou investici lze plynovým potrubím rozvést 10 až 20krát více energie než elektrickým vedením. Evropská rozvodná síť plynu je navíc na dobré úrovni. Např. v Nizozemí by byly třeba malé či žádné úpravy potrubí pro přechod ze zemního plynu na vodík. Následující obrázek ukazuje existující plynovou síť (modrá) a vodíkový hlavní uzel (oranžová), navržený delftskou univerzitou.



Obrázek 30 Stávající rozvodná síť zemního plynu (modrá), hlavní vodíkový uzel (oranžová) [48]

Na rostoucí poptávku energie je v dnešní době odpovědí solární a větrná energie, která je často nejlevnějším řešením v případě vhodně zvolené lokace. Elektřina s sebou nese omezení v oblasti vysokotepeelného vytápění a v chemickém průmyslu. Vodík tak spojuje obnovitelnou energii s průmyslovými procesy vyžadujícími velké množství tepla, výrobou oceli či vytápěním prostor. Manifest počítá s dočasnou produkcí „modrého“ vodíku (vodíku vyrobeného z fosilních paliv se systémem zachycení CO₂), a to pro rychlejší zavedení vodíku na trh a vstupu do povědomí veřejnosti do té doby, než bude produkce udržitelného vodíku soběstačná.

ZÁVĚR

Vodík, jako palivo pro transport, najde v budoucnosti široké uplatnění tak, jako se dostalo např. benzínu. Problémy se znečišťováním životního prostředí se stanou významnějšími, a pokud by to nebylo pro společnost dostatečnou motivací, snižující se zásoby ropy a její zvyšující se cena budou.

Z výše uvedených poznatků lze vyvodit, že nejsmysluplnějším modelem vodíkového hospodářství je model takový, kde bude vodík vyráběn pomocí PEM článků s kogenerací, využívající zbytkové teplo, na jednom místě u jaderné elektrárny či jiného zdroje s velkými přebytky energie. Vodík je následně potrubím – ať již existujícím plynovým či nově postaveným speciálně pro vodík – distribuován do sítě čerpacích stanic, stlačen do tlakové nádrže a nakonec bude vodík využit v palivovém článku pro pohon vozidla.

Rychlost nástupu vodíkových vozidel se bude odvíjet od pokročilosti výzkumu, týkajícího se vodíku. V oblasti přechovávání vodíku jako paliva je stále nutný určitý pokrok tak, aby se dojezd vodíkových vozidel vyrovnal dojezdu klasických ICEV. Právě krátký dojezd je jedním z častých argumentů pro nepořízení FCEV. Tento argument je ale spíše záležitostí zvyku a pohodlí spotřebitelů. Mnohem zásadnějším faktorem bude vývoj palivových článků, jelikož po stránce účinnosti figuruje ve vodíkovém hospodářství dvakrát, a to při výrobě vodíku a při jeho následném využití pro opětovné získání elektrické energie ve vozidlech.

Pro zavedení vodíku jakožto udržitelného paliva bude zapotřebí více než jen iniciativy ze strany vlád. Dotace a výhody pro spotřebitele spojené s provozováním ekologických vozidel jsou sice kladnou motivací avšak jen pro zákazníky, kteří si vyšší pořizovací a provozní cenu FCEV mohou dovolit. Dokud se vodík nestane ekonomicky výhodným ekvivalentem konvenčních paliv, nedojde k velkoplošnému rozšíření FCEV, protože dotace v takové míře, aby FCEV konkurovala konvenčním vozům, nejsou pro stát ekonomicky výhodné. Stát se navíc bude muset v první řadě zabývat vybudováním vodíkové infrastruktury, která nyní v České republice prakticky neexistuje. To je nákladná záležitost s dlouhodobou návratností. Bez infrastruktury nenajdou FCEV své uplatnění i kdyby měla sebelepší dojezd či sebenížší spotřebu paliva.

Po zřízení všech těchto nutných předpokladů pro vodíkovou mobilitu (infrastruktura, lepší cenová dostupnost) je dalším faktorem, potřebným k jejímu zavedení, všeobecná informovanost občanů.

Dle názoru autora by se měl stát soustředit na dostavění či rozšíření jaderných elektráren tak, jak se o tom již dlouhou dobu uvažuje. Tím by vytvořilo zdroj čisté energie, z jejichž přebytků by tak následně bylo možné produkovat udržitelný vodík. Navíc by se tak snížila uhlíková stopa BEV, která jsou již v provozu, průmyslu a obecně celého státu. Následné vybudování infrastruktury by sice bylo nákladné, ale v případě, že by výroba vodíku byla pokryta jadernými elektrárnami, jež jsou z většiny ve vlastnictví státu, návratnost by byla rychlejší. S tím by do země automobilky začaly nabízet své FCEV a jejich rozšíření by tak bylo mnohem přirozenější a rychlejší.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] GHG emissions for vehicle operation. In: *Powerpulse.net* [online]. Německo: powerpulse.net, 2019 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://powerpulse.net/fraunhofer-ise-compared-greenhouse-gas-emissions-from-battery-and-hydrogen-fuel-cell-vehicles/printable>
- [2] European vehicle market statistics, 2018/2019. In: *The International Council on Clean Transportation* [online]. Berlín: International Council on Clean Transportation Europe, 2018, 12.5.2018 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Pocketbook_2018_Final_20190408.pdf
- [3] Electric Car Myth Buster — Well-To-Wheel Emissions [online]. USA: cleantechnica, 2018 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2018/02/19/electric-car-well-to-wheel-emissions-myth/>
- [4] Shades of Green. *Shrink That Footprint* [online]. USA: Shrink That Footprint, 2013 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <http://shrinkthatfootprint.com/wp-content/uploads/2013/02/Shades-of-Green-Full-Report.pdf>
- [5] Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives. In: *European Environment Agency* [online]. Copenhagen: European Environment Agency, 2018 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-from-life-cycle/at_download/file
- [6] Pollution studies cast doubt on China's electric-car policies. *Financial Times* [online]. internet: Financial Times, 2018 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.ft.com/content/6f55d4cc-58ed-11e8-bdb7-f6677d2e1ce8>
- [7] Příliš hlučný start elektromobilů. *Energetika*. ČR, 2019, 69(4), 206-209.
- [8] Nová studie opět dokládá, že velebení elektromobilů je nesmysl. Diesely jsou k životnímu prostředí šetrnější. *Auto.cz* [online]. ČR: Auto.cz, 2019 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/nova-studie-opet-doklada-ze-velebeni-elektromobilu-je-nesmysl-diesely-jsou-k-zivotnimu-prostredi-setrnejsi-129094>
- [9] Air Pollution Costs Global Economy Trillions Annually, World Bank Says. *Time* [online]. USA: Time, 2016 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://time.com/4484027/air-pollution-economic-toll-world-bank/>
- [10] Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives. In: *European Environment Agency* [online]. Copenhagen: European Environment Agency, 2018 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-from-life-cycle/at_download/file
- [11] Are Electric Cars Really Greener? *Youmatter* [online]. Francie: youmatter, 2018 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://youmatter.world/en/are-electric-cars-eco-friendly-and-zero-emission-vehicles-26440/>

- [12] Strategická výzkumná agenda rozvoje vodíkového hospodářství v ČR. In: *HYTEP* [online]. ČR: HYTEP, 2010 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/SVA_HYTEP.pdf
- [13] Elektřina: Víte, kdy spotřebováváme nejvíc? In: *Nazeleno.cz* [online]. ČR: nazeleno.cz, 2018 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/energie/energetika/elektrina-vite-kdy-spotrebovavame-nejvic.aspx>
- [14] Výroba vodíku parním reformováním. *Petroleum* [online]. ČR: petroleum, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>
- [15] Výroba vodíku parciální oxidací. *Petroleum.cz* [online]. ČR: petroleum.cz, 2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-44.aspx>
- [16] Hydrogen from biomass gasification. *IEA Bioenergy* [online]. Německo: IEA Bioenergy, 2018 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: http://task33.ieabioenergy.com/app/webroot/files/file/publications/Hydrogen/Wasserstoffs_tudie_IEA%20final.pdf
- [17] Elektrolýza vody. In: *Slideplayer* [online]. ČR: slideplayer, 2013 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://player.slideplayer.cz/10/2758583/data/images/img2.jpg>
- [18] TECHNOLOGIES FOR HYDROGEN PRODUCTION. *Netl.doe.gov* [online]. USA: netl.doe.gov, 2004 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/technologies-hydrogen>
- [19] Influencing factors of water electrolysis electrical efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, 16(6), 4257-4263.
- [20] Hydrogen storage: High-Pressure Gas Containment. *MRS Bulletin*. 2002, 27(9), 680-682.
- [21] DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record. *Energy.gov* [online]. USA: energy.gov, 2009 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf
- [22] Liquid-Hydrogen Technology for Vehicles. *MRS Bulletin*. 2002, 27(9), 684-686.
- [23] LH2-Tank system. In: *Researchgate* [online]. Portugalsko: researchgate, 2012 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: https://www.net/profile/Rahul_Krishna/publication/257924806/figure/fig2/AS:297514113748995@1447944300380/Liquid-hydrogen-storage-tank-system-horizontal-mounted-with-double-gasket-and-dual-seal.png
- [24] HYDROGEN USE IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES. *Energy.gov* [online]. USA: college of Desert, 2001 [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm03r0.pd

- [25] Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014, **39**(2), 1071-1085.
- [26] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články*. ČR: ČEZ, 2002.
- [27] Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2005, **30**(12), 1297-1302 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319905000935>
- [28] Comparison of Fuel Cell Technologies. *Www.energy.gov* [online]. USA: Office of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, 2011 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/pdfs/fc_comparison_ch_art.pdf
- [29] BMW HYDROGEN ENGINE REACHES TOP LEVEL EFFICIENCY. *Press.bmwgroup.com* [online]. USA: press.bmwgroup.com, 2009 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: https://www.press.bmwgroup.com/usa/article/detail/T0020216EN_US
- [30] BMW Hydrogen 7. In: *Hydrogen-motors.com* [online]. USA: hydrogen-motors.com, 2006 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <http://www.hydrogen-motors.com/bmw-hydrogen-7.html>
- [31] How the BMW H2R Works. In: *Auto.howstuffworks.com* [online]. USA: auto.howstuffworks.com, 2020 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/bmw-h2r3.htm>
- [32] NEWS RELEASES. *Newsroom.mazda.com* [online]. USA: newsroom.mazda.com, 2006 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://newsroom.mazda.com/en/publicity/release/2006/200602/060215.html>
- [33] Toyota Mirai. *Toyota* [online]. ČR: Toyota, 2015 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.toyota.cz/world-of-toyota/news/new-toyota-mirai#>
- [34] Clarity. In: *Honda.com* [online]. USA: honda.com, 2020 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://automobiles.honda.com/clarity-fuel-cell#>
- [35] Hyundai Tucson Hybrid FCEV (2005). In: *Hyundai.co.uk* [online]. UK: hyundai.co.uk, 2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.hyundai.co.uk/about-us/environment/hydrogen-fuel-cell>
- [36] The all-new NEXO. *Hyundai.com* [online]. EU, 2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.hyundai.com/eu/models/nexo.html#>
- [37] Oil For Electricity is More Efficient than Oil for Gas. *Smartcitiesdive* [online]. USA: smartcitiesdive, 2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.smartcitiesdive.com/ex/sustainablecitiescollective/oil-electricity-more-efficient-oil-gas/185046/>

- [38] The Energy Costs of Oil Production. *The World* [online]. GB: The World, 2012 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.pri.org/stories/2012-11-02/energy-costs-oil-production>
- [39] Who Has the World's Most Efficient Coal Power Plant Fleet? *Powermag.com* [online]. USA: powermag.com, 2017 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/who-has-the-worlds-most-efficient-coal-power-plant-fleet/>
- [40] How big are Power line losses? *Blog.se.com* [online]. Švédsko, 2013 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://blog.se.com/energy-management-energy-efficiency/2013/03/25/how-big-are-power-line-losses/>
- [41] Vývoj spotřeby pohonných hmot v ČR v roce 2018. *ČAPPO* [online]. ČR: ČAPPO, 2019 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.cappo.cz/info/vyvoj-spotreby-pohonných-hmot-v-cr-v-roce-2018>
- [42] Fuel Energy Density. *Ior.com* [online]. Rakousko: ior.com, 2019 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20100825042309/http://www.ior.com.au/ecflist.html>
- [43] Roční zpráva o provozu ES ČR 2018. In: *Eru.cz* [online]. ČR: eru.cz, 2018 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf
- [44] Cena elektřiny za kWh opět zdražila. V roce 2020 stojí 4,76 Kč. <https://www.elektrina.cz/> [online]. ČR: <https://www.elektrina.cz/>, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/cena-elektřiny-za-kwh-2020-cez-eon-pre-bohemia-centropol-a-dalsi>
- [45] První vodíková čerpací stanice vznikne v ČR do pololetí roku 2020. *Novinky.cz* [online]. ČR: novinky.cz, 2019 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/auto/clanek/prvni-vodikova-cerpaci-stance-vznikne-v-cr-do-pololeti-roku-2020-40299519>
- [46] Autobusy v Ústí budou jezdit na vodík. *Novinky.cz* [online]. ČR: novinky.cz, 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/domaci/clanek/autobusy-v-usti-budou-jezdit-na-vodik-40313516>
- [47] How Toyota's Olympic buses are fuelling its hydrogen dream. *Aljazeera.com* [online]. Katar: aljazeera.com, 2019 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.aljazeera.com/ajimpact/toyota-olympic-buses-fueling-hydrogen-dream-190918015942143.html>
- [48] 50% Hydrogen for Europe: a manifesto. *Energypost.eu* [online]. EU: energypost.eu, 2019 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://energypost.eu/50-hydrogen-for-europe-a-manifesto/>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AFC	Alkalinový palivový článek
BEV	Bateriový elektromobil
CO ₂ e	Uhlíkový ekvivalent
EM	Elektromobilita
EV	Elektromobil
FCEV	Elektromobil s palivovými články
ICE	Spalovací motor
MCFC	Palivový článek s roztaveným uhlíkem
PAFC	Palivový článek s kyselinou fosforečnou
PEMFC	Palivový článek s pevným elektrolyte propouštějícím protony
SAFC	Palivový článek s pevnou kyselinou jako elektrolytem
TTW	Z nádrže ke kolům
WTT	Od zdroje k nádrži
WTW	Od zdroje ke kolům