FAKULTA STROJNÍ TUL

Bakalářská práce

Vodík jako zdroj energie

Studijní program: B0715A270008 Strojírenství
Autor práce: **Petr Šmíd**
Vedoucí práce: Ing. Josef Popelka, Ph.D.
Katedra vozidel a motorů

Liberec 2025

FAKULTA STROJNÍ TUL

Zadání bakalářské práce

Vodík jako zdroj energie

Jméno a příjmení:	**Petr Šmíd**
Osobní číslo:	S21000118
Studijní program:	B0715A270008 Strojírenství
Zadávající katedra:	Katedra vozidel a motorů
Akademický rok:	2024/2025

Zásady pro vypracování:

1. V rešeršní části popište přehled současného stavu využití vodíku jako zdroje energie.
2. Porovnejte vybrané způsoby využití.
3. Popište výhody a nevýhody jednotlivých způsobů využití.
4. Cílem práce je využití výsledků pro další projekty VaV.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy: cca 40
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel: [zemní plyn CNG, ropný plyn LPG, biopaliva, etanol a metanol, elektřina, vodík]*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2003. ISBN 80-239-1602-5.
VLK, František. *Paliva a maziva motorových vozidel: [benzín, nafta, alternativní paliva, motorové oleje, převodové oleje]*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2006. ISBN 80-239-6461-5.
HEYWOOD, *John. Internal combastion Engine Fundamentals 2E*. MCGraw-Hill Education, 2018. ISBN 1260116107
Publikace veřejně přístupné. Výzkumné zprávy, závěrečné práce zpracované na TUL. Publikace v časopisech, sbornících z konferencí zabývající se alternativním palivem pro spalovací motory.

Vedoucí práce: Ing. Josef Popelka, Ph.D.
Katedra vozidel a motorů

Datum zadání práce: 4. listopadu 2024
Předpokládaný termín odevzdání: 4. listopadu 2025

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 30. října 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval/a samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom/a toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom/a povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom/a následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

16. května 2025 Petr Šmíd

Vodík jako zdroj energie

Abstrakt

Tato bakalářské práce se zaměřuje na využití vodíku jako zdroje energie. Hlavním záměrem práce je analyzovat a popsat aktuální stav využití vodíku pro energetické potřeby. Pozornost je věnována metodám uložení energie ve formě vodíku. Dále se zabývá skladováním a možnostem transportu různých forem vodíku. Práce se dále zabývá transformací chemické energie vodíku na energii elektrickou a tepelnou a popisuje různá uplatnění v praxi. Výstupem práce je porovnání vybraných způsobů využití a analýza jejich výhod a nevýhod.

Klíčová slova

Vodík, energie, palivové články, výroba vodíku, skladování vodíku, dekarbonizace, elektrolýza

Hydrogen as an energy source

Abstract

This bachelor's thesis focuses on the use of hydrogen as an energy source. The main purpose of the thesis is to analyze and describe the current state of hydrogen use for energy needs. Attention is paid to methods of storing energy in the form of hydrogen. It also deals with the storage and transport options of various forms of hydrogen. The thesis also deals with the transformation of the chemical energy of hydrogen into electrical and thermal energy and describes various applications in practice. The output of the thesis is a comparison of selected methods of use and an analysis of their advantages and disadvantages.

Keywords

Hydrogen, energy, fuel cells, hydrogen production, hydrogen storage, decarbonization, electrolysis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Josefu Popelkovi, Ph.D. za vedení práce.

Obsah

1 Úvod 11

2 Využití vodíku jako zdroje energie 12

2.1 Ukládání energie do vodíku 13

2.1.1 Plynný vodík 14

2.1.2 Kapalný vodík 16

2.1.3 Nosiče vodíku 16

2.2 Transport vodíku 18

2.2.1 Přeprava plynného vodíku 18

2.2.2 Přeprava kapalného vodíku 20

2.2.3 Přeprava nosičů vodíku 20

2.3 Palivové články 22

2.3.1 Palivový článek s protonovou výměnnou membránou 23

2.3.2 Alkalický palivový článek 24

2.3.3 Palivové články s kyselinou fosforečnou 24

2.3.4 Palivové články s roztavenými uhličitany 25

2.3.5 Palivové články s tuhými oxidy 26

3 Využití vodíku v dopravě 28

3.1 Systém pohonu 28

3.1.1 Spalovací vodíkový motor 28

3.1.2 Elektrovozidla využívající palivové články 29

3.2 Osobní a nákladní automobilová doprava 29

3.3 Veřejná doprava 30

3.3.1 Autobusy 30

3.3.2 Vlaky 30

3.3.3 Lodě 31

3.3.4 Letadla 32

4 Vojenské účely 33

5 Využití vodíku v energetice 34

5.1 Plynové trubíny 34

5.1.1 Spalování difuzním plamenem 34

5.1.2 Spalování s předem smíšeným plynem 34

5.2 Stacionární zařízení a plynové kotle 35

6 Výsledky a diskuse 36

6.1 Skladování vodíku 36

6.2 Transport Vodíku 36

6.3 Palivové články 37

6.4 Doprava 37

6.5 Vojenské účely 38

6.6 Energetika 38

7 Závěr 39

Použitá literatura 40

Seznam zkratek

Zkratka	Popis zkratky	Jednotky
PEMFC	Proton-exchange membrane fuel cell (Palivový článek s protonovou membránou)	
AFC	Alkaline fuel cell (Alkalický palivový článek)	
PAFC	Phosphoric acid fuel cell (Palivový článek s kyselinou fosforečnou)	
MCFC	Molten carbonate fuel cell (Palivový článek s roztavenými uhličitany)	
SOFC	Solid oxide fuel cell (Palivový článek s tuhými oxidy)	
FCEV	Fuel cell electric vehicle (Elektrické auto s palivovými články)	
NATO	The North Atlantic Tready Organization (Severoatlantická aliance)	

1 Úvod

Evropská unie si v rámci Pařížské dohody stanovila ambiciózní klimatické cíle, jejichž hlavním cílem je dosažení uhlíkové neutrality do roku 2050. Klíčovým nástrojem k naplnění těchto závazků je Evropská zelená dohoda, která je zaměřena na postupné snižování emisí skleníkových plynů, podporu rozvoje obnovitelných zdrojů energie a zvýšení jejich podílu na celkové energetické produkci. Cílem je udržet globální nárůst průměrné teploty maximálně na úrovni 1,5 °C ve srovnání s obdobím před průmyslovou revolucí.

Hlavním tématem této bakalářské práce je vodík jako zdroj energie. Žijeme v době, kdy je kladen důraz na ekologii, udržitelnost a dekarbonizaci životního prostředí. Jedním z nejdiskutovanějších a nejperspektivnějších řešení v této oblasti je vodík, který se díky svým vlastnostem jeví jako vhodný nosič energie pro budoucnost, především jako možná náhrada fosilních paliv.

Cílem této práce je zpracovat analýzu potenciálu vodíku jako zdroje energie, zhodnotit výhody a nevýhody jednotlivých technologií využití vodíku jako paliva a věnovat pozornost problematice jeho skladování, distribuce a infrastruktury. Součástí analýzy je rovněž posouzení uplatnitelnosti vodíku v různých sektorech, zejména v dopravě, průmyslu a energetice. Práce si klade za cíl zhodnotit technické a ekonomické výzvy, které je třeba překonat pro efektivní zavedení vodíkové ekonomiky, a zároveň nabídnout poznatky, které mohou být přínosné pro další výzkumné projekty v této oblasti.

V rámci tvorby bakalářské práce byla využita umělá inteligence, konkrétně ChatGPT. Sloužila jako nástroj k utřídění myšlenkových pochodů a k pochopení nejasností.

2 Využití vodíku jako zdroje energie

Vodík je nejjednodušší a nejlehčí prvek periodické soustavy prvků a zároveň nejrozšířenější prvek ve vesmíru. Charakterizovat vodík můžeme jako hořlavý, bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu. Ve směsi s kyslíkem tvoří výbušnou směs. Vodík má nejvyšší energetický obsah na jednotku hmotnosti (120 $MJ \cdot kg^{-1}$). Hustota vodíku za běžných podmínek je velmi nízká (zhruba 0,089 $kg \cdot m^{-3}$), což limituje celkovou objemovou hustotu energie a umožňuje skladovat pouze omezené množství vodíku na jednotku objemu. Zlepšení lze dosáhnout využitím ochlazováním na nízké teploty a použitím vysokých tlaků, ale za cenu zvýšených skladovacích nákladů. Elementární vodík se na Zemi sice vyskytuje, ale pouze výjimečně. Na Zemi se vodík nachází převážně ve sloučeninách. Je schopný tvořit sloučeniny se všemi prvky periodické soustavy prvků kromě vzácných plynů. Některé z těchto sloučenin umožňují uchovávání vodíku, který může následně být využit jako zdroj energie například metanol, amoniak, syntetický zemní plyn. [1, 2]

Potenciál vodíku jako zdroje energie je obrovský. Očekává se, že by se vodík mohl stát palivem budoucnosti a nahradit tak fosilní paliva jako hlavní zdroj energie. Přesto je aktuální stav vývoje teprve na začátku. V současné době se zhruba 96 % vodíku vyrábí z fosilních paliv. Při tomto procesu je ročně produkováno 220 milionů tun emisí CO_2. Nejvyužívanější metodou je parní reformace metanu. Jedná se o způsob výroby vodíku, kde vstupní surovinou je zemní plyn a vodní pára. Proces má vysokou uhlíkovou náročnost, během něhož dochází k značné emisi skleníkových plynů. Tento způsob výroby omezuje využití vodíku jako čistého zdroje energie. Abychom eliminovali znečistění ovzduší emisemi skleníkových plynů, je zapotřebí využívat pouze zdroj, který je možno vyrobit pomocí bezemisních a obnovitelných zdrojů energie. Příkladem takových zdrojů může být: solární energie, větrná energie, geotermální energie, vodní energie, energie z biomasy a jaderná energie. [3, 4]

Rozvoji vodíku v energetice i dopravě brání řada technologických a ekonomických problémů. Mezi největší překážky využívání vodíku jako zdroje energie patří skladování vodíku a nedostatek infrastruktury. Kvůli fyzikálním vlastnostem vodíku (velikost, objemová hustota, schopnost difuze) je nutné výrazně snížit jeho objem. K tomu se využívá stlačování nebo zkapalňování, které jsou energeticky a technologicky velmi náročné. Stlačování vodíku se spotřebuje asi 10-15 % energie, kterou vodík obsahuje. Na zkapalňování se dokonce využije 30-40 % energie uložené ve vodíku. Ke skladování se využívá masivních tlakových nádob. Nádoby jsou prostorově objemné, těžké, často vyrobené z kompozitních materiálů, a drahé. V současné době probíhá intenzivní výzkum na eliminaci problémů a rizik spojených s vodíkovou energií. [3, 4]

2.1 Ukládání energie do vodíku

Jednou z hlavních oblastí využití vodíku je akumulace energie. Pro tyto účely se využívá elektrická energie produkovaná obnovitelnými zdroji energie. Problematikou většiny obnovitelných zdrojů energie je, že podléhají aktuálnímu stavu přírodních podmínek. Proto se stává, že množství vyrobené energie kolísá a je proměnlivé. Jinými slovy nejsou stabilním zdrojem energie. Pokud nejsou přírodní podmínky pro výrobu elektrické energie příznivé, je potřeba aktuální výpadek elektrické energie zabezpečit ze záložních elektráren, které často využívají fosilní paliva. Na druhou stranu, pokud jsou přírodní podmínky dobré, může docházet k přetížení elektrické sítě. Stabilita elektrické sítě je klíčovým bodem. Z tohoto důvodu bylo třeba vymyslet způsob, jak vytvořenou energii z obnovitelných zdrojů transformovat a uchovat. Pro tyto účely se využívá elektrolýzy vody. [4, 5]

Elektrolýza vody je způsob výroby vodíku, kde dochází k rozkladu vody na vodík a kyslík s využitím energie z obnovitelných zdrojů a probíhá v zařízení nazvaném elektrolyzér. Nejvyužívanější formy elektrolýzy vody jsou alkalická elektrolýza a elektrolýza s protonovou výměnnou membránou. [4–6]

Alkalická elektrolýza vody je snadný a dostupný způsob výroby vodíku. V rámci elektrolýzy se využívají vodné roztoky hydroxidů draselného nebo sodného, usnadňují rozklad vody. Článek je tvořen dvěma elektrodami, katodou a anodou. Elektrický proud probíhá směrem od katody k anodě. Na katodě probíhá redukce vody, čímž se uvolňuje plynný vodík a vznikají hydroxidové anionty, které samovolně přecházejí k anodě. Hydroxidové anionty se poté oxidují na povrchu anody za vzniku kyslíku, který bublá a uvolňuje elektrony, které uzavírají elektrický obvod. Dosahuje účinnosti 60-70 %. [7]

Elektrolýza s protonovou membránou je metoda rozkladu vody na vodík a kyslík, stejně jako alkalická elektrolýza. Na anodě dochází k oxidaci vody na kyslík, dále vnikají protony a elektrony. Protony přecházejí přes membránu ke katodě, kde se redukují za vzniku vodíku. Elektrolytem je pevná polymerní membrána, která je propustná pouze pro protony. Membrána odděluje prostor a zabraňuje míchání plynů (vodíku a kyslíku). Dosahuje účinnosti 65-75%. [8]

Výroba vodíku pomocí elektrolýzy představuje aktuálně minoritní podíl vyrobeného vodíku. Obrovskou výhodou tohoto procesu je vysoká kvalita připraveného vodíku, vysoká čistota. Dalším benefitem je, že pro výrobu není potřeba fosilních paliv, stačí pouze elektrická energie, která může pocházet z obnovitelných zdrojů.[9]

2.1.1 Plynný vodík

Hustota vodíku za běžných podmínek je velmi nízká (zhruba 0,089 $kg \cdot m^{-3}$), což umožňuje skladovat pouze omezené množství vodíku na jednotku objemu s využitím vysokých tlaků je možné dosáhnout lepších výsledků, ale za cenu vysokých skladovacích nákladů. Přesto stlačování vodíku patří mezi nejsnadnější systémy skladování. Stlačený vodík je v současné době nejvíce využíván v dopravě ve vozidlech s palivovými články a v energetice jako způsob ukládání přebytečné energie z obnovitelných zdrojů energie pro pozdější využití. Osobní automobily poháněné palivovými články využívají stlačený vodík při tlaku 700 barů, zatímco v autobusech se používá tlak 350 barů. Při 700 barech je hustota vodíku 39,22 $kg \cdot m^{-3}$. Při tlaku 350 barů dosahuje hustota hodnotu 23,32 $kg \cdot m^{-3}$. Pro skladování plynného vodíku lze dále využít kryokompresi, u které se využívá tlaku 200 barů a teploty 100 K a dosahuje hustoty až 70 $kg \cdot m^{-3}$. [1, 2, 10, 11]

Pro skladování stlačeného vodíku při tlaku mezi 200-700 bary se využívají vysokotlaké láhve. Láhve se odlišují konstrukčním materiálem, designem a velikostí v závislosti na požadovaných podmínkách použití. Láhve typu I se vyrábějí z pevných kovových materiálů, nejčastěji z oceli nebo hliníku. Láhve typu II se skládají z kovového jádra obaleného kompozitním materiálem z uhlíkových nebo skleněných vláken. Láhve typu III disponují kovovou vložkou a kompozitní vrstvou materiálu za účelem odlehčení. Láhve typu IV jsou vyrobeny z polymerní vložky s vysokou hustotou a kompozitního materiálu. Pro účely vysokokapacitního skladování mohou být využity buď nadzemní ocelové nádrže, anebo podzemní prostory. Nadzemní vysokotlaké zásobníky bývají vyrobeny z nízkouhlíkových ocelí bez použití svaru. Náklady na výrobu takových nádrží a kompresi vodíku bývají vysoké. V podzemí se vodík zpravidla ukládá do dutin vzniklých těžbou soli v solných dolech nebo do jeskyních systémů po těžbě ropy a zemního plynu. Stlačený vodík je možné skladovat ve skleněných mikrokuličkách o rozměrech v řádech mikrometrů. Pro uvolnění vodíku je vyžadována teplota v rozmezí 200-300 °C, protože za běžných podmínek se vodík uvolňuje pomalu. [1, 2, 10–12]

V **tab. 1** je uveden obecný přehled pro skladování stlačeného vodíku a porovnání.

Tab. 1 Skladování vodíku v plynné formě

Forma	**Stlačený vodík na 350 barů**	**Stlačený vodík na 700 barů**	**Kryostlačený vodík**
Tlak (bar)	350	700	250-350
Teplota (°C)	Teplota okolí	Teplota okolí	-40 až -253
Objemová hustota ($kg \cdot m^{-3}$)	23-24	39-42	60-70
Energetická hustota ($kWh \cdot m^{-3}$)	792	1386	2310
Energetické náklady na stlačení (% energie vodíku)	7-8	10-15	20-30
Výhody	Spotřebuje méně energie na stlačení, menší náklady skladování	Uložení většího množství energie	Nejlepší poměr energie vztažený k objemu nádrže
Nevýhody	Uloží malé množství vodíku na stejný objem nádrže	Vyšší pořizovací a provozní náklady	Náročná a drahá technologie, spotřebuje velké množství energie na stlačení
Využití	Autobusy, nákladní automobily	Osobní automobily	Aktuálně probíhá výzkum možných uplatnění

2.1.2 Kapalný vodík

Kapalný vodík je jednou z metod skladování vodíku jako zdroje energie v kapalném stavu. Teplota varu vodíku je za běžného tlaku rovna -253 °C. V této formě má vodík až dvojnásobně vyšší hustotu (70,85 $kg \cdot m^{-3}$) oproti stlačenému plynnému vodíku. Tato metoda je ovšem finančně a energeticky náročná. Proces zkapalnění vodíku spotřebuje až 35 % energie obsažené ve vodíku pouze na jeho ochlazení. Během skladování kapalného vodíku dochází ke ztrátám energie způsobených odpařováním části vodíku vlivem okolního tepla. Denně se může odpařit až 3 % vodíku. Zásobníky na kapalný vodík jsou vytvořeny z materiálů odolávajících velmi nízkým teplotám a zároveň, zajištujících bezpečný provoz s těkavým a hořlavým plynem. Běžným znakem těchto zásobníků je dvojitá stěna. Mezi stěnami se nachází vakuum, které má výrazně omezit přenos tepla z okolí. Pro zvýšení izolačních vlastností je tento prostor vyplněn izolačním materiálem. Na povrchu nádrže se nachází ochranný nátěr, který má za účel odrážet sluneční záření a tím snížit ohřev. Kapalný vodík je využíván v oblastech, kde je kladen důraz na vysokou hustotu energie v kombinaci s nízkou hmotností. Nejčastěji se využívá v kosmonautice jako palivo pro raketové motory. V letectví probíhá testování vodíku jako alternativního zdroje energie pro bezemisní letadla. Další oblastí využití je silniční doprava. Některá vozidla využívají kapalný vodík jako palivo v palivových článcích, nicméně uchovávání tohoto typu vodíku v malém množství zapříčiňuje velké ztráty, proto se častěji se využívá stlačeného vodíku v plynné formě. V energetice se využívá jako nosič energie pro pozdější využití. [1, 2, 13]

2.1.3 Nosiče vodíku

Možností pro uchovávání vodíku v pevné formě nabízení kovové hydridy. Jedná se o sloučeniny vodíku s kovy a slitinami kovů, které vznikají disociací molekul vodíku na povrchu a difundují do struktury materiálu. Tvorba hydridů je exotermická reakce, tudíž se při vzniku vytváří tepelná energie. Pro získání vodíku z hydridů je nutné zajistit stejné množství energie, které uniklo při vzniku. Reverzní reakce docílíme snížením tlaku nebo zvýšením teploty. Kovové hydridy umožňují uložení vyšších koncentrací vodíku, než je tomu u komprese a zkapalňování. Zároveň se pro skladování využívají nižší tlaky a teploty, což hydridy tvoří bezpečnější a jednodušší na provoz. Nevýhodou je pomalá kinetika hydrogenace a dehydrogenace za vyžití vysokých teplot a možnost vzniku nežádoucích plynů. Zlepšení těchto vlastností můžeme dosáhnout redukcí velikosti částic, zmenšením velikosti krystalových zrn, nanostrukturalizací a přidáním katalyzátorů a legur. Rozdrcením nebo vytvořením defektů v krystalech lze vytvořit větší povrchovou plochu a tím pádem docílit vyšší kapacity a rychlosti

adsorpce. Další metodou uložení vodíku v pevném stavu jsou porézní materiály na bázi uhlíku, zeolity a kovové organické struktury. V **tab. 2** je přehled hydridů s největším potenciálem využití pro skladování vodíku. [2, 13]

Pro skladování vodíku v kapalné formě lze využít organické sloučeniny vodíku nebo anorganické sloučeniny vodíku a dusíku. Mezi organické sloučeniny, pro ukládání vodíkové energie se řadí například: metanol, etanol, kyselina mravenčí. Mezi nejčastěji využívané anorganické nosiče energie vodíku patří amoniak a hydrazin. [12]

Nevýhodou ukládání vodíku ve formě nosičů je požadavek dodání energie pro uvolnění vodíků ze sloučenin. To snižuje celkovou energetickou účinnost nosičů.

Tab. 2 Ukládání vodíku v hydridech [2]

Hydrid kovu	**Kapacita vodíku (hm. %)**	**Desorbční teplota (°C)**	**Desorbční entalpie ($kJ \cdot mol^{-1}$ (H_2))**
MgH_2	7,6	> 300	75
Mg_2NiH_4	3,59	> 280	65
Mg_2FeH_{12}	5,5	> 300	77,6
$FeTiH_2$	1,89	> 30	28
$LaNi_5H_6$	1,4	> 100	31
MgH_2-$LiAlH_4$	9,4	> 250	45
MgH_2-$NaAlH_4$	7,6	> 175	Není uvedeno
MgH_2-$LiBH_4$	11,4	> 350	45
$LiAlH_4$	10,6 / 7,9*	> 160	5,8
$NaAlH_4$	7,4 / 5,6*	> 185	41
$LiBH_4$	18,5 / 13,5*	> 380	67
$LiNH_2$-LiH	10,4 / 5,5*	> 180	44
$Mg(NH_2)_2$-LiH	5,6	> 150	54

Pozn. Hydridy jsou schopné reverzibilně uvolnit maximálně hodnotu s *.

2.2 Transport vodíku

Zásadním prvkem pro rozvoj vodíkové energie je přeprava vodíku. Vodík je nutné přepravovat z místa výroby do místa skladování a distribuce. K přepravování jednotlivých forem vodíku se využívají různé technologie uchovávání a transportu. V **tab. 4** na str. 19 je uvedeno porovnání metod transportu pro všechny formy vodíku.

2.2.1 Přeprava plynného vodíku

První běžně využívanou formou transportu vodíku je přeprava vodíku v plynné formě. Vysoká hořlavost a nízká zápalná energie vyžadují dodržování přísných bezpečnostních opatření a pravidel pro manipulaci, distribuci a skladování. Tato metoda je v současné době nejvyužívanější pro svou dostupnost a efektivitu. Před transportem je nezbytné vodík stlačit. Existují různé metody stlačování vodíku, jejich porovnání je k dispozici v **tab. 3**. Aktuálně probíhá výzkum jejich testování v praxi. Stlačený vodík se ukládá do speciálních trubkových návěsů a vysokotlakých lahví. K přepravě se využívá silniční, železniční nebo lodní doprava podle potřeb přepravovaných objemů. Další možností přepravy stlačeného vodíku jsou plynovody. Vodík je možné tímto způsobem přepravovat na velké vzdálenosti. Rozvoji transportu vodíku potrubí brání několik skutečností. Vodík způsobuje takzvané vodíkové křehnutí materiálů, což je degradace kovových materiálů působením vodíku. Z tohoto důvodu se pro stavbu potrubí musí využít materiály kompatibilní s vodíkem. K odolným materiálům vůči vodíkovému křehnutí se řadí slitiny na bázi niklu, austenitické nerezové oceli a hliníkové slitiny. Povrchové úpravy a ochranné povlaky dokážou částečně eliminovat pronikání vodíku do materiálu a zabránit tak nebezpečí křehnutí. Alternativně se místo kovových materiálů využívají polymerové kompozitní materiály. Nečistoty obsažené ve vodíku a v potrubí jsou schopné křehnutí materiálů zvyšovat. Proto je třeba dbát na vysokou čistotu přepravovaného vodíku. Dále hrozí únik vodíku netěsnostmi ve spojích, kvůli jeho velikosti molekuly. Je nutné zajistit systém pro detekci unikání vodíku z potrubí. Největším problémem je v aktuální době nedostatečná kapacita potrubí umožňující přenos pouze čistého vodíku na velké vzdálenosti z místa výroby a skladování do míst odběrů a distribuce. Současné plynovody umožňují přenos vodíku ve směsi se zemním plynem, a to pouze v omezeném množství. [12, 14]

Tab. 3 Technologie komprese vodíku a jejich porovnání [12]

Technologie komprese	Rozsah průtoků	Celkové náklady	Výhody	Nevýhody
Pístový kompresor	Od nejnižších po nejvyšší	Nízké	Vysoká spolehlivost Použitelnost při různých úrovních tlaku	Vysoké náklady na údržbu Hluk a vibrace
Membránový kompresor	Od nejnižších po nejvyšší	Střední	Snížené riziko znečištění a úniku Vhodné pro aplikace v malém měřítku	Nižší průtoky Omezený tlakový rozsah
Radiální kompresor	Vysoké	Vysoké	Zvýšené průtoky Vysoká účinnost Vhodné pro rozsáhlé aplikace	Složitá konstrukce Vyžaduje pečlivé vyvážení Citlivost na změny složení plynu
Iontový kapalinový pístový kompresor	Nízké až střední	Vysoké	Bezkontaktní provoz Téměř konstantní teplotní komprese Nižší spotřeba energie Minimální opotřebení	Nově vznikající technologie Omezená dostupnost na trhu Vyžaduje přesný výběr iontových kapalin Potřeba dodatečného tepla
Elektrochemický vodíkový kompresor	Nízké až střední	Vysoké	Výborná účinnost Žádné pohyblivé součásti Vysoký tlak	Složitá konstrukce Nákladná kvůli katalyzátorům a membránám Náchylný k nečistotám v plynném vodíku

2.2.2 Přeprava kapalného vodíku

Další metodou transportu vodíku je přeprava v kapalné formě. Jak již bylo řečeno, teplota zkapalnění vodíku je -253 °C. Zkapalňování je velmi náročný proces uchování vodíku, navíc spotřebuje obrovské množství energie. Výhodou oproti metodě stlačování je vyšší objemová hustota, proto je možné v kapalné formě přepravovat větší množství vodíku. Posun ve vývoji zkapalňování by mohl snížit energetickou náročnost procesu a ušetřit finance. Porovnání metod zkapalňování je uvedeno v **tab. 5**. Po zkapalnění se vodík skladuje ve dvojstěnných kryogenních nádržích se silnou izolací, aby se zabránilo tepelné výměně. Trendem v izolačních materiálech je aerogel vyráběný z oxidu křemičitého (tzv. silica aerogel). Využívá se k izolování mezi vnitřní a vnější stěnou nádrže. Předností aerogelu je minimální hmotnost a odolnost vůči extrémním teplotám. K převozu se opět může využít silniční, lodní tak i železniční doprava. [12, 14]

2.2.3 Přeprava nosičů vodíku

Vodíkové nosiče umožňují bezpečné a účinné skladování vodíku pro přepravu. Skladování nosičů nevyžaduje vysoké tlaky, ani kryogenní teploty. Některé nosiče energie, například amoniak a uhlovodíky lze přepravovat pomocí již vybudovaných potrubí. To znamená výrazné finanční zvýhodnění. Pro přepravu ostatních se využívá klasická nákladní doprava. Uvolnění vodíku ze sloučenin vyžaduje dodatečnou energii. [12, 14]

Tab. 4 Srovnání přepravních možností [12]

Technologie přepravy	Výhody	Nevýhody
Vysokotlaké nádrže	Jednoduché Flexibilní	Omezená kapacita Bezpečnostní rizika z důvodu vysokého tlaku
Potrubí	Vysoká kapacita Efektivita přepravy Spolehlivost	Vysoká počáteční investice Omezená infrastruktura Možné úniky a sabotáže
Přeprava kapalin	Vysoký energetický obsah Využívaná technologie	Kryogenní skladování Vysoké energetické náklady
Přeprava nosičů	Dobrá manipulace Snadná přeprava Jednoduché skladování	Složité chemické procesy Vysoká spotřeba energie

Tab. 5 Technologie pro zkapalnění vodíku [12]

Technologie Zkapalnění	Princip fungování	Technologická obtížnost	Výhody	Nevýhody
Hampson-Lindeův cyklus	Joulův–Thomsonův jev	Nízká	Snadný design Jednoduchá údržba a obsluha	Nízká účinnost Vysoká spotřeba energie
Claudeův cyklus	Expanzní turbína	Mírná	Vysoká účinnost Vysoká spolehlivost	Složitější design Značné počáteční náklady
Jouleův–Braytonův cyklus	Plynové chlazení	Vysoká	Vysoká účinnost Minimální spotřeba energie	Složitý design Vysoké počáteční investice
Magnetické chlazení	Magnetokalorický jev	Vysoká	Nevyužívá tradičních chladiv Vysoká účinnost	Složitý design Vysoké počáteční investice
Termoakustické chlazení	Chlazení vyvolané zvukovými vlnami	Mírná	Ekologický Nevyužívá tradičních chladiv	Nižší účinnost Složitější design
Cyklické chlazení směsí	Optimalizovaná směs chladiva	Vysoká	Vysoká účinnost Nízká spotřeba energie	Složitý design Vysoké počáteční investice

2.3 Palivové články

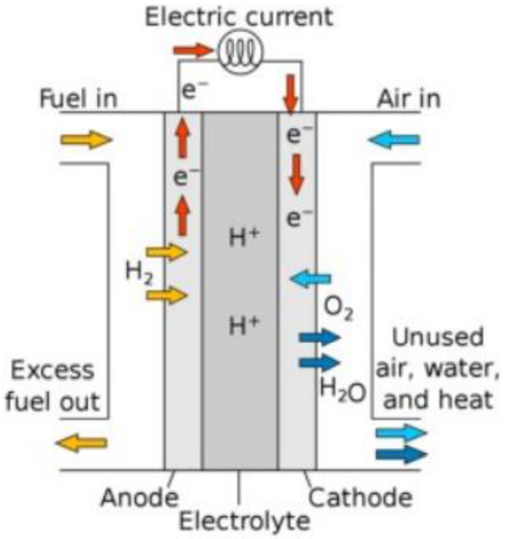
Technologie palivových článků se jeví jako vhodná metoda nahrazení současných spalovacích motorů. Palivové články umožňují transformaci chemické energie obsažené ve vodíku nebo jiných palivech na elektrickou energii s vysokou účinností a bez produkce emisí. Principem palivových článků je přívod paliva na anodu, zde dochází k rozkladu paliva na kationty a elektrony. Elektrony putují přes elektrický obvod ke katodě a vytvářejí elektrický proud. Kationty prostupují elektrolytem ke katodě. Zde probíhá reakce s kyslíkem a elektrony a vzniká voda. Jednotlivé palivové články poskytují relativní nízké napětí a výkon. Výkonnost palivových článků se zvyšuje prostřednictvím modulárního uspořádání, což znamená řazení jednotlivých článků do větších celků. [15]

Disponují poměrně vysokou účinností při výrobě elektřiny. V kombinaci s využitím tepelné energie dosahují dokonce až 90 % potenciální energie paliva. Palivové články jsou při provozu velmi tiché, během chodu nevznikají žádné vibrace. Dalšími přednostmi je dlouhá životnost palivového článku a možnost rychlého doplnění paliva. Palivové články lze dimenzovat podle potřeb od malých mobilních zařízení až po velké energetické systémy.[16]

Hlavní nevýhodou palivových článků je vysoká pořizovací cena, která je stále dražší než bateriové systémy nebo spalovací motory. Mimo samotný palivový článek se do pořizovací ceny nemalou měrou započítávají náklady na pořízení tlakových nádrží. V současnosti rozvoji brání nedostatečná infrastruktura. Mimo velká města platí nedostatek plnících stanic, vysoké náklady a složité bezpečnostní podmínky brání výstavbě nových stanic. Započítáním veškerých nákladů spojených se skladováním a transportem není tato metoda konkurenceschopná oproti fosilním palivům. Posledním negativem je bezpečnostní riziko spojené s úniku vodíku.[16]

2.3.1 Palivový článek s protonovou výměnnou membránou

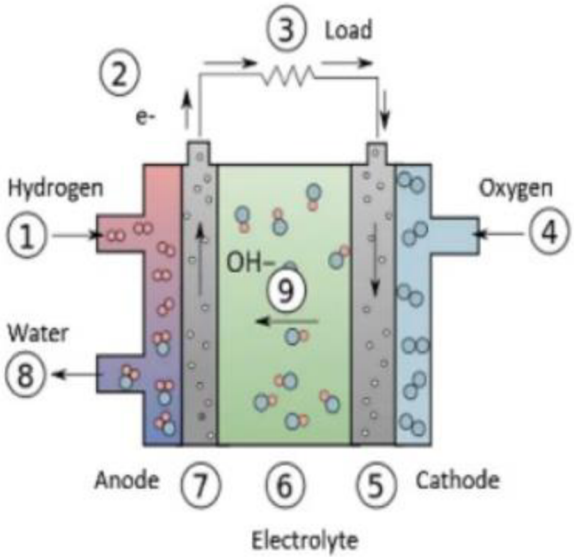
Palivový článek s protonovou výměnou membránou (PEMFC) je jedním z nejčastěji používaných nízkoteplotních palivových článků. Skládá se z polymerové membrány umožňující prostup vodíkových iontů a dvou uhlíkových elektrod, na kterých je nanesena platina, která slouží jako katalyzátor k urychlení rozkladu vodíku. Vodík je přiváděn do anody, kde dochází k rozdělení molekul vodíku na protony a elektrony. Na katodu je přiveden kyslík. Protony vzniklé na anodě putují skrze elektrolyt do katody. Zde dochází k reakci molekul kyslíku s protony a elektrony za vzniku molekul vody. Elektrony nejsou schopné procházet skrze membránu a proudí elektrickým obvodem, čímž vytvářejí elektrický proud. Běžná provozní teplota PEMFC je 60-80 °C s vysokou hustotou výkonu 0,2-1 $W \cdot cm^{-2}$ a účinností okolo 60 %. Využitím tepla generovaného PEMFC je možné dosáhnout účinnosti až 90 %. Hlavními benefity PEMFC jsou nízká provozní teplota, schopnost dosažení maximálního výkonu ihned po zapnutí, nevytváří škodlivé emise, tichý provoz. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena a vysoká citlivost na nečistoty v palivu (vyžaduje velmi čistý vodík). PEMFC lze je využít v mnoha aplikacích pro výrobu elektřiny. Nejčastěji se využívají v automobilech a pro stacionární výrobu elektřiny. V úvahu přichází použití PEMFC jako přenosného zdroje elektrické energie, avšak to by vyžadovalo obrovské externí úložiště se zásobou vodíku. Na **Obr. 1** je znázorněno schéma PEMFC. [1, 16, 17]



Obr. 1 Palivový článek s protonovou výměnnou membránou [12]

2.3.2 Alkalický palivový článek

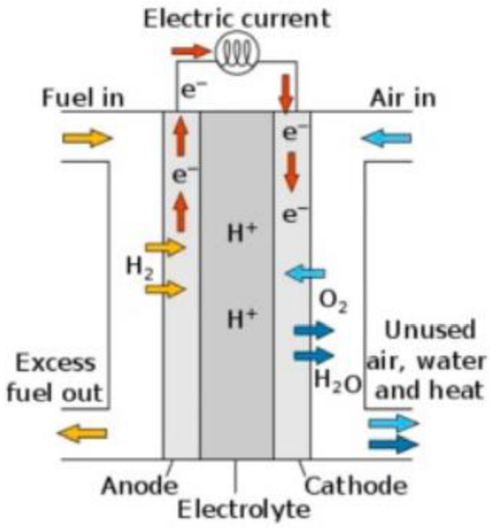
Alkalické palivové články (AFC) fungují na stejném principu jako PEMFC. Elektrody bývají vyrobeny ze spékaného práškového niklu s uhlíkem a vrstvou platiny jako katalyzátoru. Jako elektrolyt se využívají roztoky alkalických hydroxidů sodíku a draslíku. AFC jsou schopny provozu v rozmezí tlaků od 0,22 MPa do 4,5 MPa a rozmezí teplot 80-230 °C. Plošný výkon alkalických článků je okolo 0,3-0,5 $W \cdot cm^{-2}$. Využití nacházejí v kosmonautice, kde byli například použity v programu Apollo nebo Space Shuttle. Jejich přednostmi jsou vysoká elektrická účinnost zhruba 60 %, energetická vydatnost a možnost recyklace vody vznikající jako vedlejší produkt reakce, pro zajištění potřeb a zásob kosmické lodi. Na **Obr. 2** je vyobrazeno schéma AFC. [1, 15, 16]



Obr. 2 Alkalický palivový článek [12]

2.3.3 Palivové články s kyselinou fosforečnou

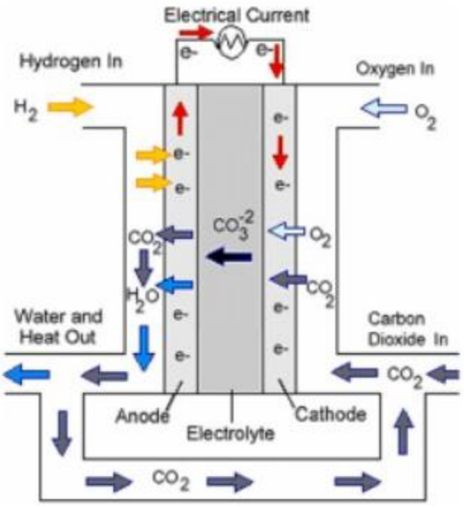
Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC) mají provozní teplotu článku v rozmezí teplot 170-220 °C, proto výsledným produktem není voda ale vodní pára. Elektrody jsou uhlíkové s platinovým povlakem fungujícím jako katalyzátor. Elektrolytem je kyselina fosforečná, uložená v matrici z karbidu křemíku a teflonu. Je nutné kontrolovat množství elektrolytu a případně ho doplňovat, jelikož se při provozu palivového článku uvolňuje z matice. PAFC je vybaven drobnými kanálky, které umožňují odvádění tepelné energie článku. Typický článek s kyselinou fosforečnou dosahuje plošného výkonu 0,2 $W \cdot cm^{-2}$. Dosahují elektrické účinnosti 36-42 %. Tepelná účinnost je okolo 30 %. Využívají se v kogeneračních elektrárnách. **Obr. 3** zobrazuje schéma PAFC. [1, 15, 16]



Obr. 3 Palivový článek s kyselinou fosforečnou [12]

2.3.4 Palivové články s roztavenými uhličitany

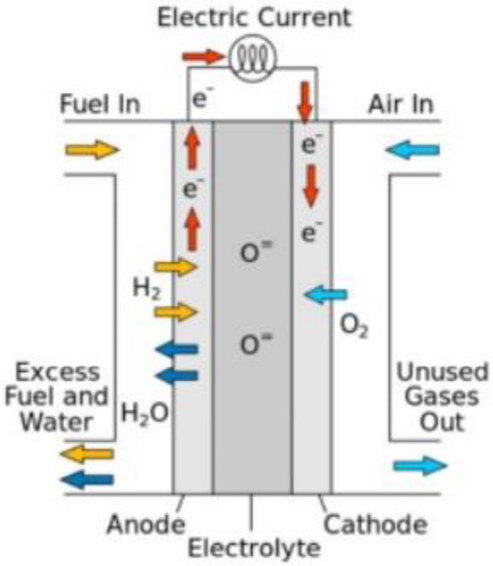
Provozní teplota článků s roztavenými uhličitany (MCFC) je okolo 600 °C. Při takto vysokých teplotách není nutné využívat platinové katalyzátory k urychlení reakce. Elektrody jsou vyrobeny tak, aby odolaly vysoké teplotě všudypřítomnému koroznímu prostředí. Vysoce porézní anoda se vyrábí spékáním práškového niklu s příměsí chromu. Katoda je tvořena oxidem nikelnatým s přídavkem lithia. Elektrolyt je tvořen směsí roztavených uhličitanů uložených v chemických inertní keramické matrici složené z oxidů lithia a hliníku. Výslednými produkty chemických reakcí v článků jsou vodní pára a oxid uhličitý. Vodní pára vycházející ze článku má vysokou energie a lze využít ke generaci elektřiny skrze turbínu, proto elektrická účinnost článku dosahuje až 60 %. Využití nalézají v kogeneračních systémech. Na **obr. 4** se nachází schéma MCFC. [1, 15, 16]



Obr. 4 Palivový článek s roztavenými uhličitany [12]

2.3.5 Palivové články s tuhými oxidy

Palivový článek s tuhým oxidem (SOFC) je vysokoteplotní typ palivového článku, jejichž pracovní teplota se blíží teplotám 1000 °C. Využívají elektrolytu z tuhých směsí oxidů ytria a zirkonu, které jsou i za takto vysokých teplot pevné a vynikají jako vodiče dvojmocných aniontů kyslíku. Anoda je a tvoří ji oxidy niklu a zirkonu vzdálený oxidem ytritým Y_2O_3, zabraňujícímu spékání niklu. Katoda je vyrobena ze slitiny lanthanu, oxidu manganatého a stroncia. Obě elektrody jsou velmi porézní. Kvůli vysokým provozním teplotám není článek schopný pracovat ihned po spuštění. Palivový článek s tuhými oxidy vykazují plošný výkon 0,2– 1 $W \cdot cm^{-2}$, elektrickou účinnost 45-60 %. S využitím tepelné energie dosahuje článek až 90 % účinnosti. Aplikace těchto článků je možná v elektrárnách, pro generování elektrické energie a tepla. Schéma SOFC vykresluje **obr. 5**. [1, 15, 16]



Obr. 5 Palivový článek s tuhými oxidy [12]

V **tab. 6** jsou uvedeny všechny palivové články popsané v této kapitole a nachází se zde základní přehled vlastností a využití palivových článků.

Tabulka 6 Parametry palivových článků

Klasifikace z hlediska	**Nízkoteplotní**		**Střednĕteplotní**	**Vysokoteplotní**	
Palivový článek	**s protonovou membránou (PEMFC)**	**Alkalický (AFC)**	**s kyselinou fosforečnou (PAFC)**	**s roztavenými uhličitany (MCFC)**	**s tuhými oxidy (SOFC)**
Pracovní teplota [°C]	60-80	80-230	170-220	600-700	700-1000
Elektrická účinnost	40-60 %	45-60 %	36-42 %	45-60 %	45-60 %
Účinnost s využitím tepla	80-90 %	70 %	80-85 %	80 %	90 %
Elektrolyt	Polymerová membrána	KOH, NAOH	Kyselina fosforečná	Roztavené uhličitany	Tuhá směs oxidů
Využívané palivo	Čistý vodík	Čistý vodík	Vodík, reformovaný metan	Vodík, metan, metanol, etanol	Vodík, metan, metanol, etanol
Nosič náboje	H^+	OH^-	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Plošný výkon [W·cm^{-2}]	0,2-1	0,3-0,5	0,2	0,1-0,2	0,2-1
Využití	Automobily, přenosné zdroje	Vesmírné aplikace	Stacionární výroba elektřiny	Stacionární výroba elektřiny	Stacionární výroba energie

3 Využití vodíku v dopravě

V celosvětovém měřítku se podle Evropské agentury pro životní prostředí z roku 2019 doprava podílela na produkci skleníkových plynů z 28,5 %. Z toho největší podíl 71,7 % emisí vznikl z automobilové dopravy, dále 14 % v námořní dopravě, 13,4 % v letecké dopravě, 0,4 % v železniční dopravě. V automobilové dopravě jsou největším producentem osobní automobily s 60,6 % následované nákladními vozy 38,1 %. Vodík má za účel snížit emise skleníkových plynů a stát se udržitelným palivem budoucnosti v dopravě. Implementaci automobilů s vodíkovým pohonem v současné době nejvíce brání vysoké pořizovací a provozní náklady i nedostatečná infrastruktura distribuce. V současné době se na evropském území nachází 300 vodíkových distribučních stanic. Nejvíce se jich nachází na území Německa, Francie a Nizozemska. V České republice se aktuálně provozují 4 veřejné vodíkové stanice (Čepro Mstětice, Vítkovice a.s., Orlen Benzina v Litvínově a Orlen Benzina v Praze). [18–20]

3.1 Systém pohonu

3.1.1 Spalovací vodíkový motor

Jednou z možných variant využití vodíkové energie ve automobilech jsou spalovací motory. Spalovací motory mají dlouhou historii, vybudovanou infrastrukturu a mají dobrou životnost a spolehlivost. Běžně vyráběné spalovací motory je možné s několika úpravami předělat na vodíkové. Vodíkový spalovací motor funguje na podobném principu jako benzínový motor, ale s několika důležitými rozdíly v chování vodíku jako paliva. Pro pohon je možné použít kapalný i stlačený vodík. Účinnost vodíkových motorů záleží na typu konstrukce a režimu provozu a dosahuje hodnoty 25-40 %. Předčasné zapálení vodíkové směsi, zpětný plamen a klepání patří mezi nejvýznamnější nedostatky vodíkových spalovacích motorů. Důvody jsou nízká zápalná energie vodíku a široký rozsah hořlavosti vodíku (4-75 %) ve směsi se vzduchem. Vodík navíc vykazuje vysokou rychlost šíření plamene a vysokou teplotu samovznícení. Vysoké teploty uvnitř válce způsobují vznik oxidů dusíku, které se řadí mezi skleníkové plyny. Během sacího procesu nebo při kompresi dochází uvnitř komory vlivem vysoké teploty po předchozím cyklu k zapálení směsi před plánovaným časováním jiskry. To má za následek vznik rázových vln, klepání motoru, nepravidelný chod a ztrátu výkonu. Pokud by k nekontrolovanému spalování směsi docházelo často, hrozí poškození komponent jako je například deformace pístu a ojnice, roztavení svíčky až celkové selhání motoru. Pro eliminaci předčasného zapálení vodíkové směsi je nutné navrhnout systém vstřikování a kompresního poměru směsi a detekce klepání. V současné době na trhu nejsou žádné automobily

s vodíkovými spalovacími motory, existuje pouze několik modelů, které jsou ve fázi vývoje. Do budoucna se očekává, že by spalovací vodíkové motory mohli přechodně nahradit současné spalovací motory. Uplatnění se může nacházet u nákladních automobilů a těžké techniky, kde využívání bateriových systémů není reálné.[21, 22]

3.1.2 Elektrovozidla využívající palivové články

Druhou možností využívání vodíku jako zdroje energie pro vozidla jsou elektromobily s palivovými články (FCEV). Nejčastěji se jako palivo využívá stlačený vodík pod tlakem 350-700 barů. Mimo to lze využívat kapalného vodíku, který má však větší nároky na skladování. V automobilech se využívají palivové články s protonovou výměnnou membránou. Vodík je přiveden do palivového článku, kde se pomocí elektrochemické reakce přetváří jeho chemická energie na energii elektrickou a vedlejší produkt vodu. Účinnost přeměny na elektřinu je zhruba 60 %. Z tohoto důvodu dosahují poměrně velkých dojezdových vzdáleností. Vzhledem k nízké pracovní teplotě (60-80 °C) palivový článek umožňuje rychlý start. Provoz článku je tichý a neprodukuje emise. Nevýhodou automobilů s palivovými články je obecně vysoká pořizovací a provozní cena oproti vozidlům se spalovacími motory a čistě elektrickými motory. Elektromobily na vodíkové palivové články [15, 22]

3.2 Osobní a nákladní automobilová doprava

Trh s FCEV v roce 2025 nabízí omezený počet vozidel, v **tab. 7** jsou uvedeny všechny automobily dostupné na trhu. V roce 2023 se podle dat Evropské vodíkové observatoře v Evropě prodalo 5939 vozidel na vodíkový pohon. Velká část vozidel se nachází teprve ve fázi testování a připravuje se na uvedení na trh. Největšími výrobci v této oblasti jsou společnosti Toyota, Hyundai a Honda. [23]

Tabulka 7 Dostupná vozidla a jejich specifikace [24–28]

Model	Dojezd (km)	Výkon (kW)	Spotřeba (kg/100 km)	Cena (CZK)
Toyota Mirai	650	135,7	0,79	1 830 000
Hyundai NEXO	660	120	0,95	1 900 000
Honda CR-V FCEV	430	92.2	1	1 145 000
Riversimple Rasa	483	10	0,31	5 925 000
Hyundai XCIENT FC	400	180	7,75	78 000 000

3.3 Veřejná doprava

Veřejná doprava, významně přispívá ke globálnímu oteplování, zejména kvůli vysoké spotřebě fosilních paliv. Náhradou autobusů, vlaků, lodí a letadel se spalovacími motory za udržitelnější vodíková, představuje zásadní posun k omezení produkce skleníkových plynů. Využívání veřejné dopravy je důležité k udržení dopravní obslužnosti, zejména pro snížení individuálního používání vozidel a dopravních kolapsů.

3.3.1 Autobusy

Vodíkem poháněné autobusy jsou alternativní k autobusům na naftu a zemní plyn. Vodík je v autobusech skladován nejčastěji v podobě stlačeného plynu (200–350 bar) v nádržích, nebo jako kryogenní kapalina o teplotě (-253 °C), případně v atomárním stavu reverzibilně adsorbovaném v hydridech kovů.[29]

Autobusy poháněné vodíkem mají vodíkové palivové články, které pohání elektromotor, díky přeměně vodíku a kyslíku na elektrickou energii. Výhodou vodíkových autobusů oproti běžným je především jejich rychlé tankování, tichý provoz a nulové emise, produktem spalování je pouze vodní pára. Nevýhodou těchto autobusů je vysoká pořizovací cena, velmi omezená infrastruktura tankování. [30]

Do budoucna vodíkové autobusy mají šanci stát se důležitým prvkem v přechodu na bezemisní veřejnou dopravu, především na dlouhých trasách, kde autobusy využívající pouze baterie mohou mít omezený dojezd. Je však nezbytné investovat do rozvoje technologií a infrastruktury. Je předpoklad, že se vodíkové autobusy stanou běžnou součástí městské dopravy. [31]

Využití autobusů s pohonem na vodík je již aktuální i v České republice, konkrétně v Praze byl v loňském roce nasazen vodíkový autobus na běžnou linku. Dále ve Středočeském kraji, konkrétně v okolí Mníšku pod Brdy, bude na konci roku 2025 zahájen provoz deseti vodíkových autobusů Solaris Urbino 12 hydrogen. Tyto autobusy budou poháněny "zeleným vodíkem" vyráběným z obnovitelné elektřiny pocházející z vodní elektrárny ve Vraném nad Vltavou. [32, 33]

3.3.2 Vlaky

Vlaky jsou klíčovou součástí moderní dopravy, avšak vysoká energetická náročnost a emise skleníkových plynů z ní činí trn v oku pro budoucí čistý dopravní systém. Přechod z dieselových lokomotiv na elektrické lokomotivy s vodíkovými palivovými články je slibným

způsobem osvobození železniční dopravy od skleníkových plynů. V současné době existuje několik pilotních projektů pro využití elektrických vlaků s vodíkovými palivovými články, jeden komerčně dostupný projekt se dokonce nachází v Německu.

Projekt německého vodíkového vlaku byl zaveden v roce 2018, avšak trvalého komerčního zprovoznění se trasa dočkala až v roce 2022. Vlaky na této trase byly navrženy firmou Alstom, vodíkové palivo je získáváno neekologickou cestou, jedná se o šedý vodík, který vzniká jako vedlejší produkt v blízkých chemických závodech. Od roku 2022 má vlak vlastní vodíkovou čerpací stanici, do té doby bylo palivo dodáváno z mobilního čerpacího systému. Očekává se, že tento vlak přejde již v roce 2026 na zelený vodík z obnovitelných zdrojů. Jedná původně se jedná o dieselový vlak, který byl přestavěn na elektrický s vodíkovými články. Ve vlaku je uloženo celkem 20 kg vodíku při tlaku 8,5 baru. Palivo je rozděleno do čtyř vysokotlakých palivových nádrží. [34, 35]

V roce 2021 byl oznámen projekt Korejského výzkumného institutu výstavby vodíkových vlaků, jenž by měli být uvedeny na trh pro užívání širokou veřejností již v roce 2025. Palivo v tomto vlaku je skladováno v kryogenní podobě, cílem je dojezd 1000 km a maximální rychlost až 150 km/h. [36]

V další asijské zemi, konkrétně v Číně byla v roce 2023 odhalena vodíková lokomotiva s názvem Ningdong, ta se pyšní zásobníkem na 270 kg paliva a možností provozu až 190 hodin. Ningdong má navíc několik bezpečnostních opatření, která zvyšují bezpečnost, mimo jiné obsahuje autonomní ventilační systém, dále je vybaven ohnivzdornou a tepelnou izolací mezi úložištěm vodíku a palivovými články. [37]

V Japonsku se od roku 2022 testuje vlak s hybridním systémem, využívající jako zdroj elektrické energie palivové články a akumulátory. Odhaduje se, že vlak by měl být schopen urazit až 140 km na jedno dobití. [38]

3.3.3 Lodě

Využití vodíkových palivových článků v lodní dopravě prochází testováním, zejména pro malé a střední lodě. Především pak ve vnitrozemské vodní dopravě, kde není třeba vysoké rychlosti na vodních tocích.

Projekt Protium ve Spojeném království si stanovil za cíl přestavit běžný motorový člun, navrhnout úpravy a postavit hybridní elektrický kanálový člun s vodíkovými bateriemi, který by šlo použít v celé síti kanálů ve Spojeném království. V projektu byl využit zdroj energie vodíku v pevné podobě. Systém palivového článku byl tvořen šesti vyměnitelnými kazetami, přičemž každá obsahovala deset samostatných článků, ty poté byly sériově zapojeny na každé

kazetě. Efektivní energetická kapacita palivového článku a zásobníku na vodík byla 50kWh za předpokladu skladování čtyř kilogramů vodíku. Skladování vodíku v pevné fázi umožnila speciální slitina, na principu hydridů kovů. Projekt Protium ukázal, že lze úspěšně přestavět kanálový člun na provoz na vodík. Projekt také dokázal, že nedochází ke snížení kapacity výkonu hydridových zásobníků. [39]

V další evropské zemi, konkrétně v Německu, přišli s nápadem vytvoření vnitrozemského tlačného člunu. Tlačný člun ELEKTRA, který byl navržen pro vnitrozemský provoz. Před uskutečněním projektu byla vytvořena předběžná studie, která měla za cíl zjistit proveditelnost a ekonomický aspekt návrhu. Bylo zjištěno, že největší překážkou v rozvoji projektu je především nedostatečná infrastruktura pro nabíjení a palivo, především pokud by byla loď využívána v nadregionálním provozu. Z ekonomického aspektu byla analyzována investiční a nákladová stránka projektu, studie ukázala, že investiční náklady převyšují náklady na klasický konvenční tlačný člun. Přesto byl projekt ELEKTRA rozvíjen a bylo zjištěno, že akumulátory a systém pro ukládání vodíku, dohromady tvoří 25 % celkové hmotnosti lodi. Součástí projektu lodě jsou lithium-nikl-mangan-kobalt-oxidové baterie s celkovou maximální kapacitou 2050 kWh, které poskytují přibližně 1950 kWh využitelné energie. Palivové články na vodík podávají maximální výkon 300kW ze tří článků. Systém skladování vodíku je na otevřené palubě v šesti svazcích, každý svazek se skládá z dvaceti vysokotlakých nádob s tlakem 500 barů. V tomto projektu není primárně zamýšlena možnost na napájení akumulátorů prostřednictvím palivových článků, nicméně je možné využití tohoto řešení. Využití této možnosti závisí především na ceně použitého vodíku. [40]

3.3.4 Letadla

Komerční letecká doprava patří k velkým znečišťovatelům životního prostředí. Proto roste snaha o využití alternativního pohonu vodíkových palivových článků v leteckém průmyslu. Vodík má pro tyto účely vynikající energetickou hustotu, problematickým je způsob jeho uchovávání. Aktuální obsah, konstrukce a umístění palivových nádrží by byly schopné umožnit pouze lety na velmi krátké vzdálenosti. V budoucnu bude nutné pozměnit konstrukce letadel pro možnost využívání vodíku jako hlavního zdroje energie. V současnosti se vodík testuje jako zdroj pro výrobu elektrické energie na palubách komerčních letů. [41]

V jedné studii se vědci snažili o nasazení palivových článků s protonovou výměnnou membránou na palubě komerčního letadla (Boeing). Studie si dala za cíl analyzovat, zda nasazení palivového článku ovlivní celkový výkon letadla. Pro srovnání bylo využito letadlo bez palivového článku. PEMFC v této studii měl zajistit část elektrické energie a tepla pro

letadlo, nenahradil hlavní generátor motoru ani přídatné energetické jednotky. Na základě této studie bylo zjištěno, že celková úspora paliva oproti celkové spotřebě letadla je jen minimální, avšak systém palivových článků dokáže ušetřit až třetinu paliva určeného pro výrobu elektrické energie. [42]

4 Vojenské účely

Vojenský a obranný průmysl obecně patří k největším průkopníkům ve vývoji moderních technologií. Je to zapříčiněno vysokými investicemi jednotlivých států do vývoje alternativních technologií. Cílem výzkumu je hledání nových a výkonnějších zařízení a zlepšování vyžívaných způsobů. Technologie využívání vodíkové energie se už prakticky uplatňuje v terénu. Využití palivových článků pro vojenské účely je v posledních letech stále častější. Tato technologie poskytuje několik strategických výhod. Palivové články disponují velmi tichým provozem, mají vysokou účinnost, neprodukují tepelné chemické znečištění. Vodu, která je produkována palivovým článkem, lze využít k ohřevu nebo topení.[15]

Největší uplatnění v praxi nacházejí palivové články u ponorek. Umožňují tichý provoz, jsou soběstačné, disponují dlouhou výdrží pod vodou bez nutnosti vynoření. Největší kladem je to, že neprodukují téměř žádné odpadní teplo. V praxi to znamená, že jsou obtížně detekovatelné radary a infračervenými senzory, což je činí téměř neviditelnými. Palivové články jsou pro pohon ponorek cenově dostupnou technologií. [15, 43]

V aktuální vývoji situace na Ukrajině je zřejmé, že nejnebezpečnější zbraní využívanou na bojišti se do budoucna stanou autonomně řízené drony. Využití palivových článku k pohonu autonomních dronů by mohlo vést ke zvýšení doletu dronů, vytvořit je nenápadnějšími a učinit je nebezpečnějšími. Dobíjení bateriových dronů trvá několik hodin a tyto stroje po dobu nabíjení nelze využívat. Vodíkové drony mají tu výhodu, že doplnění paliva trvá několik minut a dron může pokračovat v operacích. Navíc je možné pomocí dronů provést doručování klíčových surovin pro přežití vojáků v bojových podmínkách. [15, 44]

Mimo jiné by palivové články mohli nahradit fosilní paliva, které jsou využívány v armádních dopravních prostředcích a generátorech energie. Vodík by mohl být využit pro generování energie ve stacionárních a přenosných systémech. V roce 2023 proběhlo testování využití vodíkových palivových článků v terénu organizací NATO, kde se zkoumal celkový potenciál palivových článků pro vojenské účely. V experimentu byli využity dva přenosné palivové články. Cílem projektu bylo zjistit spolehlivost článků v terénu a nasbírat data pro následnou analýzu. [15, 45]

5 Využití vodíku v energetice

5.1 Plynové trubíny

Plynové turbíny jsou důležitým prvkem k zajištění globálních energetických požadavků. Spalovací turbíny slouží jako spolehlivý a univerzální způsob výroby energie z fosilních paliv (metanu), zároveň však produkují velké množství emisí. Využití vodíku jako paliva pro plynové turbíny má za cíl snížit emise CO_2. Vlastnosti vodíku stejně jako u vodíkových spalovacích motorů hrají důležitou roli i u plynových turbín. Přestože spalování vodíku přispívá ke snížení emisí CO_2, spalováním vodíku vzniká znatelné množství vody. Zvýšení koncentrace vody ve spalinách je schopné pozvednout přenos koeficientu tepla v komoře. Tím se dosáhne vyšších teplot, což může způsobit problém s trvanlivostí důležitých částí turbíny, jako jsou lopatky. Vodní pára také způsobuje korozi materiálů turbíny. Vysoká rychlost hoření vodíku může způsobovat zpětné šlehání, které vzniká tím, že rychlost proudění paliva do spalovací komory není dostatečně rychlé. Zpětné šlehání způsobuje poškození komponent spalovacího zařízení. Vysoké spalovací teploty vodíku mají za důsledek zvýšení vzniku emisí oxidů dusíku. Vzniku všech zmíněných nedostatků lze docílit vyvážením spalovacího procesu. Vytvořit správný směšovací poměr paliv a vzduchu, použití senzorů pro detekci zpětného šlehání, regulace spalovacích teplot. [46]

5.1.1 Spalování difuzním plamenem

Spalovací komory pro spalování difuzním plamenem se vyznačují jednoduchým konstrukčním řešením s vysokou stabilitou a možností spalovat různé směsi paliv s vysokým obsahem vodíku. Lze poměrně snadno regulovat poměr paliva a vzduchu, což redukuje potenciál vzniku zpětného šlehání. Směs se spaluje zároveň ve spalovací zóně, což může vést ke vzniku vysokých teplot, a tudíž vzniku oxidu dusíku. Mísení vzduchu s dusíkem nebo vodní párou se využívá ke snížení spalovací teploty a redukce vzniku oxidů dusíku. To má naopak vliv na výkon turbíny a redukuje celkovou účinnost transformace energie. Zásadní roli hraje efektivní optimalizace systému. [46]

5.1.2 Spalování s předem smíšeným plynem

Ke směsi vzduchu a paliva dochází před tím, že je směs přivedena do spalovací komory v podobě chudé směsi, což má za následek snižování teploty hoření. Díky tomu má tento typ spalování nízké emise oxidů dusíku. Nicméně dosažení správné kvality směsi je poměrně velký oříšek. Je nutné zjistit, jak konstrukce vstřikovacích trysek a dalších prvků turbíny ovlivňuje

výslednou směs. Tu je poté potřeba regulovat na mez hořlavosti chudé směsi nebo její okolí. Nicméně při předsměsovém spalování blízko meze stability chudé směsi může docházet k nestabilnímu spalování. V současné době probíhají výzkumy zabývající se tím, jak ovlivnit vznik nestabilního spalování, jeho bezpečnostní aspekty.[46]

V roce 2023 společnost Wien Energy ve spolupráci se Siemens Energy spustili výzkum a testování spalování směsi vodíku a metanu v elektrárně Donaustadt ve Vídni. Učinili tak první krok k dekarbonizaci plynových elektráren. Během projektu se využívalo různých směsí metanu a vodíku, maximálně však 15 % vodíku. Zkoumalo se, jaký vliv má spalování vodíku na komponenty zařízení a byly měřeny a analyzovány klíčové parametry spalovacího procesu. Zjistilo se, že spalováním této směsi je možné eliminovat 33000 tun emisí oxidu uhličitého. V budoucnu zde bude probíhat testování směsí s vyšším obsahem vodíku. Projekt představuje důležitý krok lidstva směrem k dekarbonizaci energetického průmyslu.[47, 48]

5.2 Stacionární zařízení a plynové kotle

Kogenerační zařízení na principu vysokoteplotních palivových článků je zajímavým řešením, které by mohlo umožnit přechod od centralizované výroby energie. Kogenerační zařízení se využívá ke generaci elektrické energie a využívá tepelnou energii palivového článku. Nabízí se využití pro domácnosti nebo průmyslové závody. V současné době lze kogenerační zařízení využít pouze tam, kde je přístup velmi čistému vodíku, nejčastěji ve výrobních areálech. [15]

V souvislosti s přechodem na nízkouhlíkovou energetiku se vodík stále více uvažuje jako potenciální náhrada zemního plynu v oblasti vytápění budov. Plynové kotle jsou v současné době schopny využívat vodík nebo směs vodíku a zemního plynu a mohou představovat řešení pro dekarbonizaci vytápění, zejména v hustě osídlených oblastech s již existující infrastrukturou.[49]

6 Výsledky a diskuse

Z provedené rešerše vyplývá, že vodík má velký potenciál stát se v budoucnu čistým a flexibilním zdrojem energie, který může výrazně přispět ke snížení emisí skleníkových plynů a zajistit přechod k udržitelné energetice. Přestože se o jeho využití diskutuje již desítky let, teprve v posledních letech začíná nabývat na významu. Z analýzy vyplývá, že velká většina aktuálně vyráběného vodíku pochází z neobnovitelných fosilních zdrojů energie. Důvod je prostý, jedná se totiž o nejlevnější, nejrozšířenější a velmi spolehlivou metodu výroby, které však zanechává vysokou uhlíkovou stopu. Alternativní metody výroby vodíku elektrolýzou s využitím energie z obnovitelných zdrojů představují ekologičtější variantu. Jejich širší nasazení však zatím brzdí vysoké investiční náklady a nižší ekonomická návratnost ve srovnání s tradičními metodami. Z těchto důvodů je zřejmé, že pro dosažení výrazného pokroku v oblasti vodíkové energetiky je nezbytné omezit závislost na fosilních palivech, podpořit rozvoj infrastruktury a dále investovat do výzkumu a technologického rozvoje výroby, skladování a využití vodíku.

6.1 Skladování vodíku

Během tvorby této části práce jsem se seznámil s mnoha podobnými pohledy různých autorů na tuto problematiku, které mě vedli k závěru, že skladování vodíku je složité, energeticky náročné a musí se řídit složitými bezpečnostními přepisy. Ke skladování plynného vodíku je využit vysoký tlak 350-700 barů. V případě zkapalňování je potřeba dosáhnout kryogenních teplot -253 °C. Obě operace jsou energeticky a technologicky nesmírně náročné a spotřebují velkou část energie uložené ve vodíku. V případě vodíku vázaného chemických nosičích, přestože umožňuje skladování v méně náročných podmínkách, přináší nové výzvy v oblasti rychlostí uvolňování vodíku a nutnosti dodávání tepla za účelem jeho zpětného získání. To vše mě utvrdilo v názoru, že je potřeba nadále vyvíjet a testovat nové metody skladování, rozvíjet technologie stlačování a zkapalňování a hledat nové principy, které by šlo aplikovat k celkovému snížení ekonomických nákladů.

6.2 Transport Vodíku

Transport vodíku je nedílnou součástí vodíkové ekonomiky. Z mých výsledků je patrné, že převoz většiny vodíku je uskutečňován pomocí silniční, železniční nebo lodní dopravy. Plynového potrubí pro transport vodíku se v současné době téměř nevyužívá. Důvodem je nedostatečná infrastruktura vodíkového potrubí. Vodík je sice možné v nízkých koncentracích

přimíchávat do potrubí se zemním plynem, rozhodně se ale nejedná o možnost přepravy. Tato směs je určena ke spalování v parních turbínách potenciálně spalování v plynových kotlích pro generaci elektřiny a tepla. Rozvoji čistě vodíkového potrubí aktuálně brání nutnost vysokých investic, požadavky na kontrolu úniku a chování vodíku vůči konstrukčním materiálům potrubí. Ačkoliv tato tvrzení nemusí být pravdivá, ve své rešerši jsem nenalezl potřebnou literaturu, která by mé závěry vyvracela.

6.3 Palivové články

Palivové články patří pro jejich účinnost (kolem 90 %) k nejlepším způsobům využití chemické energie ve vodíku k transformaci na elektrickou a tepelnou energii. Existuje několik druhů v praxi využívaných palivových článků, které se od sebe liší typem elektrolytu, konstrukcí, provozní teplotou, reakčními látkami a pořizovací cenou. V současné době jsou nejvyužívanější PEMFC. Kvůli jejich vlastnostem jsou ideálním řešením pro pohon automobilů a umožňují aplikaci jako přenosného zdroje energie. AFC se využívá hlavně v kosmonautice k provozu kosmických lodí. Během rešerše se mi nepodařilo zjistit bližší informace o využití ve vesmíru. Střednětеplotní a vysokoteplotní palivové články představují do budoucna zajímavé řešení pro kogenerační zařízení s vysokou účinností. Ty by v budoucnu mohli sloužit jako zdroj elektřiny a vytápění pro rezidenčních nebo bytových komplexů, administrativních budov a průmyslových závodů.

6.4 Doprava

Využití vodíku k pohonu automobilů představuje jednu z hlavních oblastí, kde se tato technologie může v budoucnu uplatnit. Klíčovým faktorem pro rozvoj vodíkové mobility je ovšem zajištění dostatečné infrastruktury. Doprava je velkým producentem emisí skleníkových plynů. Z toho důvodu bylo třeba hledat alternativní pohony k současným spalovacím motorům na fosilní paliva. Jednou z metod aktuálně široce propagovanou na evropském trhu jsou bateriová elektrická vozidla. Druhou metodou jsou elektrická vozidla s palivovými články, v této oblasti zatím probíhá intenzivní vývoj. Pokud bychom se pustili do porovnávání, zjistili bychom, že elektrická bateriová vozidla oproti FCEV vynikají vysokou energetickou účinností, rozvinutou infrastrukturou a nižšími pořizovacími cenami. FCEV zase vynikají vyšším dojezdem, rychlostí doplnění paliva. Přikláním se k názoru, že oba typy pohonu mohou najít v budoucnu uplatnění. Poslední metodou jsou vodíkové spalovací automobily. V odborné literatuře můžeme najít různé názory ohledně využití spalovacích vodíkových motorů pro

pohon automobilů, obecně však převládá názor, že k zavedení do praxe nedojde v důsledku technologických nedostatků.

Využití vodíkového pohonu v oblasti veřejné dopravy je podle mého názoru jedním z nejperspektivnějších v budoucnosti, protože se nedá předpokládat, že by veřejná doprava pro svůj provoz využívala čistě bateriového pohonu. V rámci rešerše bylo zjištěno, že v současné době probíhají projekty u všech typů veřejných dopravních prostředků, jako jsou autobusy, vlaky, letadla a lodě, testující potenciál vodíkových technologií. Klíčovými faktory pro využívání vodíku ve veřejné dopravě je snížení pořizovacích cen vozidel, rozvoj infrastruktury a zvýšení výrobních kapacit.

6.5 Vojenské účely

Vojenský průmysl patří mezi odvětví s nejlepšími technologiemi na světě. V rámci rešerše bylo zjištěno potencionální využití vodíku jako zdroje energie pro ponorky, drony, vozidla a generátory elektřiny. Oblast vojenského výzkumu je typická vysokou mírou utajení, proto neexistuje příliš mnoho zdrojů odkazujících na integraci vodíkových technologií.

6.6 Energetika

Při studiu odborné literatury jsem zjistil, že využití vodíku v energetice se nachází ve stádiu testování a pilotních projektů. Vodík může sloužit jako zdroj energie buď prostřednictvím spalování v plynových turbínách a kotlích, nebo pomocí palivových článků. Spalování v plynových turbínách umožňuje sice využití stávajících technologií, nicméně je třeba zásadních úprav pro spalování vodíku. Palivové články pracující za vyšších teplot jsou vhodné pro aplikaci v kogeneračních systémech.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat potenciál vodíku jako udržitelného zdroje energie a zhodnotit využitelnost v různých sektorech. Porovnat vybrané způsoby využití a popsat jejich výhody a nevýhody.

V úvodní části byl čtenář seznámen se základními fyzikálně-chemickými vlastnostmi vodíku, které mají klíčový význam pro jeho další energetické využití. Byla zde zodpovězena otázka ohledně aktuálního stavu výroby a její problematika. V další části se práce podrobně zabývala možnostmi akumulace elektrické energie prostřednictvím vodíku. Popsán byl princip elektrolýzy a její hlavní technologické varianty. Pozornost byla věnována rovněž otázce skladování vodíku, a to jak ve formě stlačeného plynu, kapaliny, tak i chemicky vázaného vodíku. Byly zhodnoceny technické a ekonomické nároky jednotlivých způsobů skladování.

V následující kapitole se práce zabývá problematikou transportu vodíku, který tvoří jednu z klíčových výzev při budování efektivní vodíkové ekonomiky. Přenos vodíku z místa výroby do místa spotřeby je technicky i ekonomicky náročný proces, jehož řešení závisí na zvoleném skupenství vodíku, dopravní vzdálenosti a existující infrastruktuře. V práci jsou popsány hlavní způsoby transportu, jako je přeprava stlačeného nebo zkapalněného vodíku pomocí silniční, železniční a lodní dopravy, stejně jako přímý transport potrubními systémy. Důraz je kladen na technologické a bezpečnostní požadavky spojené s přepravou vodíku, včetně problematiky jeho vysoké difuzivity a reaktivity s materiály potrubí. Cílem této části je ukázat, že bez vyřešení otázek spojených s logistikou vodíku nelze zajistit jeho masové rozšíření jako energetického nosiče.

Další část práce se zabývá technologií palivových článků, která představuje jednu z nejúčinnějších a nejčistších metod přeměny chemické energie vodíku na elektrickou energii. V této kapitole jsou vysvětleny principy fungování palivového článku, role jednotlivých komponent (anoda, katoda, elektrolyt) a základní elektrochemické reakce, ke kterým při provozu dochází. Dále jsou uvedeny různé typy palivových článků rozlišené podle použitého elektrolytu, provozní teploty a aplikace.

V závěrečné části práce byly představeny hlavní oblasti využití vodíku jako zdroje energie. Konkrétně v dopravě, pro vojenské účely a v sektoru energetiky. Každá z těchto oblastí nabízí specifické příležitosti i výzvy spojené s integrací vodíkových technologií.

Použitá literatura

[1] ŠVÁB, Michal. *Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice* [online]. B.m.: Česká energetická agentura. 2006. Dostupné z: https://efekt.gov.cz/dokument/01.pdf

[2] USMAN, Muhammad R. Hydrogen storage methods: Review and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2022, **167**, 112743. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2022.112743

[3] ABBASIAN HAMEDANI, Erfan, Seyed Ali ALENABI a S. TALEBI. Hydrogen as an energy source: A review of production technologies and challenges of fuel cell vehicles. *Energy Reports* [online]. 2024, **12**, 3778–3794. ISSN 2352-4847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egyr.2024.09.030

[4] REDA, Bassma, Amr A. ELZAMAR, Shehab ALFAZZANI a Shahira M. EZZAT. Green hydrogen as a source of renewable energy: a step towards sustainability, an overview. *Environment, Development and Sustainability* [online]. 2024 [vid. 2025-05-08]. ISSN 1573-2975. Dostupné z: doi:10.1007/s10668-024-04892-z

[5] MOHAN, Man, Vinod Kumar SHARMA, E. Anil KUMAR a V. GAYATHRI. Hydrogen storage in carbon materials—A review. *Energy Storage* [online]. 2019, **1**(2), e35. ISSN 2578-4862. Dostupné z: doi:10.1002/est2.35

[6] TARHAN, Cevahir a Mehmet Ali ÇIL. A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods. *Journal of Energy Storage* [online]. 2021, **40**, 102676. ISSN 2352-152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2021.102676

[7] URSUA, Alfredo, Luis M. GANDIA a Pablo SANCHIS. Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2012, **100**(2), 410–426. ISSN 1558-2256. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2011.2156750

[8] BUTTLER, Alexander a Hartmut SPLIETHOFF. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **82**, 2440–2454. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.09.003

[9] GRIGORIEV, S. A., V. N. FATEEV, D. G. BESSARABOV a P. MILLET. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2020, **45**(49), Progress in Hydrogen

Production and Utilization, 26036–26058. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2020.03.109

[10] KÖRNER, Alexander. *Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells* [online]. B.m.: Technical Annex. 29. červen 2015. Dostupné z: https://www.g20ys.org/upload/auto/1888e90ef287bf674665cd8b97fffcc45164b928.pdf

[11] ABDIN, Zainul, Ali ZAFARANLOO, Ahmad RAFIEE, Walter MÉRIDA, Wojciech LIPIŃSKI a Kaveh R. KHALILPOUR. Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2020, **120**, 109620. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2019.109620

[12] SADEQ, Abdellatif M., Raad Z. HOMOD, Ahmed Kadhim HUSSEIN, Hussein TOGUN, Armin MAHMOODI, Haytham F. ISLEEM, Amit R. PATIL a Amin Hedayati MOGHADDAM. Hydrogen energy systems: Technologies, trends, and future prospects. *Science of The Total Environment* [online]. 2024, **939**, 173622. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2024.173622

[13] MA, Yin, X. R. WANG, Tong LI, Jiawei ZHANG, Ji GAO a Z. Y. SUN. Hydrogen and ethanol: Production, storage, and transportation. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2021, **46**(54), 27330–27348. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2021.06.027

[14] NASEEM, Kashif, Fei QIN, Faryal KHALID, Guoquan SUO, Taghazal ZAHRA, Zhanjun CHEN a Zeshan JAVED. Essential parts of hydrogen economy: Hydrogen production, storage, transportation and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2025, **210**, 115196. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2024.115196

[15] AMINUDIN, M. A., S. K. KAMARUDIN, B. H. LIM, E. H. MAJILAN, M. S. MASDAR a N. SHAARI. An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2023, **48**(11), 4371–4388. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2022.10.156

[16] ALI, Ali B. M., Ahmed K. NEMAH, Yusra A. AL BAHADLI, a EHSAN KIANFAR. Principles and performance and types, advantages and disadvantages of fuel cells: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* [online]. 2024, **10**, 100920. ISSN 2666-0164. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscee.2024.100920

[17] WEBER, Adam Z., Sivagaminathan BALASUBRAMANIAN a Prodip K. DAS. Chapter 2 - Proton Exchange Membrane Fuel Cells. In: Kai SUNDMACHER, ed. *Advances in Chemical Engineering* [online]. B.m.: Academic Press, 2012 [vid. 2025-05-10], Fuel Cell Engineering, s. 65–144. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-386874-9.00003-8

[18] Emise CO2 z aut: fakta a čísla (infografika). *Témata | Evropský parlament* [online]. 25. březen 2019 [vid. 2025-05-17]. Dostupné z: https://www.europarl.europa.eu/topics/cs/article/20190313STO31218/emise-co2-z-aut-fakta-a-cisla-infografika

[19] *Over 1,000 Hydrogen Refuelling Stations Worldwide in 2024* [online]. [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: https://fuelcellsworks.com/2025/02/12/h2/milestone-reached-over-1-000-hydrogen-refuelling-stations-in-oper-ation-worldwide-in-2024

[20] *Přehled stanic | Vodíková mapa ČR* [online]. [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: https://www.cdvgis.cz/~kubecek/vodik/www/?lang=cz&action=table

[21] VERHELST, Sebastian a Thomas WALLNER. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2009, **35**(6), 490–527. ISSN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2009.08.001

[22] SINGH, Manpreet, Manish Kumar SINGLA, Svetlana BERYOZKINA, Jyoti GUPTA a Murodbek SAFARALIEV. Hydrogen vehicles and hydrogen as a fuel for vehicles: A-State-of-the-Art review. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2024, **64**, 1001–1010. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2024.03.325

[23] *Vodíková palivová elektromobilita | Evropská observatoř pro vodík* [online]. [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/index.php/hydrogen-landscape/end-use/hydrogen-fuel-cell-electric-vehicles

[24] *Riversimple Rasa - E-Mobility Engineering* [online]. [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: https://www.emobility-engineering.com/riversimple-rasa/

[25] All-New 2025 Honda CR-V Fuel Cell Electric Vehicle Lease Pricing Announced; Includes Generous Hydrogen Fuel Credits. *Honda Automobiles Newsroom* [online]. 26. červen 2024 [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: http://hondanews.com/en-US/honda-automobiles/releases/all-new-2025-honda-cr-v-fuel-cell-electric-vehicle-lease-pricing-announced-includes-generous-hydrogen-fuel-credits

[26] *Objevte novou Toyotu Mirai | Toyota* [online]. [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: https://www.toyota.cz/nova-auta/mirai

[27] *Hyundai NEXO | Hyundai* [online]. [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: https://www.hyundai.com/cz/modely/nexo.html

[28] XCIENT Fuel Cell Truck | Hydrogen Truck | Hyundai Motor Company. *Hyundai Electrified Commercial Vehicles* [online]. [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: https://ecv.hyundai.com/global/en/products/xcient-fuel-cell-truck-fcev

[29] D'OVIDIO, G., C. MASCIOVECCHIO a N. ROTONDALE. City bus powered by hydrogen fuel cell and flywheel energy storage system. In: *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*: *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)* [online]. 2014, s. 1–5 [vid. 2025-05-16]. Dostupné z: doi:10.1109/IEVC.2014.7056107

[30] WIJAYASEKERA, Sachindra Chamode, Kasun HEWAGE, Faran RAZI a Rehan SADIQ. Fueling tomorrow's commute: Current status and prospects of public bus transit fleets powered by sustainable hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2024, **66**, 170–184. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2024.04.030

[31] DANIELIS, Romeo, Mariangela SCORRANO, Manuela MASUTTI, Asees Muhammad AWAN a Arsalan Muhammad Khan NIAZI. Fuel Cell Electric Buses: A Systematic Literature Review. *Energies* [online]. 2024, **17**(20), 5096. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en17205096

[32] KOČOVSKÝ, Marek. Střední Čechy nasadí vodíkové autobusy. Zelené, ale provoz třikrát dražší než u dieselů. *iDNES.cz* [online]. 5. srpen 2024 [vid. 2025-05-16]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/praha/zpravy/praha-vodikovy-autobus-mnisek-pod-brdy-stredocesky-kraj-bezemisni-vuz.A240805_121843_praha-zpravy_pari

[33] S.R.O. [HTTPS://WWW.PRAGUEBEST.CZ, PragueBest. V Praze jako prvním městě v ČR ode dneška jezdí vodíkový autobus v pravidelném provozu MHD s cestujícími. *Dopravní podnik hl. m. Prahy, akciová společnost* [online]. 14. červenec 2023 [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: https://www.dpp.cz/spolecnost/pro-media/tiskove-zpravy/detail/278_2244-v-praze-jako-prvnim-meste-v-cr-ode-dneska-jezdi-vodikovy-autobus-v-pravidelnem-provozu-mhd-s-cestujicimi

[34] HydroFLEX Hydrogen Train. *Railway Technology* [online]. [vid. 2025-05-16]. Dostupné z: https://www.railway-technology.com/projects/hydroflex-hydrogen-train/

[35] Hydrogen train world premiere on the evb rail network. So close is way ahead. *evb Wasserstoffzug* [online]. [vid. 2025-05-16]. Dostupné z: https://www.evb-wasserstoffzug.de/en/

[36] SMITH, Kevin. Korean project to develop liquefied hydrogen fuel cell traction. *International Railway Journal* [online]. 21. duben 2021 [vid. 2025-05-16]. Dostupné z: https://www.railjournal.com/technology/korean-project-to-develop-liquefied-hydrogen-fuel-cell-traction/

[37] NILSON, Peter. CRRC unveils „world's most powerful" hydrogen train. *Railway Technology* [online]. 19. červen 2023 [vid. 2025-05-16]. Dostupné z: https://www.railway-technology.com/news/crrc-unveils-worlds-most-powerful-hydrogen-train/

[38] RANI, Archana. East Japan Railway unveils hydrogen-powered train. *Railway Technology* [online]. 18. únor 2022 [vid. 2025-05-16]. Dostupné z: https://www.railway-technology.com/news/japan-railway-hydrogen-train/

[39] BEVAN, A. I., A. ZÜTTEL, D. BOOK a I. R. HARRIS. Performance of a metal hydride store on the "Ross Barlow" hydrogen powered canal boat. *Faraday Discussions* [online]. 2011, **151**(0), 353–367. ISSN 1364-5498. Dostupné z: doi:10.1039/C0FD00025F

[40] HAASE, Oliver, Apenbrink ,Sebastian, Krebs ,Sabo Raoul, Segieth ,Peter a Gerd AND HOLBACH. Design and system integration of a hybrid inland push boat powered by hydrogen fuel cells and Li-ion NMC batteries and the challenge of providing a bunkering infrastructure. *Ship Technology Research* [online]. 2020, **67**(2), 61–68. ISSN 0937-7255. Dostupné z: doi:10.1080/09377255.2018.1523979

[41] *Vodík a jeho potenciál v letectví | EASA* [online]. [vid. 2025-05-16]. Dostupné z: https://www.easa.europa.eu/cs/light/topics/hydrogen-and-its-potential-aviation

[42] PRATT, Joseph W., Leonard E. KLEBANOFF, Karina MUNOZ-RAMOS, Abbas A. AKHIL, Dita B. CURGUS a Benjamin L. SCHENKMAN. Proton exchange membrane fuel cells for electrical power generation on-board commercial airplanes. *Applied Energy* [online]. 2013, **101**, Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 776–796. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2012.08.003

[43] Non-Nuclear Submarines? Choose Fuel Cells. *U.S. Naval Institute* [online]. 1. červen 2019 [vid. 2025-05-17]. Dostupné z: https://www.usni.org/magazines/proceedings/2019/june/non-nuclear-submarines-choose-fuel-cells

[44] PATCHETT, Barnaby. Taking Flight: The Benefits of Hydrogen Fuel Cell Flight Systems. *AMS Composite Cylinders* [online]. 1. říjen 2024 [vid. 2025-05-17]. Dostupné z: https://ams-composites.com/taking-flight-the-benefits-of-hydrogen-fuel-cell-flight-systems/

[45] Executive Summary of the field experiment conducted by NATO ENSEC COE in the summer of 2023, utilizing Hydrogen Fuel Cell technology within the military environment. *NATO ENSEC COE* [online]. [vid. 2025-05-17]. Dostupné z: https://www.enseccoe.org/publications/executive-summary-of-the-field-experiment-conducted-by-nato-ensec-coe-in-the-summer-of-2023-utilizing-hydrogen-fuel-cell-technology-within-the-military-environment/

[46] ZHOU, Haiqin, Jiye XUE, Haobu GAO a Nan MA. Hydrogen-fueled gas turbines in future energy system. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2024, **64**, 569–582. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2024.03.327

[47] *Spoluspalování zeleného vodíku v kogenerační elektrárně třídy F ve Vídni - Gas Turbine World* [online]. [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: https://gasturbineworld.com/testing-green-hydrogen-chp-plant/

[48] *První test příměsi H2 na světě ve vídeňské plynové turbíně* [online]. [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: https://positionen.wienenergie.at/en/projects/hydrogen-test-in-power-plant/

[49] *Ohřev vodíkem se sníženým obsahem CO_2 | Viessmann CZ* [online]. 1. červenec 2024 [vid. 2025-05-19]. Dostupné z: https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/technologie/vytapeni-vodikem.html