



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# TECHNOLOGIE PRO VYUŽITÍ VODÍKU Z ENERGIEPARKU MAINZ

TECHNOLOGIES FOR USE HYDROGEN FROM ENERGIEPARK MAINZ

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tibor Florian

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

BRNO 2018



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Tibor Florian**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

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:

## **Technologie pro využití vodíku z Energieparku Mainz**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Mainz je jedním z prvních stanic na zkvalitňování vodíku ve větším měřítku pro jeho další využití. Student by se měl zabývat technologiemi pro využití takto získaného vodíku a energetickou efektivitou takové transformace energie.

### **Cíle bakalářské práce:**

- (1) Vodíkový cyklus v energetice.
- (2) Technologie Energiepark Mainz.
- (3) Porovnání jednotlivých technologií/vodíkových cyklů podle vybraných kritérií popřípadě s jinými způsoby akumulace a využití "přebytečné" energie podobných výkonů.

### **Seznam doporučené literatury:**

All For Power. Přebytečná energie z OZE do vodíku? Power to gas? Auta na vodu? Skutečnost nebo realita? Jak ve kterém státě? 05/2015. Praha: AF Agentura. ISSN 1802-8535.

PORŠ, Zdeněk. Palivové články, 2002. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s. Divize jaderné bezpečnosti a energetiky.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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



## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce je popsání vodíku, metod výroby, jeho následné použití a srovnání dle vybraných kritérií. Úvodní část je věnována popisu vodíku jako elementu, včetně jeho izotopů. Další pasáž se stručně věnuje jeho historii v energetice a nejpoužívanějším technologiím výroby v současnosti. Důraz je kladen na Power-to-Gas zařízení Energiepark Mainz. V poslední části je vodík jakožto palivo srovnáno v odvětví automobilového průmyslu.

### **Klíčová slova**

Vodík, Energiepark Mainz, Power-to-Gas, palivové články

## **Abstract**

The goal of this bachelor's thesis is the description of hydrogen, its production methods, subsequent use and comparison by selected criteria. In the beginning of the thesis, hydrogen is described as an element. The following chapter briefly deals with its history in energy industry and the most commonly used production technologies. The emphasis is on a Power-to-Gas facility, Energiepark Mainz. In the end, hydrogen is compared as a fuel in the automotive industry.

### **Key words**

Hydrogen, Energiepark Mainz, Power-to-Gas, fuel cells

## **Bibliografická citace**

FLORIAN, T. Technologie pro využití vodíku z Energieparku Mainz. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Technologie pro využití vodíku z Energieparku Mainz* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Škorpíka, Ph.D., s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne .....

.....

Podpis

## **Poděkování**

Velmi rád bych poděkoval Ing. Jiřímu Škorpíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi byly poskytnuty při vypracování závěrečné práce. Dále děkuji rodičům za vytvoření kvalitních podmínek pro studium.

# Obsah

Úvod .....	11
1 Vodík .....	12
1.1 Charakteristika a základní vlastnosti .....	12
1.2 Izotopy .....	12
1.2.1 Protium .....	12
1.2.2 Deuterium .....	12
1.2.3 Tritium .....	13
1.3 Rozšíření .....	13
1.4 Historie vodíku v energetice .....	13
2 Výroba vodíku .....	16
2.1 Parní reforming .....	16
2.2 Parciální oxidace .....	17
2.3 Zplyňování uhlí .....	18
3 Energiepark Mainz .....	20
3.1 Technologie .....	20
3.1.1 Elektrolýza .....	20
3.1.2 Kompresor .....	22
3.2 Shrnutí procesu .....	23
4 Praktická využití vodíku .....	25
4.1 Automobilový průmysl .....	25
4.1.1 Srovnání vybraných vozidel .....	29
4.2 Energetický průmysl .....	29
5 Závěr .....	31
Seznam použitých zdrojů .....	32
Seznam použitých symbolů, značek a zkratek .....	38
Seznam obrázků .....	39
Seznam tabulek .....	40



## Úvod

Energetika je neustále se zdokonalující a rozvíjející odvětví průmyslu, na níž je dnes postavena víceméně celá naše společnost, ať už se jedná o výrobu a distribuci elektrické energie nebo těžbu a zpracování uhlí, ropy či zemního plynu. Bez energetiky by tedy v podstatě selhaly některé další důležité součásti průmyslu. Zároveň je ale stále velmi závislá na fosilních palivech, a protože se jejich zásoby neodvratně vyčerpávají, je potřeba naléznout jiné alternativy.

V dnešní době je také stále více kladen důraz na ekologickou stránku věci. Jako příklady lze zmínit rozmach fotovoltaických a větrných elektráren nebo neustále rostoucí zájem o elektromobily – viz situace v Norsku [1]. To vede k bádání po nových, alternativních, zdrojích energie. Jako jeden z těchto „náhradních“ zdrojů je brán vodík, který mimo jiné figuruje v termonukleární fúzi (její výzkum je nicméně velmi finančně náročný, stále se tedy jedná pouze o teoretickou možnost, navíc je radioaktivní), ale také v plánech jako substituce za současné pohonné hmoty.

Je vodík skutečně nadějí budoucnosti? Může být konkurenceschopný proti současným konvenčním sokům? Cílem této práce je zodpovězení právě na tyto otázky.

# 1 Vodík

## 1.1 Charakteristika a základní vlastnosti

Vodík (latinsky Hydrogenium) je za standartní teploty a tlaku bezbarvý, netoxický plyn bez chuti a zápachu, který roku 1766 objevil britský fyzik a chemik Henry Cavendish. Vytváří molekuly obsahující jednoduchou kovalentní  $\sigma$ -vazbu, tzn. že největší elektronová hustota je na spojnici jader atomů. Obvykle se vyskytuje jako dvouatomová molekula, proto je velmi často používáno označení „H<sub>2</sub>“. Jde o nejjednodušší a se svojí relativní atomovou hmotností rovnou 1,008 zároveň o nejjednodušší chemický prvek. Za normálních teplot je vodík stabilním elementem a slučuje se pouze s fluorem a chlorem. Reaktivním se stává až za zvýšených teplot, kdy reaguje hlavně s kyslíkem a halogeny, přičemž k zahájení reakce je nutná inicializace [2].

Vodík je schopen vytvářet sloučeniny se všemi prvky s výjimkou vzácných plynů. K nejčastějším případům patří spojení s uhlíkem, kyslíkem, sírou nebo dusíkem. Jde tedy o esenciální prvky organické chemie. V ostatních případech jde zpravidla o nepřímou reakci. V periodické tabulce prvků je také oblast nazývaná jako vodíková mezera, což jsou elementy, které mají velmi nízkou afinitu k vodíku a netvoří s ním binární sloučeniny. Patří sem například zlato, stříbro, mangan, železo nebo kobalt.

Mezi další vlastnost vodíku spadá rovněž vysoká hořlavost – ke vznícení a hoření samotnému stačí pouze malé množství energie. Zároveň má také široké rozmezí hořlavosti, což znamená, že může hořet, pokud jeho zastoupení v objemu vzduchu je přibližně od 4 do 77 procent [3]. Plamen má bledě modrou barvu a za denního světla je téměř neviditelný, většinou navíc ani neprodukuje kouř, tudíž ho prakticky nelze spatřit lidským okem.

Studium energetiky a vaznosti vodíku hrálo také klíčovou roli v oblasti kvantové mechaniky, neboť jde o jediný neutrální atom, pro který může být Schrödingerova rovnice řešena analyticky.

## 1.2 Izotopy

V přírodě se vodík vyskytuje ve třech izotopech – protium, deuterium a tritium. Pak také ještě existují další čtyři izotopy, které jsou ale vysoce nestabilní a těžké, tudíž se rozpadají na tritium, případně deuterium a neutrony.

### 1.2.1 Protium

Protium je nejběžnějším a nejrozšířenějším izotopem vodíku, jehož jádro je tvořeno pouze jedním protonem. Bývá také často nazýván jako vodík-1 a označován <sup>1</sup>H. U ostatních izotopů je použit analogický systém jmen a značek. Protože jeho rozpad nebyl nikdy zaznamenán, je brán jako stabilní.

Variant aplikace protia je vícero. Jednou z možností využití je jako účinné redukční činidlo při přípravě určitých kovů, například wolframu. Dále nalézá své uplatnění u sváření v podobě kyslíko-vodíkového plamene, který vytváří vysoké teploty. V neposlední řadě také stojí za zmínku jeho přítomnost ve vzducholodích.

### 1.2.2 Deuterium

Těžký vodík, jak bývá rovněž deuterium nazýváno, obsahuje ve svém jádře jeden proton a jeden neutron. Pokud je tento izotop přítomen v molekule vody namísto protia, hovoří se o těžké vodě. Produkuje se uvnitř hvězd, nicméně rychlost jeho destrukce je vyšší než rychlost



vzniku, a další přirozené procesy vytváří pouze zanedbatelné množství. Naprostá většina deuteria přítomného v přírodě tedy pochází až z velkého třesku.

Jádra deuterií, deuterony, jsou schopna vyvolat několik nukleárních transformací za relativně nízkých energií. Využívají se tedy při výrobě vodíkových bomb a také z tohoto důvodu bylo nejen během druhé světové války velmi aktivní téma těžké vody. Kvůli malé absorpci neutronů je deuterium aplikováno jako moderátor při nukleárních reakcích, aby docházelo ke zpomalování právě rychle se pohybujících neutronů. Vyjma těchto oblastí lze deuterium a jeho sloučeniny použít při studiu mechanismů různých chemických a metabolických reakcí v lidském těle.

### **1.2.3 Tritium**

Tritium je radioaktivním izotopem vodíku, jehož jádro se skládá z jednoho protonu a dvou neutronů. Jeho přirozený výskyt na Zemi je extrémně vzácný, stopová množství jsou vytvářena během interakce atmosféry a kosmického záření. Vznik také nastává v nukleárních reaktorech během zachycování neutronů na lehkých prvcích v jaderném palivu nebo chladivu. Někdy je tedy tritium bráno jako odpadní produkt, jehož přítomnost může představovat zdravotní riziko.

Uplatnění tritium nalézá jako možný umělý indikátor v chemii, medicíně a biologii, dále má potenciál v termonukleárních procesech. Jeho radioaktivita způsobuje luminiscenci, která se používá například u hodinek, mířidel zbraní nebo nouzových svítidel. Obdobně jako u deuteria, jádra tritia se využívají u některých nukleárních transformací.

## **1.3 Rozšíření**

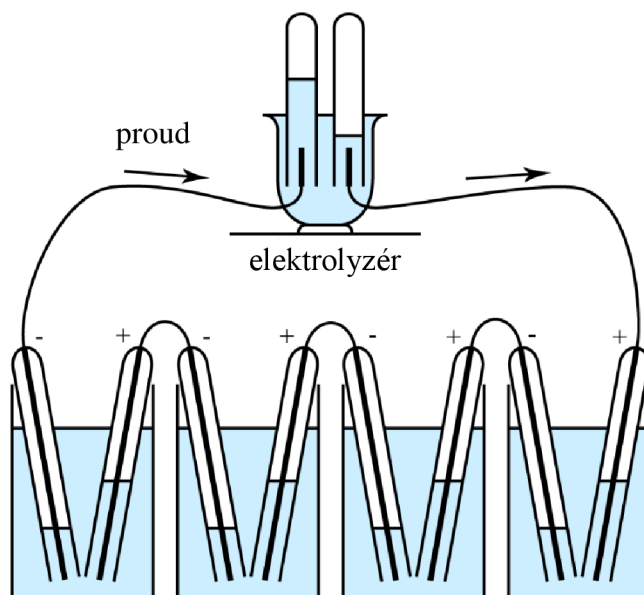
Vodík je nejhodněji se vyskytujícím prvkem ve vesmíru, kde představuje přibližně 75 hmotnostních procent [4]. Velké množství je obsaženo ve hvězdách, například ve Slunci, nebo v plynných obrech. V naší sluneční soustavě to jsou Jupiter, Saturn, Uran a Neptun. Se vznikem hvězd jsou také spojena molekulární mračna, která tvoří převážně molekuly  $H_2$ . Napříč vesmírem je vodík přítomen hlavně v atomárním nebo ionizovaném stavu, přičemž vlastnosti jsou odlišné od molekulárního vodíku. V případě plasmy nejsou proton a elektron vázány dohromady, z čehož plyne velmi vysoká elektrická vodivost a emisivita. Nabité částice jsou velmi ovlivněny magnetickými a elektrickými poli. Kupříkladu během solárního větru dochází k jejich interakci s magnetosférou Země, což zapříčiňuje vznik Birkelandových proudů a polární záře [5].

Na Zemi vodík za normálních podmínek existuje jako dvouatomový plyn a patří do první desítky nejrozšířenějších prvků. Běžný však není jeho výskyt v čisté formě, jelikož se snadno slučuje s ostatními prvky a vytváří například uhlovodíky nebo vodu. Jestliže na Zemi dojde ke vzniku elementární formy  $H_2$ , ihned následuje k jeho stoupání a prchnutí do vesmíru. Je to z toho důvodu, že vodík je mnohem lehčí než okolní vzduch a zemská gravitace nemá dostatečnou sílu jej udržet.

## **1.4 Historie vodíku v energetice**

Ačkoli je dnes vodík běžně brán jako palivo budoucnosti, byl ve velké míře používán jako surovina v průmyslu syntetických paliv, v chemickém, petrochemickém průmyslu, nebo i v oblasti rafinace ropy již přibližně 60 let.

Už v roce 1839 britský vědec William R. Grove odhalil, že vodík s kyslíkem mohou skýtat elektrický proud [6]. Vytvořil tak návrh rané formy palivového článku, který se skládal z platinových elektrod, jejichž konce byly ponořené v kyselině sírové, brané jako elektrolyt, a opačné konce byly obklopeny kyslíkem a vodíkem. Celý koncept fungoval na principu inverzního děje k elektrolyze vody. Hodnota velikosti napětí se pohybovala přibližně kolem 1 V [7]. V praxi byl nicméně nepoužitelný.



**Obr. 1.1** Groveův kyslíko-vodíkový článek [8]

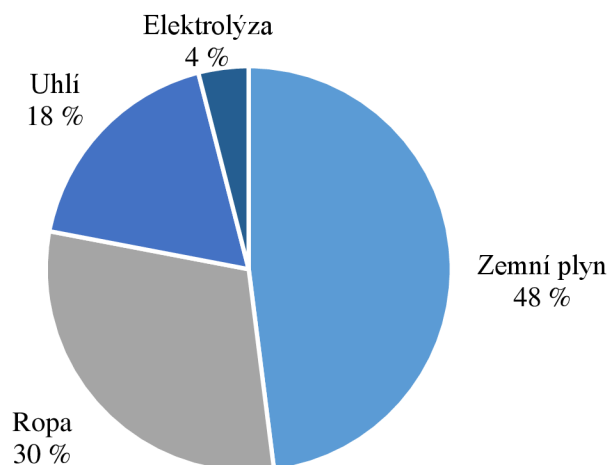
Patrně první úspěšný aparát obsahující palivové články byl vyvinut až roku 1932 britským inženýrem Francisem Baconem. Nahradil kyselý elektrolyt zásaditým, přesněji hydroxidem draselným, tudíž už nehrozil vznik koroze na elektrodách. Přibližně o 20 let později pak sestrojil článek o výkonu 5 kW, který byl provozován s čistým vodíkem a kyslíkem. Anodu představovala dvojitá vrstva porézní vrstvy niklu, katoda pak byla tvořena porézní strukturou oxidu nikelnatého [7]. Konjunktura palivových článků nastala až v 60. letech 20. století, kdy byly aplikovány agenturou NASA jako zdroj elektřiny vesmírných modulů Gemini a Apollo, podílely se tedy na úspěchu přistání na Měsíci. V případě Apolla došlo k použití celkem 3 jednotek článků, v jedné jednotce bylo obsaženo 31 sériově zapojených článků. Jako elektrolyt byl opět použit hydroxid draselný.

Vodík má také pestrou historii v domácnostech i továrnách jako palivo. Konkrétně jde o koksárenský plyn, směs obsahující kolem 60 % vodíku, 20 % metanu, a ostatní plyny, včetně 9 % oxidu uhelnatého, který byl v 19. století používán k osvětlení, především ve Velké Británii. Vzniká při koksování černého uhlí a před jeho dalším použitím je potřeba jej vyčistit od nepříznivých látek, např. amoniak, sulfan nebo dehet [9]. Později byl nahrazen svítiplynnem, což byl technický plyn skládající se rovněž z vodíku, jenž tvořil polovinu celkové směsi, dále oxidu uhelnatého, metanu a dalších plynů. Svým složením se tedy velmi podobal koksárenskému plynu. Jeho největší rozmach přišel v druhé polovině 19. století, a jeho popularita se přenesla až do 20. století, kdy byl pokládán za cenné palivo a nejehospodárnější prostředek k topným účelům. Byl používán především v domácnostech, ale své uplatnění našel i v průmyslu, např. při letování, žihání, kalení, svařování, řezání nebo tavení kovů. Tedy všude tam, kde bylo zapotřebí dosáhnout vysokých teplot [10].

Dnes je velmi významným uživatelem vodíku v oboru paliv NASA. K prvním pokusům docházelo na začátku 50. let 20. století, k realizaci až v polovině 60. let, tedy v podstatě společně s palivovými články. Vodík je zde využíván ve svém kapalném skupenství v kombinaci s kapalným kyslíkem k pohonu hlavních motorů. První raketou využívající tuto alternativu byla Atlas-Centaur [11], dále například rakety Saturn I a Saturn V [12]. Programy NASA zároveň velmi přispěly k rozvoji bezpečné produkce tekutého vodíku ve větším množství [13].

## 2 Výroba vodíku

Protože se vodík ve své čisté formě v přírodě vyskytuje pouze velmi zřídka, musí být extrahován z dalších sloučenin. Stále více se bere ohled na nízké výrobní náklady a životní prostředí, cílem je tedy vyhnout se znečištění oxidem uhelnatým nebo uhlíčitým. Přesto se také nesmí zapomenout na efektivitu. V poslední době produkce probíhá především ze zemního plynu, který se skládá hlavně z metanu, dále ropy, uhlí, menší část pak zaujímá proces elektrolýzy vody [14].



**Obr. 2.1** Zdroje pro výrobu vodíku

Z výše uvedeného grafu je zřejmé, že zhruba 96 % vodíku pochází z fosilních paliv, vysoký podíl zemního plynu je především dán tím, že se na dně oceánů nachází velké rezervy metanu. Za účelem dosažení tíženého prvku z těchto zdrojů je využíváno několika metod, jde například o parní reforming, parciální oxidaci či zplyňování uhlí.

### 2.1 Parní reforming

Po mnoho let tato metoda patří k těm vůbec nejpoužívanějším [15], [16]. Uskutečňuje se při vysokých teplotách, zhruba 750–800 °C, a tlacích 3–5 MPa za přítomnosti katalyzátoru většinou na bázi oxidu nikelnatého. Nikl se používá především z důvodu své relativně nízké ceny i přesto, že je méně aktivní než např. rubidium nebo rhodium [17]. Jde o vysoce endotermický proces – aby docházelo k reakci, je potřeba do soustavy přivádět teplo. Metan reaguje s vodní párou a vzniká oxid uhelnatý, oxid uhlíčitý a vodík. Aby se zamezilo usazování uhlíku na katalyzátoru a aby zároveň docházelo k posouvání rovnováhy směrem k reakčním produktům, musí být poměr vodní páry ku metanu přibližně 3:1. Parní reforming může být použit i u jiných paliv, např. etanolu, propanu nebo dokonce benzínu [18].

*Reformní reakce*

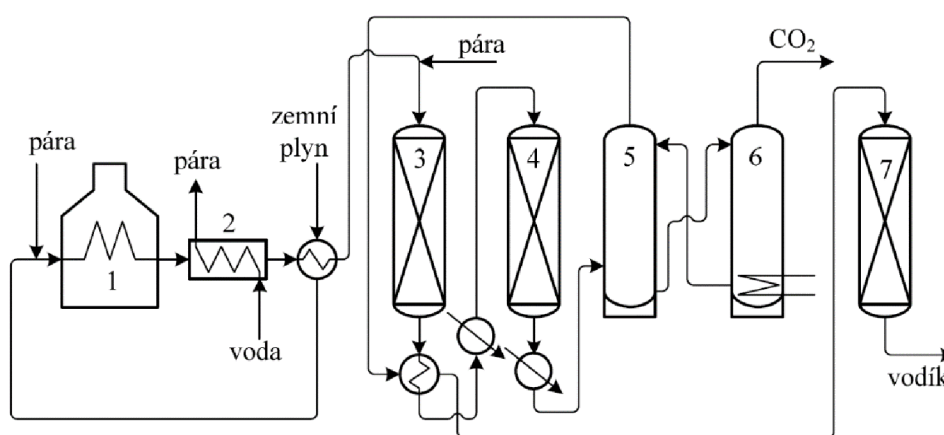


Produkty reakce se poté o teplotě asi 750 °C vedou kotlem na výrobu páry a výměníkem, ve kterém se prudce ochladí na cirká 350 °C, následně do vysokoteplotních konvertorů, v nichž dochází k přeměně oxidu uhelnatého a vodní páry na oxid uhlíčitý a další vodík [19].

## Konverze oxidu uhelnatého



V konečné fázi je vodík od oxidu uhličitého separován a purifikován. Proces separace může být proveden několika postupy, přičemž třemi nejčastějšími jsou metoda „pressure-swing-adsorption“ (PSA) pro oddělení  $H_2$ , PSA pro separaci  $CO_2$  a následnou kondenzaci zbývající  $H_2O$ , a použití membrány k separaci  $H_2$ . Poslední jmenovaná technika je slibnou a rozvíjející se technologií, která je, podobně jako u PSA, schopna produkovat vysokou čistotu koncového vodíku (>99 %). Kovové membrány přitom operují v rozmezí teplot  $300\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$  a tlakovým rozdílem skrz membránu mezi  $0,1\text{--}4\text{ MPa}$  [16]. Zjednodušené schéma parního reformování je uvedeno na obr. 2.2, kde je jednotka PSA nahrazena absorberem, desorbérem a metanizačním reaktorem.



**Obr. 2.2** Schéma parního reformování zemního plynu

1 – pec, 2 – kotol na výrobu páry, 3 – vysokoteplotní konvertor CO, 4 – nízkoteplotní konvertor CO, 5 – absorbér  $CO_2$ , 6 – desorbér  $CO_2$ , 7 – metanizér [19]

K výhodám tohoto postupu patří jeho vysoká efektivita, pohybující se kolem 72–85 %, a relativně nízké náklady, v porovnání s dalšími komerčně dostupnými produkčními metodami, nicméně bohužel dochází i ke tvorbě skleníkových plynů. Množství znečištění a  $CO_2$  je přibližně na stejné úrovni jako při přímém spalování zemního plynu – na 1 kg  $H_2$  se vyprodukuje 7,05 kg  $CO_2$  [20], [21].

## 2.2 Parciální oxidace

Jde o poměrně rozšířený způsob výroby, jehož princip je založen na reakci uhlovodíků s nedostatečným množstvím kyslíku, ke které dochází při teplotách  $1200\text{--}1600\text{ }^\circ\text{C}$  a tlacích do 15 MPa. Potřebné množství kyslíku pro úplnou transformaci uhlovodíků je dáno v rovnici (2.4), která je velmi exotermní [19].

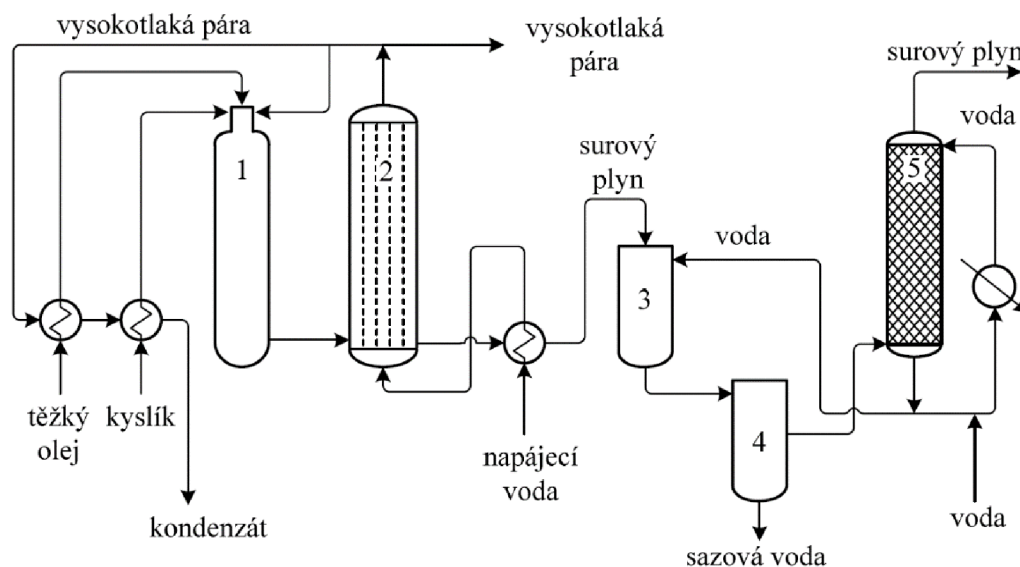


Hlavními produkty jsou tedy oxid uhelnatý a vodík, nicméně během reakce dochází ke vzniku i jiných látek, např.  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$  nebo  $H_2S$ . Nežádoucím vedlejším produktem jsou saze. Vznikají termolýzou základní suroviny a na chladnějších místech v kotli na výrobu páry (rovnice (2.5), resp. (2.6)). Jejich kvantitu lze omezit vyšší teplotou, avšak za cenu vyšší

spotřeby kyslíku. Množství vytvořeného vodíku se dá navýšit přidáním vodní páry, která endotermicky reaguje s uhlovodíky. Zároveň se i zabrání nadměrnému vzrůstu teploty [22].



Jako základní surovina se nejčastěji používají těžké ropné frakce, např. olej. Zjednodušené schéma tohoto případu je znázorněno na obrázku 2.3. Rozehřátý těžký olej vstupuje do směsi vodní páry a kyslíku jemným rozprašováním v hořácích a dále pak postupuje do generátoru, kde se přemění na plyn. Ve své plynné podobě se o teplotě přibližně 1350 °C vede do kotle na výrobu vodí páry, kterým prochází vysokou rychlostí za účelem neusazování vznikajících sazí. Během tohoto prostupu dochází k ochlazení plynu na teplotu o několik stupňů vyšší, než je teplota nasycené vodní páry a zároveň dochází ke vzniku vysokotlaké páry. Plyn vzniklý v generátoru se poté ochlazuje v chladiči nástřikem vody, přičemž se odstraní většina sazí. Zbytkové množství se odlučuje ve vodní pračce.



**Obr. 2.3** Schéma parciální oxidace  
1 – generátor, 2 – kotel, 3 – chladič, 4 – separátor, 5 – pračka [19]

Výhodou této metody je fakt, že základní surovina může obsahovat síru, takže není třeba nákladného odsířování a celý proces je autotermní. Na druhé straně hlavní nevýhodou je nutná přítomnost kyslíku o vysoké čistotě 95–99 %. Ten je ve většině případů vyráběn destilací vzduchu, tudíž je nutná přítomnost zařízení na jeho produkci, což zapříčiňuje navýšení jak investičních, tak i provozních nákladů celého procesu [19], [22].

## 2.3 Zplyňování uhlí

Po chemické stránce je uhlí velmi komplexní látka, která může být přeměněna na širokou škálu produktů. Metoda zplyňování je tedy pouze jednou z mnoha těchto přeměn. Funguje na principu tepelného rozkladu a heterogenní reakce, při které dochází k interakci mezi zbytkem v pevném stavu, který přetrval v procesu po tepelném rozkladu, a plynem obsahujícím kyslík – může jít i o běžný vzduch. Vše probíhá za vysokých teplot, obvykle kolem 1300 °C, což vede k vysoké přeměně uhlí, ale zároveň i jeho velké spotřebě. To má za následek i zvyšování množství kyslíku. Využívá se čtyř typů generátorů, přičemž k výrobě vodíku je nejvíce

způsobilý generátor s unášeným ložem pevné fáze se souproudým uspořádáním toků pevné a plynné fáze [23].

V první fázi procesu dochází k exotermnímu spalování uhlíku na  $\text{CO}_2$  (rovnice (2.7)). Ten posléze reaguje s horkým uhlíkem na  $\text{CO}$ , v tomto případě již endotermicky (uvedeno v rovnici (2.8)). V některých literaturách se lze setkat s označením Boudouardova reakce.



Následujícím krokem je vznik oxidu uhličitého a vodíku z oxidu uhelnatého a vodní páry.

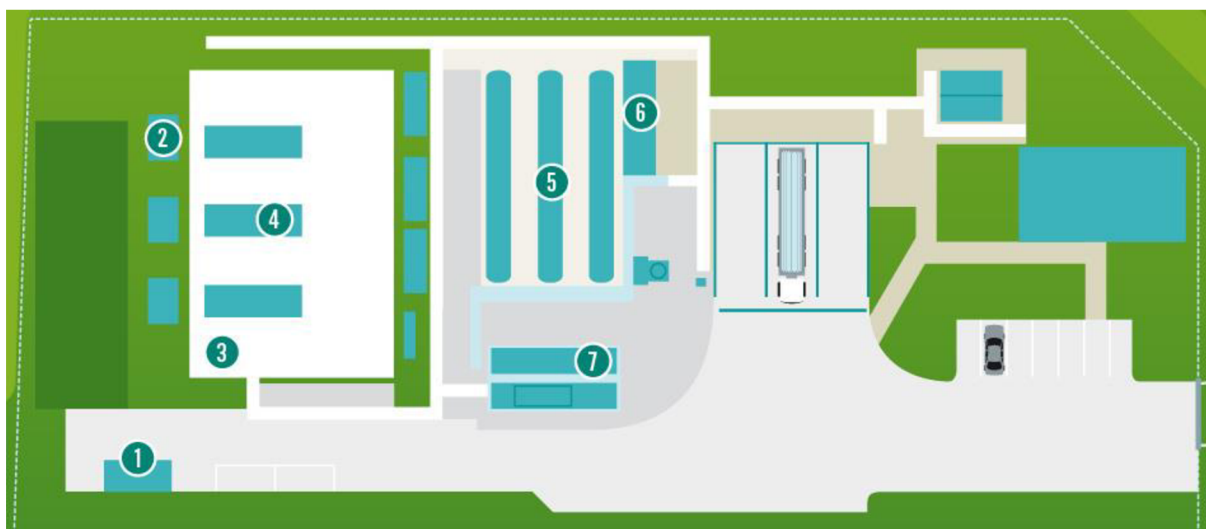


Jako základní surovina nemusí být použito pouze uhlí, lze aplikovat i jiné uhlíkaté materiály jako rašelinu, lignit, antracit nebo dřevo. Metoda zplyňování má poměrně velkou tradici, nicméně v porovnání s parním reformingem má vyšší výrobní cenu vodíku. To může být způsobeno např. čištěním odpadních produktů, které by v pozdějších fázích procesu neměly příznivý dopad na výsledek [22].



### 3 Energiepark Mainz

Po celém světě existuje mnoho zařízení a komplexů, ve kterých se vyrábí vodík. Jedním z nich je i Energiepark Mainz. Jak už název napovídá, nachází se na západě Německa ve městě Mohuč a zajímavý je tím, že se jedná o největší zařízení na výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů na světě. Bylo vybudováno k poskytnutí pomocných služeb pro místní rozvodnou síť a zároveň i ke zkoumání možností technologie PEM ve větším měřítku. Plánování výstavby začalo v druhé polovině roku 2012, konkrétně v říjnu, samotná stavba pak o 2 roky později a k oficiálnímu spuštění došlo začátkem července 2015. Celý projekt je výsledkem kolaborace několika společností, a to Stadtwerke Mainz, Linde, Siemens a v neposlední řadě vysoké školy RheinMain.



**Obr. 3.1** Schéma areálu

1 – připojení el. sítě, 2 – usměrňovač, 3 – úpravna vody, 4 – elektrolyzér,  
5 – skladování plynu, 6 – připojení k plynovodu, 7 – kompresor [24]

#### 3.1 Technologie

Zařízení Energiepark Mainz je založeno na principu využívání energie z větrných elektráren, pomocí které dochází k výrobě vodíku metodou elektrolýzy. K tomu jsou využívány 3 elektrolyzéry od společnosti Siemens fungující na principu proton-výměnné membrány, přičemž maximální výkon každého z nich je 2 MW. V době uvedení do provozu šlo o nejvýkonnější elektrolyzéry tohoto typu na světě. Ke stlačování vzniklého vodíku dochází v kompresoru společnosti Linde. Využívá se zde válců, které obsahují iontové tekuté soli, díky kterým se zvyšuje energetická efektivita. Praktických využití konečného produktu je více, namátkou lze uvést zpětnou přeměnu na elektrinu, využití v plynových elektrárnách nebo další uskladnění, pokud se poptávka po vodíku zvýší [25].

##### 3.1.1 Elektrolýza

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2, elektrolýza vody patří k méně častým metodám výroby vodíku. Z hlediska vody jakožto zdroje jde ale o nejdůležitější způsob a zároveň ekologicky nejpřívětivější. Získaný vodík má vysokou čistotu, která může dosahovat až 99,999 obj. %. Jedná o proces, při němž dochází k rozložení vody na vodík a kyslík pomocí aplikace elektrické energie. Elektrický proud teče mezi dvěma elektrodami, které jsou ponořeny v elektrolytu za účelem zvýšení iontové vodivosti. Elektrody by měly být odolné vůči korozi, dobře elektricky



vodivé a vykazovat vhodnou strukturální celistvost. Elektrolýza také vyžaduje implementaci diafragmy nebo membrány, aby se zamezilo rekombinaci vodíku s kyslíkem.

Konkrétních technologií elektrolýzy je více. Nejvyspělejší z nich je alkalická elektrolýza, která je bezpečná a zároveň i spolehlivá. Další možností je kyselá elektrolýza s polymerním membránovým elektrolytem, obecně známá jako PEM. Jak již bylo zmíněno, tento způsob našel své uplatnění také v Energieparku Mainz. Za pozornost také stojí elektrolýza s pevnými oxidy, jejíž technologické přednosti z ní mohou udělat nejefektivnější technologii elektrolýzy [26]. Následující odstavce budou zaměřeny na druhý jmenovaný postup – PEM.

Historicky první koncept dnešní PEM vznikl na přelomu 50. a 60. let 20. století, kdy bylo využito pevné sulfonované polystyrenové membrány jako elektrolytu. Roku 1966 pak vyvinula firma General Electric první vodní elektrolyzátor [27], [28], který sloužil pro speciální účely, jako např. u kosmických lodí nebo ponorek [29]. O 12 let později došlo k jeho komerčnímu použití.

Základní princip je popsán následující endotermickou rovnicí:

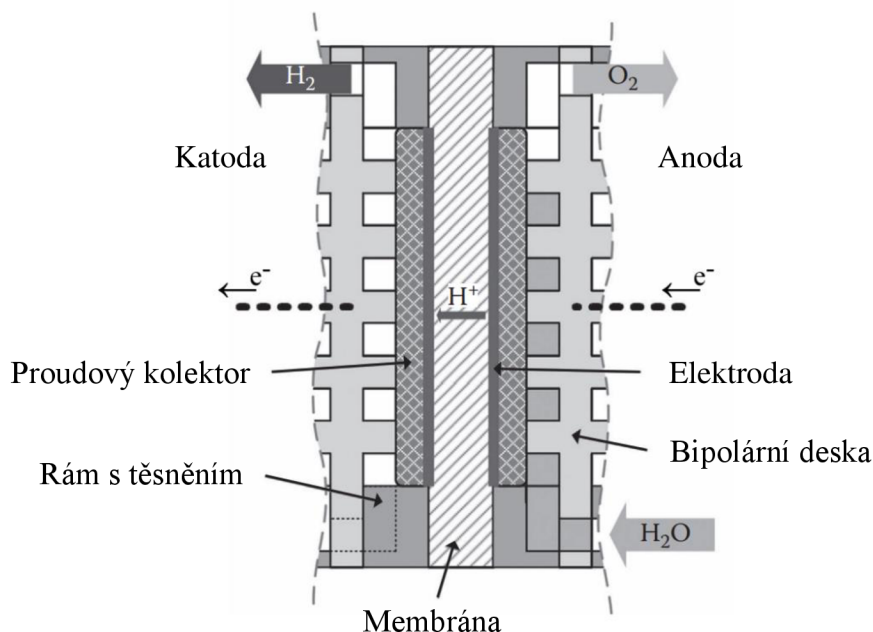


Voda na levé straně rovnice je ve stavu kapaliny, prvky na pravé straně jsou pak ve skupenství plynném. K rozkladu vody se využívá stejnosměrný proud o napětí vyšším, než je termoneutrální napětí, tedy přibližně 1,482 V [30]. Termoneutrální napětí je takové minimální termodynamické napětí, při kterém je perfektně izolovaný elektrolyzátor schopen operovat, a to za podmínky nulové energetické bilance [31]. Během procesu dochází k přijetí nebo odevzdání elektronů na povrchu elektrod, které jsou typicky tvořeny platinou nebo její slitinou [30]. Celá elektrolytická reakce se skládá ze dvou elektrochemických reakcí. Oxidační část se uskutečňuje na anodě, kterou elektrony opouští (rovnice (3.2)). Redukční část reakce probíhá na katodě, kdy elektrony proudí na elektrodu a polarizují ji záporně (rovnice (3.3)). Z toho plyne, že vodík je generován na katodě [32].



Polymerová membrána je zodpovědná za vysokou protonovou vodivost, nízké mísení plynů a vysokotlaké operace. Proto musí splňovat určité množství vlastností – vysoká oxidační stabilita, nízká permeabilita plynů, která snižuje riziko vzniku hořlavých směsí, vysoká iontová vodivost, dobrá mechanická, chemická a termální stabilita aj [28]. Tloušťka takovéto membrány se obvykle pohybuje v rozmezí 20–300 μm, transportní dráhy protonů jsou tedy krátké, a tudíž jsou sníženy ohmické ztráty [26], [33].

Velkou výhodou technologie PEM je, oproti alkalické elektrolýze, mnohem vyšší proudová hustota, která může dosahovat hodnoty až 2 A·cm<sup>-2</sup>. To umožňuje redukcí provozních nákladů. Pro porovnání, u alkalické elektrolýzy se nejčastěji uvádí 0,4 A·cm<sup>-2</sup> [33]. Protože transport protonů napříč membránou je schopen rychle reagovat na kolísání výkonu, vzniká zajímavá vlastnost elektrolyzátoru – schopnost pracovat při proměnlivých režimech napájení [34]. Celková konstrukce elektrolytického článku je velmi kompaktní. To dovoluje mj. rychlé rozehrání i ochlazení, článek totiž běžně pracuje při teplotách 50–80 °C [35]. Na druhé straně je problémem cena. Membrána ve formě pevného elektrolytu je stále dražší než použití kapaliny u alkalické technologie.



**Obr. 3.2** Zjednodušený model jednoho elektrolytického článku technologie PEM [26]

V Energieparku Mainz jsou použity 3 elektrolyzéry SILYZER 200 od společnosti Siemens. V běžném provozu každý z nich dosahuje výkonu 1,25 MW, nejvýše pak 2 MW. Zároveň jde o první elektrolyzér svého druhu, který překročil hranici 1 MW. Další technická data jsou uvedena v tabulce 3.1 [36].

**Tab. 3.1** Základní technické informace o elektrolyzérovi SILYZER 200

Údaj	Hodnota
Jmenovitý výkon zásobníku	1,25 MW
Jmenovitá produkce H <sub>2</sub>	225 Nm <sup>3</sup> /h
Čistota H <sub>2</sub>	99,5–99,9 %
Výstupní tlak	až 3,5 MPa
Rozměry	6,3×3,1×3,0 m
Váha	17 t
Celková efektivita systému	65–70 %
Konstrukční životnost	> 80 000 h

### 3.1.2 Kompresor

Kompresor na bázi iontových kapalin je jednou z neodmyslitelných komponent celého parku a slouží k izotermickému stlačení vodíku, který posléze putuje do skladovacích nádrží, plynovodů nebo cisteren. Iontová kapalina plní, díky své velmi nízké stlačitelnosti, funkci jakéhosi tekutého pístu a slouží k mazání, chlazení a utěsnění hydraulicky řízeného kompresoru bez toho, aniž by do vodíku přidávala jakékoliv nežádoucí látky. Jednotka byla navržena pro širší spektrum provozu, zahrnující rychlé změny zatížení (v závislosti na výstupu z elektrolyzérovi) nebo vysokou efektivitu při částečném zatížení. Další funkcí je integrované sušení vodíku. Účinnost takového zařízení je mnohem vyšší oproti standardním kompresorům, protože množství pohybujících se částí je sníženo na minimum. Výrobce, Linde, uvádí, že původních zhruba 500 takových částí bylo zredukováno na 8. V porovnání s běžnými pístovými kompresory úspora energie činí přibližně 40 % [37], [38].

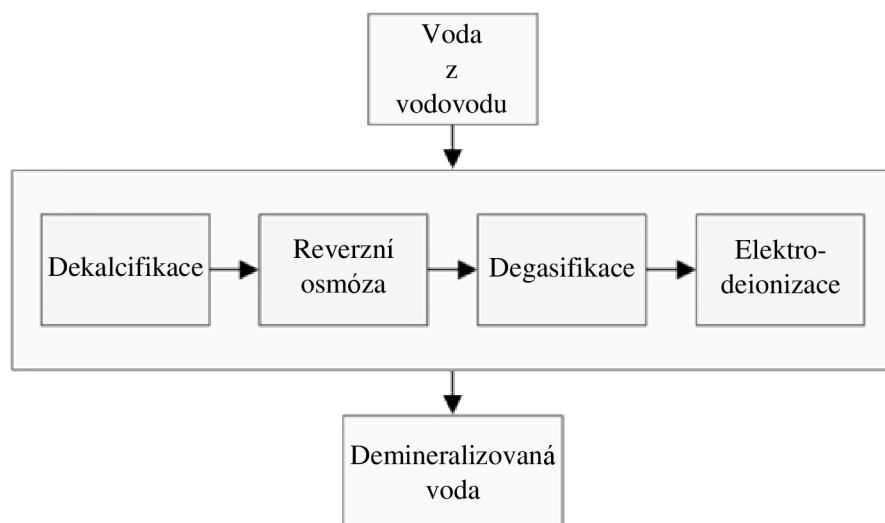
Užitá iontová kapalina je látka, častokrát označovaná jako sůl, skládající se z organického kationtu a anorganického nebo organického aniontu. Organický kation bývá objemná nesymetrická skupina obsahující kvartérní atom dusíku, eventuálně fosforu či síry. Jako anion se nejčastěji uplatňují tetrachloroaluminát ( $\text{AlCl}_4^-$ ), tetrafluoroborát ( $\text{BF}_4^-$ ) a hexafluorofosfát ( $\text{F}_6\text{P}^-$ ). K hlavním výhodám kapaliny patří vysoká chemická, elektrochemická a teplotní stabilita, nízká toxicita, nehořlavost a nízká tenze par. Příhodnou kombinací aniontu a kationtu je také možno ovlivnit její vlastnosti a dokonale tak přizpůsobit látku na konkrétní úkol, který má plnit. Z toho důvodu se lze často setkat s označením „designer solvents“ [39], [40], [41].

Stěžejní funkce kompresoru se dělí na dvě etapy. Nicméně ještě před tím, než k nim dojde, je nutno provést úpravy výstupního produktu z elektrolyzéry. V prvním kroku je vodík katalyticky deoxidován a veškeré stopy po kyslíku jsou eliminovány. V druhé části je provedeno ochlazení na  $5\text{ }^\circ\text{C}$ , díky kterému zhruba 95 % vlhkosti zkondenzuje. Ta je pak odvedena pryč lapačem kondenzátu. Následně je vodík připraven vstoupit do první etapy kompresoru, kde dochází k postupnému stlačení pomocí již zmíněné iontové kapaliny. Na konci první fáze je vodík ještě jednou ochlazen a odvlhčen a posléze uložen v tlakových nádobách (o tlaku až 8 MPa a kapacitě přibližně  $10\ 000\ \text{Nm}^3$ ). Odtud je přesunut buď do plynové potrubní sítě nebo do 2. etapy, která je analogií etapy první a na jejímž konci může být vodík stlačen až na tlak 22,5 MPa a vlhkost zredukována o 99 % [42].

### 3.2 Shrnutí procesu

Energiepark Mainz je prvním zařízením typu Power-to-Gas (někdy označováno jako PtG nebo P2G) ve větším měřítku. PtG je definováno jako technologie přeměňující přebytečnou elektrickou energii na plynná paliva – v tomto případě vodík. Zdroj elektrické energie představují obnovitelné zdroje, hlavně větrné a solární elektrárny. PtG systém v Mohuči je připojen na přílehlý větrný park o celkovém výkonu 8 MW. Aby byla elektrická energie pro park použitelná, musí projít usměrňovačem. Je to z toho důvodu, že k elektrolyze je třeba stejnosměrný proud, nicméně větrná elektrárna generuje proud střídavý.

K elektrolytickému procesu je potřeba demineralizovaná voda, což je voda zbavená o významné množství rozpuštěných minerálních a organických látek, vyznačující se nízkou konduktivitou (schopnost látky vést elektrický proud). Z toho důvodu je v komplexu přítomna úpravná voda. Zjednodušený proces demineralizace je zobrazen na obrázku 3.3.



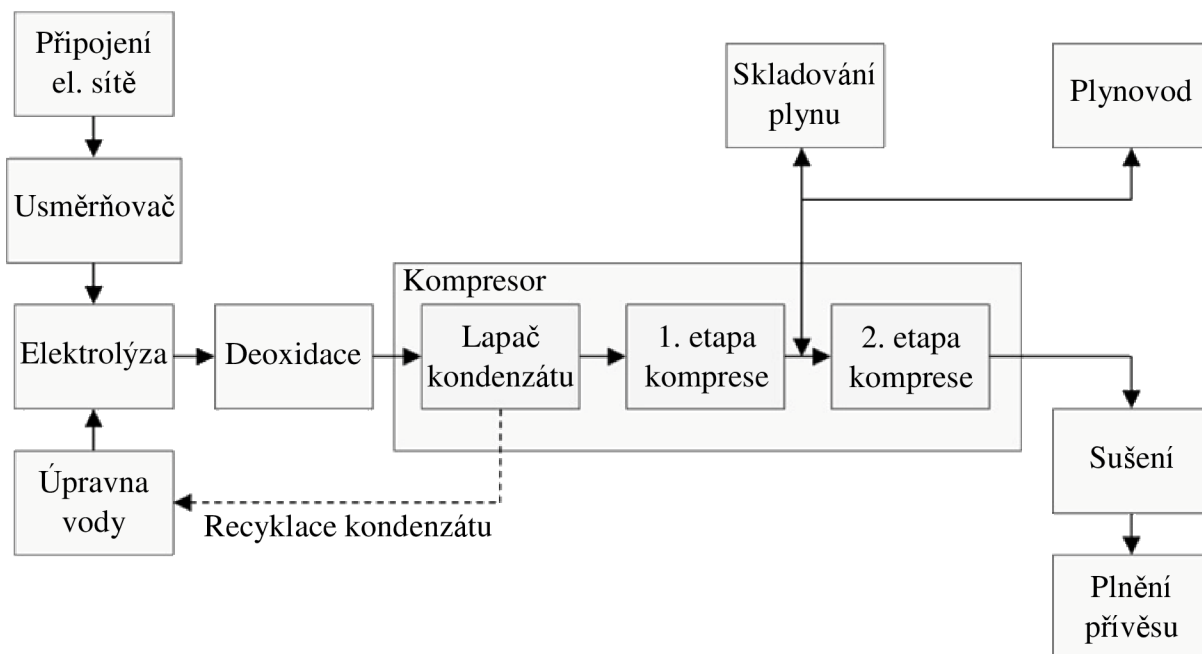
**Obr. 3.3** Proces demineralizace vody [24]

Původní voda je upravována celkem ve čtyřech krocích. V prvním je dekalcirována, což představuje odstranění přebytečného vápníku. Ve druhé fázi je použita reverzní osmóza, tedy technologie využívající semipermeabilní membránu k odstranění iontů, molekul, bakterií a všech větších částic [43]. Tato technika je využívána už více jak 60 let [44]. Protože reverzní osmóza neeliminuje plyny, je nutná degasifikace. V posledním kroku figuruje elektrodeionizace. Jde o separační proces „dočištění“ vody, který kombinuje elektrodialýzu a výměnu iontů, což má za následek odsolení vody a regeneraci měničů iontů elektrickým proudem [45]. I tato metoda je známá několik desítek let [46], [47].

Na výstupu z úpravny je voda připravena na proces elektrolýzy, který se uskutečňuje v již popsaných elektrolýzerech SILYZER 200, při němž dochází ke štěpení na vodík a kyslík. Surový vodík poté nejprve projde katalyzátorem (označován jako jednotka DeOxo), kde nastane deoxidace a následně transformace zbytkového množství kyslíku na páru. Vodík dále pokračuje do tlakových nádob nebo kompresoru. V druhém jmenovaném případě dochází ke kompresi na tlak až 22,5 MPa a následnému sušení vodíku. Před i po kompresi je významná část vlhkosti zkondenzována a recyklována zpět do elektrolýzéry, resp. úpravny vody. Zmíněné sušení se provádí metodou Temperature Swing Adsorption (TSA).

TSA je soubor procesů založených na pravidelných změnách teploty adsorpčního lože a slouží k další purifikaci vodíku. Vstřebávání je realizováno za nízkých teplot, při vysokých teplotách probíhá regenerace lože. Jde o variaci metody PSA (změny tlaku), nejběžnějšího postupu separace vodíku. Jeho popularita se odvíjí hlavně od kratších procesních časů. Na druhou stranu, TSA cyklus je více efektivní [48].

Po sušení je vodík naplněn do přívěsů (o tlaku 20 MPa), kde jsou kontinuálně měřeny hodnoty čistoty, teploty a tlaku. Přívěsy jsou určeny pro průmysl a vodíkové čerpací stanice. Vodík, který nepokračoval v procesu zpracování do kompresoru, nebo jej opustil již po první etapě, je vstřikován do distribuční sítě zemního plynu. Jde přibližně o 6–7 % z celkové produkce, která činí cirká 200 tun ročně [24], [49].



Obr. 3.4 Blokové schéma celkového procesu [42]

## 4 Praktická využití vodíku

### 4.1 Automobilový průmysl

Automobilový průmysl patří k těm největším na světě. Každý člověk totiž potřebuje cestovat z jakéhokoliv důvodu na různá místa, a nejpoblárnější volbou je pořád osobní automobil. Jen za rok 2017 bylo nových vozidel celkově prodáno zhruba necelých 80 milionů [50]. Protože ale nepoužívanější typy produkují nemalé množství výfukových emisních plynů, které přispívají mj. ke globální změně klimatu, je stále větší snahou nalézt za ně adekvátní substitute. Jednou z takových možností je i vodík, jemuž věří i samotné automobilky.

Použitý vodík je nosičem energie, která může být uvolněna dvěma způsoby. První možností je přímo ve spalovacím motoru, druhou pak přeměna na elektrický proud skrze palivový článek.

Historie spalovacích motorů na vodík však není krátká. Na počátku 19. století byl sestaven první pístový spalovací motor poháněný směsí vzduchu a vodíku. O několik let později, v roce 1820 ve Velké Británii, byl zaznamenán další pokus vyvinout motor využívající vodík. Celý mechanismus opět využíval vlastností směsi atmosférického vzduchu a vodíku (v objemovém poměru 2,5:1), která po zapálení explodovala a vytvářela nedokonalé vakuum sloužící k produkci výkonu [51]. V současné době jsou vodíkové motory s přímým spalováním pouze modifikací tradičních benzínových spalovacích motorů. Častokrát také vozidla s tímto typem pohonu obsahují i benzínovou nádrž, která se aktivuje po vyčerpání té vodíkové. V nádržích může být vodík skladován ve více formách – stlačený (při tlaku 35–70 MPa), zkapalněný, nebo ve formě pevných hydridů. Zkapalněný vodík musí být uchován v kryogenních nádržích, jelikož jeho teplota varu je  $-252,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  [3], [52].

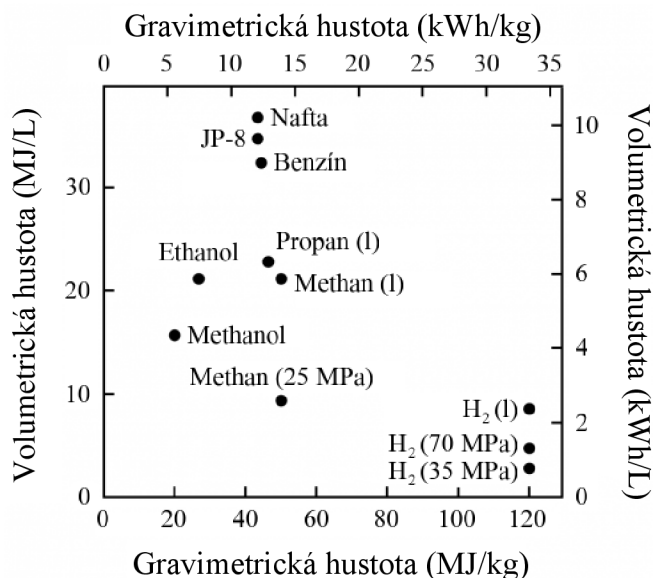
Hlavní výhodou vozidel s přímým spalováním vodíku jsou, stejně jako u těch využívající palivové články, takřka nulové emise. Při spalování se vodík mění na vodní páru, která se může vratným cyklem přeměnit znovu na vodu. Z toho plyne nulový dopad na životní prostředí. Nevýhod už lze nalézt více. Samotná spotřeba vodíku sice skoro žádné látky znečišťující ovzduší neprodukuje – pokud je použit čistý vodík, jediným produktem je voda, je-li ale použita směs vodíku se vzduchem, na výstupu jsou navíc i oxidy dusíku  $\text{NO}_x$ . Ty se vytváří z důvodu vysokých teplot ve spalovacích komorách. Vznikající množství takových oxidů je ovlivněno několika faktory:

- poměrem vzduch/palivo,
- kompresním poměrem motoru,
- otáčkami motoru,
- časováním zapalování.

Výroba vodíku již nicméně emise vytváří. Mohou být však určitým způsobem korigovány produkcí vodíku z obnovitelných zdrojů, např. právě jako v Energieparku Mainz. Zde se ale naráží na další negativní aspekt – cenu. Na rozdíl od získávání vodíku ze zemního plynu či ropy, rozklad vody patří k dražším metodám. V případě Energieparku Mainz se náklady pohybují kolem hodnoty 110 Kč/kg $\text{H}_2$  [42].

Další nevýhodou jsou oproti ostatním palivům horší parametry energetické hustoty, z toho důvodu musí vozidla na vodíkový pohon obsahovat větší nádrže než u konvenčních alternativ. Na druhou stranu, vodík má téměř trojnásobek energetického obsahu benzínu

(120 MJ/kg oproti 44 MJ/kg). Tyto údaje jsou zaznamenány na obr. 4.1, kde na vodorovné ose jsou znázorněny hodnoty energie na jednotku hmotnosti daného paliva, na svislé ose pak hodnoty energie na jednotku objemu [53].



**Obr. 4.1** Porovnání energií a energetických hustot vybraných paliv [53]

Nelze zapomenout ani na nedokonalou dostupnost vodíkových čerpacích stanic – zatímco např. v Německu se jich nalézá přibližně 40, v České republice je stále přítomna pouze jedna v Neratovicích [54]. Tento stav se má ale v blízké budoucnosti změnit, neboť do roku 2025 má být otevřeno minimálně dalších 12 stanic [55].

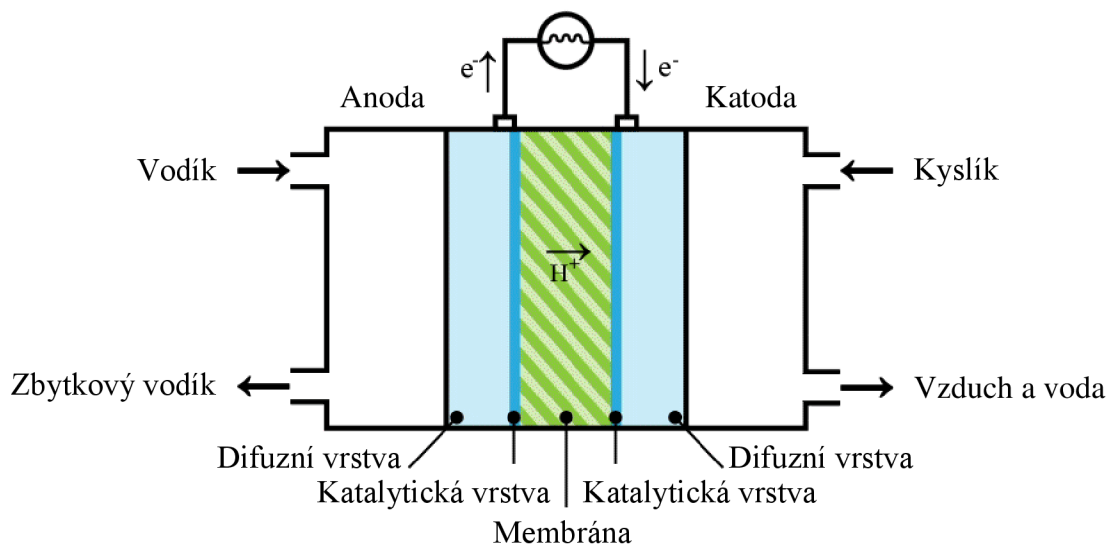


**Obr. 4.2** Vodíkové čerpací stanice v Evropě k dubnu 2018 [54]



Metodika přímého způsobu využití vodíku již v dnešní době není brána jako prioritní řešení budoucnosti, na druhou stranu úplně upuštěno od ní také není [56].

Vozidla na palivové články využívají vodík k pohonu elektrického motoru. Dochází k elektrochemickým procesům, jejichž základem je katalytická reakce. Ta je v podstatě převrácenou analogií elektrolýzy vody. Přiváděný vodík se na anodě štěpí na protony, které prochází membránou, a elektrony, které jsou vedeny elektrickým obvodem a tvoří elektrický proud. Po průchodu membránou se protony a elektrony vodíku vrácené z elektrického obvodu slučují s kyslíkem přiváděným z okolního vzduchu. Tím vzniká teplo a odpadní látka – voda.



**Obr. 4.3** Zjednodušené schéma palivového článku [57]

Podle různých kritérií, např. operační teplota, použité elektrolyty a elektrody nebo palivo, se palivové články dělí na více druhů. V automobilním průmyslu jsou nejoblíbenější články s polymerní membránou (PEMFC) na jejímž výstupu je voda v kapalném skupenství.

K hlavním výhodám patří největší proudová hustota a použití nekorozivních elektrolytů. Obvykle operuje v rozmezí teplot 60–100 °C, které jsou vhodné k rychlé změně požadovaného výkonu. Kvůli nízkým teplotám je také nutná přítomnost dvou vrstev z ušlechtilých kovů jako katalyzátoru. Tuto úlohu obvykle plní platina.

Další součástí PEMFC je difuzní vrstva, která umožňuje snadný průtok zúčastněných plynů. Je složena z porézních vodivých materiálů, jako je uhlíkové vlákno nebo uhlíkový papír, o tloušťce 100–400 μm. Zpravidla je nesmáčivá, což zajišťuje teflon či jiný speciální materiál. Je to z toho důvodu, aby nedocházelo k zaplavení katalytické vrstvy vodou a tím byl snížen její výkon [58].

Z vnější strany difuzní vrstvy je deska, jejíž význam spočívá v rozvodu plynu a vyvedení elektrického proudu. Bývá z kovu, grafitu nebo kompozitu, který splňuje určité charakteristiky, jako jsou lehkost, pevnost, elektrická vodivost aj. Všechny součásti pak tvoří jeden palivový článek, který je sériově seřazen do většího celku za účelem zvýšení celkového výkonu [7], [59], [60].

Účinnost jakéhokoliv zařízení pro přeměnu energie, a tedy i palivového článku, je definována jako poměr výstupní a vstupní užitečné energie. V případě PEMFC se na vstupu

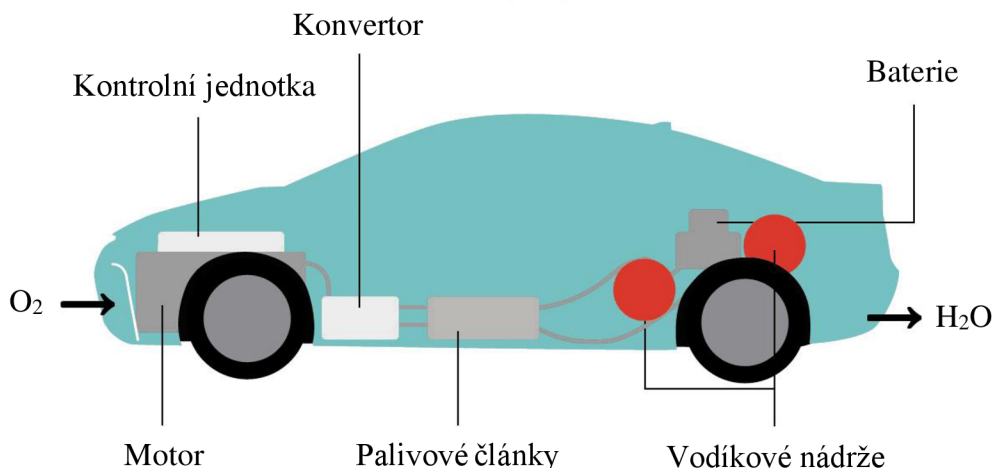
jedná o entalpii vodíku, měřenou jako množství tepla, které může být přeměněno na práci. Je-li všechna Gibbsova volná energie na výstupu článku konvertována na elektrickou energii, pak je maximální teoretická účinnost přibližně 83 %, viz rovnice (4.1). Tato hodnota platí pro 25 °C.

$$\eta_{max} = \frac{\Delta g_f}{\Delta H} = \frac{237,2}{286} = 0,83 \quad (4.1)$$

Reálná účinnost je dána rovnicí (4.2), kde v čitateli je napětí na výstupu a ve jmenovateli hodnota termoneutrálního napětí. V praxi jde přibližně o 40–50 % [60], [61].

$$\eta = \frac{U}{1,482} \quad (4.2)$$

Základní princip fungování vozidla na palivové články je v podstatě jednoduchý. V prvním kroku dochází k dodání okolního vzduchu a vodíku z vysokotlakých nádrží do palivového článku. Ten skrze chemickou reakci generuje elektrickou energii, která proudí do motoru a zároveň i do baterie. Ta slouží k uskladnění energie nashromážděné během zpomalování a asistuje palivovým článkům během akcelerace. Do motoru elektrická energie putuje skrz konvertor, jehož účelem je zvýšení výstupního napětí. Na vše dohlíží kontrolní jednotka, která optimalizuje výstup palivového článku a nabíjení a vybíjení baterie. Na konci celého procesu je odpadní produkt v podobě vody [62].



**Obr. 4.4** Hlavní komponenty vozidla na palivové články [62]

Výhody a nevýhody vozů na palivové články jsou víceméně stejné jako přímého spalování. Uvedeny jsou níže v tabulce 4.1.

**Tab. 4.1** Výčet výhod a nevýhod vozidel na vodík

Výhody	Nevýhody
Rozšíření vodíku	Vznik emisí při výrobě vodíku
Nulové emise při provozu	Drahá výroba vodíku
Výroba vodíku z obnovitelných zdrojů	Složité skladování vodíku
Rychlé doplňování paliva	Nedostupnost čerpacích stanic
Vysoký energetický výdej vodíku	Vyšší cena paliva
Konkurenceschopný dojezd vozidel	Obtížná transformace trhu



### 4.1.1 Srovnání vybraných vozidel

Pro konkrétní porovnání vozidla na vodík s dalšími pohony slouží následující tabulka. Vybrané vozy byly určeny na základě jednoho z nejdůležitějších parametrů pro koncového uživatele – ceny. Ta by se měla pohybovat kolem hodnoty 28 000 €.

**Tab. 4.2 Srovnání vybraných vozidel**

Parametr	Model			
	Honda Clarity	Tesla Model 3	Škoda Octavia RS	Mercedes-Benz B 200
Palivo	Vodík	Elektřina	Benzín	CNG
Celkový výkon [kW]	130	192	169	115
Točivý moment [Nm]	300	563	350	250
Objem nádrže [kg]	5,5	-	50 l	21
Kapacita baterie [kWh]	-	50	-	-
Dojezd [km]	~590	~345	~770	~480
Nejvyšší rychlost [km/h]	165	209	250	220
Zrychlení 0–100 km/h [s]	9,0	5,7	6,7	9,2
Doba tankování/nabití [min]	5	450	3	4
Cena paliva	10 €/kg	0,23 €/kWh	1,2 €/l	1 €/kg
Náklady paliva na 1 km [€]	0,093	0,033	0,078	0,044
Hmotnost [kg]	1 875	1 610	1 345	1 435
Cena [€]	28 100	28 700	27 800	28 100

Z tabulky je zřejmé, že zástupce vozů na vodík je víceméně konkurenceschopný oproti ostatním druhům paliv, a to hlavně v oblasti dojezdu či době tankování. Nevýhodou se může jevit již zmíněná vyšší cena paliva, případně hmotnost.

## 4.2 Energetický průmysl

Jedním z účelů Power-to-Gas zařízení je dekarbonizace energetického systému. Solární či větrné elektrárny ale nemají vždy výborné podmínky pro fungování, tudíž je potřeba energii uskladnit v případě potřeby. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2, 6–7 % množství vodíku vyrobeného v Energieparku Mainz putuje do distribuční sítě zemního plynu. Zde je uchován a následně použit v řadě aplikací, jako např. výroba elektřiny, zdroj tepla nebo užití v dopravním sektoru. Obvykle tvoří 5–20 % celkového objemu sítě, v případě Energieparku Mainz se jedná o 0–15 % [24].

Vstřikování vodíku do sítě má řadu výhod, a to jak environmentálních, tak i sociálních či ekonomických. V první řadě dochází ke snížení emisí skleníkových plynů, a to za předpokladu, že vyrobený vodík pochází z nízkouhlíkového zdroje energie, tedy biomasy, solární, větrné či jaderné elektrárny. Dále se jedná o zpřístupnění vodíku, jakožto nosiče energie, pro veřejnost, jeho stabilizace v energetickém řetězci a neposlední řadě i celkové zvýšení popularizace vodíku, který může být obstojnou alternativou zdroje energie [63].

Samozřejmě jako vše, i toto řešení má své stinné stránky. Jsou-li kovové trubky a další materiály tvořící rozvodnou síť vystaveny působení vodíku, může dojít ke zhoršení odolnosti těchto částí. To může vést k nutně, potenciálně finančně náročné, modernizaci infrastruktury. Dalším tématem je otázka bezpečnosti. Směs zemního plynu a vodíku totiž potřebuje ke vznícení nižší množství energie než samotný zemní plyn. Celkový rozsah exploze je naopak vyšší. Je to z toho důvodu, že nízká hustota a vysoká schopnost šíření při úniku způsobuje

rychlejší pohyb vodíku ve vertikálním směru než jakékoliv jiné složky zemního plynu. Tím se vytváří oblast náchylná na výbuch [64].

Celkový pohled na vstřikování vodíku do distribuční sítě zemního plynu se různí. Na jedné straně zaznívají názory vyzdvihující ekologické přednosti a „bagatelizující“ nevýhody v oblasti bezpečnosti a infrastruktury [65], [66], [67], na straně druhé jsou hlasy pochybovačné, odvolávající se na eventuální nedostatky [68], [69].

## **5 Závěr**

Vodík se na první pohled jeví jako kvalitní alternativní zdroj energie pro budoucnost. Nahrává tomu více faktorů, např. jeho vlastnosti či rozšíření. Protože se ale v přírodě nevyskytuje ve formě, která je pro průmyslové potřeby lidstva vhodná, je potřebná úprava jiných látek. Drtivou většinu nadále zaujímají fosilní paliva a procesy jako parní reforming, parciální oxidace nebo zplyňování uhlí, a to především z důvodu nižších výrobních nákladů. Je tedy zřejmé, že výroba vodíku naprosto ekologická není.

V dnešní době je ale stále větší snaha o zaměření se na životní prostředí. Známkou toho je i otevření nových zařízení, tzv. Power-to-Gas, jejichž účelem je využívání „přebytečné“ energie z obnovitelných zdrojů. Jedním z nich je i Energiepark Mainz. Byl otevřen v roce 2015 a jeho posláním je výzkum a výroba vodíku metodou elektrolýzy vody. Vodík zde vytvořený putuje do rozvodných sítí zemního plynu nebo čerpacích stanic.

V distribučních sítích se uplatňuje velký potenciál vodíku – jako akumulátor energie. Obnovitelné zdroje energie, díky kterým v případě Power-to-Gas vznikl, jsou totiž velmi závislé na nevypočitatelných přírodních podmínkách. Je-li tedy z těchto důvodů nedostatek vyráběné energie, vodík může posloužit k vyřešení této situace.

Velmi významným odvětvím, kde vodík může naplnit svoje poslání, je automobilový průmysl. Tento fakt je známý již přibližně 200 let. Postupem času se nicméně pozornost zaměřila na jiná paliva, která jsou levnější na výrobu, účinnější apod. Ve spojitosti s vyčerpáváním fosilních paliv a vysokými emisemi se v současnosti ale situace mění a zájem směřuje mj. i na vodík. Ten má oproti jiným, konvenčním možnostem, své výhody i nevýhody, popsané v kapitole 4. Z té je patrné, že už dnes vodík provozně konkurenceschopný je, v některých kategoriích ale stále pokulhává. Jde především o ekonomické hledisko.

Vodík jako alternativní palivo budoucnosti jistě potenciál má. Chce-li jej ale naplnit, bude nutné překonat určité překážky v podobě ceny své výroby, v případě automobilového průmyslu také transformace světového trhu, zvýšení životnosti palivových článků, která se v současnosti pohybuje kolem 2–4 tis. hodin, či popularizace v široké veřejnosti.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] Lídry trhu s elektromobily jsou Čína a Norsko. Ve skandinávské zemi tvoří elektrická auta polovinu celkového prodeje nových aut. In: *Hospodářské noviny* [online]. 2018 [cit. 2018-04-24]. ISSN 1213-7693.
- [2] KULVEITOVÁ, Hana. *Chemie II - Chemie prvků*. 2010. ISBN 978-80-248-1322-6.
- [3] TUČEK, Vít, Ludmila DVOŘÁKOVÁ a Jiří HANZAL. *Vodík*. Praha: ČATP, 2004, 27 s.
- [4] LANZ, A., J. HEFFEL a C. MESSER. *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies*. Palm Desert: College of the Desert, 2001.
- [5] DESSLER, A., B. SANDEL a S. ATREYA. The Jovian hydrogen bulge: Evidence for co-rotating magnetospheric convection. *Planetary and Space Science*. 1981, **29**(2), 215-224.
- [6] FARSKÝ, Miroslav a Miroslav RICHTER. Vodík palivem budoucnosti. *Vesmír* [online]. 2001, **80**(10) [cit. 2018-02-18]. ISSN 0042-4544. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2001/cislo-10/vodik-palivem-budoucnosti.html>
- [7] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články*. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s. Divize jaderné bezpečnosti a energetiky., 2002.
- [8] EVANS, Daniel. Who invented the hydrogen fuel cell?. In: *H2GO Power* [online]. London, 2017 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.h2gopower.com/blog-post56.html>
- [9] KAMEŠ, Josef. *Fosilní paliva: uhlí, ropa a zemní plyn*. 1. vyd. Praha: [s.n.], 2012, 227 s. : il., mapy, grafy. ISBN 978-80-260-1291-7.
- [10] *Svítiplyn*. Brno: Brněnská městská plynárna, 1926.
- [11] DAWSON, Virginia a Mark BOWLES. *Taming Liquid Hydrogen: The Centaur Upper Stage Rocket, 1958-2002 - NASA/SP-2004-4230*. 2004.
- [12] PESCHKA, Walter. *Liquid Hydrogen: Fuel of the Future*. 1. Wien: Springer-Verlag, 1992. ISBN 978-3-7091-9128-6.
- [13] OHI, Jim. Hydrogen energy cycle: An overview: An overview. *Journal of Materials Research*. 2005, **20**(12), 3180-3187. DOI: 10.1557/jmr.2005.0408.
- [14] Catalyst development for thermocatalytic decomposition of methane to hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2008, **33**(1) [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990700403X>

- [15] *Ullmann's Encyclopedia Of Industrial Chemistry*. 7. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2002. ISBN 3527329439.
- [16] SIMPSON, Adam a Andrew LUTZ. Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2007, **32**(18), 4811-4820 [cit. 2018-02-18]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990700482X>
- [17] GUPTA, Ram. *Hydrogen Fuel: Production, Transport, and Storage*. CRC Press, 2008. ISBN 978-1-4200-4575-8.
- [18] Hydrogen Production: Natural Gas Reforming. *Department of Energy* [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- [19] BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy*. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-619-2.
- [20] SHARMA, Sunita a Sib GHOSHAL. Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **43**, 1151-1158 [cit. 2018-05-08]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010405>
- [21] Výroba vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>
- [22] LHOTKA, Miloslav. *Úvod do anorganické technologie*. 1. vydání. Praha: VŠCHT Praha, 2012. ISBN 978-80-7080-841-2.
- [23] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [24] *Energiepark Mainz* [online]. Mainz, [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.energiepark-mainz.de>
- [25] Energiepark Mainz: největší projekt „power-to-gas“ zahájil provoz. In: *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2015 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/obnovitelne-zdroje/69.php>
- [26] BESSARABOV, Dmitri, Haijiang WANG, Hui LI a Nana ZHAO. *PEM Electrolysis for Hydrogen Production: Principles and Applications*. Taylor & Francis Group, LLC, 2016. ISBN 9781482252293.
- [27] DAVENPORT, Ronald, Franz SCHUBERT a David GRIGGER. Space water electrolysis: space station through advanced missions. *Journal of Power Sources* [online]. 1991, **36**(3), 235-250 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1016/0378-7753(91)87004-U. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037877539187004U>

- [28] RASHID, Md, Mohammed AL MESFER, Hamid NASEEM a Mohd DANISH. Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis. *International Journal of Engineering and Advanced Technology* [online]. 2015, **4**(3), 80-93 [cit. 2018-03-13]. ISSN: 2249 – 8958. Dostupné z: <http://eprints.kku.edu.sa/1499/1/Hydrogen%20Production%20by%20Water%20Electrolysis%20A.pdf>
- [29] GRIGORIEV, S., V. POREMBSKY a V. FATEEV. Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2006, **31**(2), 171-175 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2005.04.038. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990500145X>
- [30] BARBIR, Frano. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar Energy* [online]. 2005, **75**(5), 661-669 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1016/j.solener.2004.09.003. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X04002464>
- [31] EBBESEN, Sune, Søren JENSEN, Anne HAUCH a Mogens MOGENSEN. High Temperature Electrolysis in Alkaline Cells, Solid Proton Conducting Cells, and Solid Oxide Cells. *Chemical Reviews* [online]. 2014, **114**(21), 10697–10734 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1021/cr5000865. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cr5000865>
- [32] URSÚA, Alfredo, Luis GANDÍA a Pablo SANCHIS. Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2011, **100**(2), 410-426 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2156750. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5898382/>
- [33] CARMO, Marcelo, David FRITZ, Jürgen MERGEL a Detlef STOLTEN. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2013, **38**(12), 4901-4934 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913002607>
- [34] RAJESHWAR, Krishnan, Robert MCCONNELL a Stuart LICHT. *Solar Hydrogen Generation*. 1. New York: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-0-387-72809-4.
- [35] SMOLINKA, Tom, Martin GÜNTHER a Jürgen GARCHE. *NOW-Studie: Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien*. Fraunhofer ISE, 2011.
- [36] *SILYZER 200: High-pressure efficiency in the megawatt range*. Germany: Siemens AG, 2017.
- [37] GIERNOTH, Ralf. Task-Specific Ionic Liquids. *Angewandte Chemie International Edition* [online]. 2010, **49**(16), 2834-2839 [cit. 2018-03-17]. DOI:

- 10.1002/anie.200905981. Dostupné z:  
<http://onlinelibrary.wiley.com/wo11/doi/10.1002/anie.200905981/full>
- [38] PLECHKOVA, Natalia a Kenneth SEDDON. Applications of ionic liquids in the chemical industry. *Chemical Society Reviews* [online]. 2008, **37**, 13-150 [cit. 2018-03-17]. DOI: 10.1039/b006677j. Dostupné z:  
<http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2008/CS/B006677J>
- [39] HANUSEK, Jiří. Iontové kapaliny - nový směr v "zelené" chemii. *Chemické listy* [online]. 2005, **99**, 263294 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://chemicke-listy.cz/Bulletin/bulletin362/bulletin362.pdf>
- [40] DIXIT, Ritu. Ionic liquid: A designer solvent. *Quest* [online]. 2014, **2**(1), 10-13 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://www.aribas.edu.in/Quest/2014/Issue1/4.pdf>
- [41] Ionic Liquids: evidence of the viscosity scale-dependence. *Scientific Reports* [online]. 2017, **7** [cit. 2018-03-17]. DOI: 10.1038/s41598-017-02396-7. Dostupné z:  
<https://www.nature.com/articles/s41598-017-02396-7>
- [42] KOPP, Martin, David COLEMAN, Christoph STILLER, Klaus SCHEFFER, Jonas AICHINGER a Birgit SCHEPPAT. Energiepark Mainz: Technical and economic analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, **42**(19), 13311-13320 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917300083>
- [43] *Puretec Industrial Water* [online]. 2012 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z:  
<https://puretecwater.com/>
- [44] HAIDARI, Amir, S. HEIJMAN a W. VAN DER MEER. Optimal design of spacers in reverse osmosis. *Separation and Purification Technology* [online]. 2018, **192**, 441-456 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586617324188>
- [45] *Czemp* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.czemp.cz/cs>
- [46] ALVARADO, Lucía a Aicheng CHEN. Electrodeionization: Principles, Strategies and Applications. *Electrochimica Acta* [online]. 2014, **132**, 583-597 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468614007087>
- [47] ARAR, Özgür, Ümran YÜKSEL, Nalan KABAY a Mithat YÜKSEL. Various applications of electrodeionization (EDI) method for water treatment—A short review. *Desalination* [online]. 2014, **342**, 16-22 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916414000745>
- [48] BONJOUR, Jocelyn, Jean-Bertrand CHALFEN a Francis MEUNIER. Temperature Swing Adsorption Process with Indirect Cooling and Heating. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2002, **41**(23), 5802-5811 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie011011j>

- [49] FRANÇOIS, Isabel. Power-to-Gas cluster visits Energie Park Mainz. *Power To Gas* [online]. 2017 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.power-to-gas.be/power-gas-cluster-visits-energie-park-mainz>
- [50] Number of cars sold worldwide from 1990 to 2018 (in million units). *Statista* [online]. 2018 [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/200002/international-car-sales-since-1990/>
- [51] The Hydrogen Engine: The Hydrogen Engine The Rev. W. Cecil's Engine. In: *University of Cambridge, Department of Engineering* [online]. Cambridge, [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <http://www3.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/projects/cecil/engine.html>
- [52] FRYBERT, Jan, Ján LACKO, Petr MUDRÁK, Jan SLANINA a Martin TRAUTMAN. *Alternativní pohony*. Brno, 2015. ISBN 978-80-260-7548-6.
- [53] Hydrogen Storage. *Department of Energy* [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- [54] Hydrogen Refuelling Stations Worldwide. In: *H2stations.org* [online]. 2018 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <https://www.netinform.net/H2/H2Stations/H2Stations.aspx>
- [55] ZENKNER, Petr. Do Česka by měla zaměřit první vodíková auta od Hyundai. Provozovat je chce Moravskoslezský kraj, který postaví i plnicí stanice. *Hospodářské noviny* [online]. 2018 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <https://byznys.ihned.cz/c1-66105570-do-ceska-by-mela-zamirit-prvni-vodikova-auta-od-hyundai-provozovat-je-chce-moravskoslezsky-kraj-ktery-postavi-i-plnici-stance>
- [56] BMW glaubt nicht mehr an den Wasserstoffmotor. In: *Welt* [online]. 2009 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://www.welt.de/motor/article5450945/BMW-glaubt-nicht-mehr-an-den-Wasserstoffmotor.html>
- [57] Technology FAQ. In: *Intelligent Energy* [online] [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://www.intelligent-energy.com/technology/technology-faq/>
- [58] MATHUR, Virendra a Jim CRAWFORD. Fundamentals of Gas Diffusion Layers in PEM Fuel Cells. *Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology*. New York: Springer, 2007, 116-128. DOI: 10.1007/978-0-387-68815-2\_4.
- [59] EHSANI, Mehrdad, Yimin GAO a Ali EMADI. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. 2nd ed. CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-5398-2.
- [60] BARBIR, Frano. *PEM Fuel Cells*. 2nd ed. USA: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-12-387710-9.
- [61] KUNUSCH, Cristian, Paul PULESTON a Miguel MAYOSKY. *PEM Fuel Cell Systems*. London: Springer, 2012. ISBN 978-1-4471-2430-6.



- [62] *Fuel Cell Vehicle Toyota Europe* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.toyota-europe.com/world-of-toyota/feel/environment/better-air/fuel-cell-vehicle>
- [63] Hydrogen injection into the natural gas grid. In: *The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* [online]. Brusel, 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: [http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/171121\\_FCH2JU\\_Application-Package\\_WG5\\_P2H\\_Hydrogen%20into%20gas%20grid%20%28ID%202910558%29%20%28ID%202911642%29.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/171121_FCH2JU_Application-Package_WG5_P2H_Hydrogen%20into%20gas%20grid%20%28ID%202910558%29%20%28ID%202911642%29.pdf)
- [64] BLACHARSKI, Tomasz, Piotr JANUSZ, Maciej KALISKI a Łukasz ZABRZESKI. The effect of hydrogen transported through gas pipelines on the performance of natural gas grid. *AGH Drilling, Oil, Gas*. 2016, **33**(2), 515-529.
- [65] NITSCHKE-KOWSKY, Petra, Werner WEBING a Jörg RUDAT. *Experience with the Injection of Hydrogen into a Naturally Grown Natural Gas Distribution Grid*. International Gas Union Research Conference, Copenhagen, Denmark, 2014.
- [66] FLORISSON, Onno. *Preparing for the hydrogen economy by using the existing natural gas system as a catalyst*. 2010.
- [67] SCHAFFERT, Johannes, Janina SENNER, Eren TALI, Frank BURMEISTER a Klaus GÖRNER. *The influence of power-to-gas on natural gas quality & applications*. International Gas Union Research Conference, Copenhagen, Denmark, 2014.
- [68] SLIM, B. *Should we add hydrogen to the natural gas grid to reduce CO2 emissions (Consequences for gas utilization equipment)*. Amsterdam, 2006.
- [69] Schwankungen im Erdgasnetz und die Auswirkungen auf industrielle Feuerungsanlagen. *VIK Mitteilungen*. 2012, (3), 17-19.

## Seznam použitých symbolů, značek a zkratek

<b>Symbol</b>	<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>
$U$	Napětí	V
$\Delta g_f$	Změna Gibbsovy volné energie	J
$\Delta H$	Změna entalpie	J
$\Delta H_R$	Změna reakční entalpie	kJ/mol
$\eta$	Skutečná účinnost	
$\eta_{max}$	Maximální teoretická účinnost	

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
<i>NASA</i>	National Aeronautics and Space Administration
<i>P2G, PtG</i>	Power-to-Gas
<i>PEM</i>	Proton-Exchange Membrane, Polymer-Electrolyte Membrane
<i>PEMFC</i>	Palivový článek s polymerní membránou
<i>PSA</i>	Pressure-Swing-Adsorption
<i>TSA</i>	Temperature-Swing-Adsorption

## Seznam obrázků

<b>Obr. 1.1</b> Groveův kyslíko-vodíkový článek .....	14
<b>Obr. 2.1</b> Zdroje pro výrobu vodíku .....	16
<b>Obr. 2.2</b> Schéma parního reformování zemního plynu .....	17
<b>Obr. 2.3</b> Schéma parciální oxidace.....	18
<b>Obr. 3.1</b> Schéma areálu .....	20
<b>Obr. 3.2</b> Zjednodušený model jednoho elektrolytického článku technologie PEM.....	22
<b>Obr. 3.3</b> Proces demineralizace vody.....	23
<b>Obr. 3.4</b> Blokové schéma celkového procesu .....	24
<b>Obr. 4.1</b> Porovnání energií a energetických hustot vybraných paliv .....	26
<b>Obr. 4.2</b> Vodíkové čerpací stanice v Evropě k dubnu 2018.....	26
<b>Obr. 4.3</b> Zjednodušené schéma palivového článku.....	27
<b>Obr. 4.4</b> Hlavní komponenty vozidla na palivové články.....	28

## **Seznam tabulek**

<b>Tab. 3.1</b> Základní technické informace o elektrolyzáru SILYZER 200 .....	22
<b>Tab. 4.1</b> Výčet výhod a nevýhod vozidel na vodík.....	28
<b>Tab. 4.2</b> Srovnání vybraných vozidel .....	29