Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra chemie

Diplomová práce

Využití vodíku pro energetické účely v rafinérsko-petrochemickém průmyslu

Vedoucí práce doc. Ing. Vladimír Hönig, Ph.D. et Ph.D.

Diplomant: Bc. Kateřina Hojerová

© 2025 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Kateřina Hojerová

Regionální environmentální správa

Název práce

Využití vodíku pro energetické účely v rafinérsko-petrochemickém průmyslu

Název anglicky

Use of hydrogen for energy purposes in the refining and petrochemical industry

---

Cíle práce

Cílem práce je na základě návrhu a vyhodnocení technologického řešení definovat optimální podmínky výroby a využití vodíku jako energetického zdroje.

Hypotézy: V definovaných podmínkách je výroba a zpracování šedého vodíku ekonomicky nejpřijatelnější v rafinérské praxi.
Nejvyšších úspor emisí lze dosáhnout při využití směsných topných plynů z různých zdrojů?

Metodika

- prostudovat základní literaturu, normy, internetové odkazy a další prameny
- provést literární rešerši v oblasti výroby a využití vodíku pro energetické účely
- připravit návrh technologického řešení a vyhodnotit z hlediska chemického, energetického a ekonomického
- navrhnout doporučení pro následující provoz

Harmonogram

LS 2024 – zpracování teoretických východisek

ZS 2025 – návrh technického řešení a zpracování dat

LS 2025 – odevzdání diplomové práce

Doporučený rozsah práce

50-70 stran včetně obrázků, tabulek a grafů

Klíčová slova

vodík, ropa, energetika, mobilita, dekarbonizace

Doporučené zdroje informací

Calandra, D., Wang, T. D., Cane, M., & Alfiero, S. (2023). Management of hydrogen mobility challenges: A systematic literature review. Journal of Cleaner Production, 137305.

Edwards, P. P., Kuznetsov, V. L., & David, W. I. (2007). Hydrogen energy. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365(1853), 1043-1056.

Lahrichi, A., El Issmaeli, Y., Kalanur, S. S., & Pollet, B. G. (2024). Advancements, strategies, and prospects of solid oxide electrolysis cells (SOECs): Towards enhanced performance and large-scale sustainable hydrogen production. Journal of Energy Chemistry.

Rand, D. A. J., & Dell, R. M. (2007). Hydrogen energy: challenges and prospects.

Vigneswaran, V. S., Gowd, S. C., & Rajendran, K. (2024). Pathways for decarbonizing the sponge iron industries: Effect of energy balance and impact assessment. Journal of Cleaner Production, 141962.

Wang, G., Xiao, L., & Zhuang, L. (2024). General definition of hydrogen energy and related electrochemical technologies. Chinese Journal of Catalysis, 56, 1-8.

Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 146, 111180.

Předběžný termín obhajoby

2024/25 LS – FŽP

Vedoucí práce

doc. Ing. Vladimír Hönig, Ph.D. et Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra chemie

Elektronicky schváleno dne 14. 09. 2024

Ing. Matyáš Orsák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 09. 2024

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 09. 10. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Využití vodíku pro energetické účely v rafinérsko-petrochemickém průmyslu" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších přepisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Litvínově dne datum odevzdání _____

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Vladimíru Hönigovi, Ph.D et Ph.D. za vedení práce, za jeho ochotu reagovat na mé dotazy, za rychlá řešení, za podněty, trpělivost a pozitivní přístup.

Veliké poděkování patří mému muži a mým dcerám za jejich trpělivost a podporu po celou dobu mého studia. V neposlední řadě velice děkuji Ing. Janě Jenčíkové, která opět byla vždy připravena pomoci a poskytla mi odpovědi na moje dotazy k diplomové práci.

Využití vodíku pro energetické účely v rafinérsko-petrochemickém průmyslu

Abstrakt

Vodík hraje klíčovou roli v rafinérsko-petrochemickém průmyslu, kde se využívá v následných chemických procesech při zpracování ropy a výroby petrochemických produktů. Práce se zaměřuje na srovnání tradičních a obnovitelných metod výroby. Tradičně se vyrábí šedý vodík, který je ekonomicky výhodný, ale zároveň vysokým producentem emisí. Rostoucí tlak na dekarbonizaci nutí průmysl hledat alternativy, především výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů energie. Diplomová práce analyzuje možnosti integrace obnovitelného vodíku, využití směsných plynů a potenciál technologických inovací, včetně spalovacích technologií pro energetické účely. Součástí je také hodnocení synergií mezi výrobou vodíku a procesními jednotkami rafinérií, a to i využití vedlejších plynů. Tato práce analyzuje současnou produkci vodíku v petrochemickém sektoru a jeho environmentální dopady. Následně zhodnocuje moderní technologie výroby vodíku z obnovitelných zdrojů energie, zejména elektrolýzu vody napájenou elektřinou z fotovoltaické elektrárny, včetně její účinnosti, nákladovosti a emisní stopy. V další části se tato práce zaměřuje na možnosti skladování a distribuci vodíku, přičemž jsou porovnány různé metody. V závěru práce je provedeno ekonomické a environmentální zhodnocení různých variant výroby a využití vodíku v průmyslu. Výsledky zhodnotí přechod na zelený vodík, jeho pozitivní vliv na snížení emisí, ale také počáteční investice a její návratnost. Práce poskytuje komplexní pohled na problematiku dekarbonizace vodíkových procesů v rafinérsko-petrochemickém průmyslu a identifikuje klíčové výzvy i příležitosti pro jeho udržitelný rozvoj.

Klíčová slova: vodík, ropa, energetika, mobilita, dekarbonizace

Use of hydrogen for energy purposes in the refining and petrochemical industry

Abstract

Hydrogen plays a key role in the refining and petrochemical industry, where it is used in subsequent chemical processes in the processing of crude oil and the production of petrochemical products. The work focuses on comparing traditional and renewable production methods. Traditionally, grey hydrogen is produced, which is economically advantageous, but at the same time a high producer of emissions. The growing pressure for decarbonization is forcing the industry to look for alternatives, especially the production of hydrogen from renewable energy sources. The thesis analyses the possibilities of integrating renewable hydrogen, the use of mixed gases and the potential of technological innovations, including combustion technologies for energy purposes. It also includes an assessment of synergies between hydrogen production and refinery process units, including the use of by-products. This work analyses the current production of hydrogen in the petrochemical sector and its environmental impacts. It then evaluates modern technologies for the production of hydrogen from renewable energy sources, in particular the electrolysis of water powered by electricity from a photovoltaic power plant, including its efficiency, cost and emission footprint. In the next part, this work focuses on the possibilities of hydrogen storage and distribution, comparing different methods. At the end of the work, an economic and environmental assessment of various options for hydrogen production and use in industry is carried out. The results will evaluate the transition to green hydrogen, its positive impact on reducing emissions, but also the initial investment and its return. The work provides a comprehensive view of the issue of decarbonization of hydrogen processes in the refining and petrochemical industry and identifies key challenges and opportunities for its sustainable development.

Keywords: hydrogen, petroleum, energy, mobility, decarbonization

Obsah

1 Úvod **1**

2 Cíl práce **2**

3 Metodika **2**

4 Literární rešerše **4**

4.1 Vodík 4

4.2 Přehled současného stavu 5

4.3 Vize do budoucna 6

4.4 Energetika v chemickém průmyslu 8

4.5 Vodíková mobilita 9

4.6 Dekarbonizace 10

4.7 Zdroje energií 11

4.8 Globální strategie v energetice 11

4.8.1 UNFCCC – Rámcová úmluva OSN (organizace spojených národů) o změně klimatu 12

4.8.2 Pařížská dohoda 12

4.9 Evropská legislativa 13

4.10 Evropské strategie v energetice 14

4.10.1 Green Deal – Zelená dohoda pro Evropu 14

4.10.2 IPCEI Hy2Tech 15

4.10.3 Systém EU pro obchodování s emisemi (EU ETS) 15

4.10.4 Fit for 55 16

4.10.5 Evropská vodíková strategie 17

4.10.6 Plán REPowerEU 17

4.11 Národní dokumenty a legislativa 18

4.11.1 Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. v platném znění 19

4.11.2 Národní akční plán čisté mobility 20

4.12 Vodíková technologie a vodíková ekonomika 20

4.12.1 IPPC – Integrovaná prevence a omezování znečištění 22

4.13 Financování z fondů EU 22

4.13.1 Inovační fond EU 23

4.13.2 Modernizační fond EU 24

4.13.3 Horizont Evropa a Fond pro spravedlivou transformaci 25

5 Vlastní práce **26**

5.1 Výroba vodíku 26

5.2 Emisní náročnost vodíku 29

5.3 Využití vodíku 30

5.3.1 Vodík pro mobilitu ... 30
5.4 Výroba a využití vodíku ve světě ... 33
5.5 Technologie výroby vodíku používaná v petrochemickém závodě a jeho využití z chemického hlediska ... 33
5.5.1 Parciální oxidace (POX) - výrobna zplyňování mazutu (těžkých ropných produktů) ... 33
5.5.2 Pyrolýza ... 36
5.5.3 Jednotka CCR (Continuous Catalytic Reforming) - jednotka reformingu s kontinuální regenerací katalyzátoru ... 38
5.6 Výroba vodíku z pohledu environmentálního u konkrétních technologií ... 40
5.6.1 Produkce emisí ze zdrojů znečištění ... 40
5.6.2 Energetická účinnost ... 41
5.7 Výroba a využití vodíku z pohledu ekonomického ... 43
5.7.1 Odhady provozních nákladů výroby vodíku u technologií využívaných v rafinérsko-petrochemickém průmyslu ... 43
5.7.2 Prodejní ceny vodíku na plnících stanicích v České republice a v Evropě44
5.7.3 Technologie výroby vodíku z obnovitelných zdrojů energie s pomocí elektrolyzéru ... 45
5.8 Návrh a porovnání technologie výroby vodíku z OZE a jeho využití v petrochemickém průmyslu ... 46
5.8.1 Hlavní faktory pro komplexní zhodnocení výroby a využití vodíku z OZE46
5.8.2 Technologie výroby zeleného vodíku ... 48
5.8.3 Možnosti ukládání a distribuce vodíku ... 49
5.8.4 Porovnání způsobů využití vodíku ... 50
5.8.5 Investiční náklady a návratnost ... 51
5.8.6 Výpočet bodu zvratu (návratnost investice) pro celý systém: ... 54
5.8.7 Zdroje energií pro výrobu zeleného vodíku ... 57

6 Výsledky ... 59
6.1 Grafy a výsledky výroby a využití vodíku ve světě ... 59
6.2 Grafy a výsledky produkce emisí při využití konkrétních technologií výroby vodíku ... 61
6.3 Graf a výsledky energetické účinnosti u konkrétních typů technologií výroby vodíku ... 62
6.4 Odhadované provozní náklady na výrobu vodíku u jednotlivých typů technologií 62
6.5 Prodejní ceny vodíku z obnovitelných zdrojů energie v porovnání s prodejní cenou vodíku v chemickém průmyslu ... 63
6.6 Prodejní ceny vodíku na plnících stanicích v Evropě včetně ČR ... 64
6.7 Celková uhlíková stopa výroby vodíku z OZE v porovnání s výrobou z fosilních zdrojů 66
6.8 Porovnání investičních nákladů na pořízení PEM a AEL elektrolyzéru o výkonu 3 MW 67

6.9 Porovnání investičních nákladů pro celý systém výroby vodíku z OZE s různou výší dotace ... 67
6.10 Návratnost investice (bod zvratu) pro celý systém výroby vodíku z OZE ... 68
6.11 Vyhodnocení ekonomické a environmentální efektivity návrhu ... 69

7 Zhodnocení ... 71

8 Diskuse ... 72

9 Závěr ... 74

10 Seznam použitých zdrojů ... 77
10.1 Odborné články a publikace ... 77
10.2 Legislativa ... 80
10.3 Ostatní zdroje ... 80

11 Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratek ... 83
11.1 Seznam obrázků ... 83
11.2 Seznam tabulek ... 84
11.3 Seznam použitých zkratek ... 85

1 Úvod

V severozápadní části České republiky se nachází největší víceodvětvová společnost ve střední a východní Evropě. Hlavními odvětvími jsou rafinérie, petrochemie a energetika. V posledních letech se zde obnovuje technologie vedoucí ke zlepšení životních podmínek pro životní prostředí i obyvatele. Nová strategie pro udržitelný rozvoj budoucnosti s cílem dosažení nulových emisí uhlíku do roku 2050 si klade za cíl snižování emisí oxidu uhličitého (CO_2) ze zpracování ropy a z výroby petrochemických produktů a snižování emisí z vyrobené elektřiny. Aby docházelo ke změně a ke zlepšení dopadům na životní prostředí, je potřeba zapojit do technologií obnovitelné zdroje a efektivněji je využívat. Vzhledem ke zpomalujícímu se tempu růstu poptávky po ropě, by jedna z alternativ úspěšné průmyslové transformace mohla být pro budoucnost vodíková technologie. Budování pozice ve využití vodíku v dopravě a produkci energie je dobrým krokem k dekarbonizaci a tím ke zlepšení životního prostředí v České republice. V současné době již bývá ve zmíněné společnosti vyráběn a využíván tzv. šedý vodík. Pro oblast vodíkových technologií jsou nyní alokovány miliardy korun v rámci Národního plánu obnovy, a to konkrétně Fyzická infrastruktura a zelená tranzice a také složka Dekarbonizace silniční dopravy. V rámci Operačního programu Doprava, které spravuje Ministerstvo dopravy, je v oblasti vodíkových technologií rozvoj zaměřen na vodíkové čerpací stanice.

V souladu se Zelenou dohodou pro Evropu, jejímž cílem je snížit do roku 2030 čisté emise skleníkových plynů nejméně o 55 % a dosáhnout do roku 2050 klimatické neutrality, je nastaven plán REPowerEU. Mezi hlavní cíle patří úspora energie, diverzifikace dodávek energie do Evropské unie (EU), rychlejší zavádění obnovitelných zdrojů energie a inteligentní kombinace investice a reformy (Evropská rada a Rada Evropské unie, 2024).

Velkým krokem dopředu je také novela energetického zákona (Zákon č. 469/2023 Sb.) platná od 1. ledna 2024, která zařadila vodík mezi plyny, které je možné distribuovat plynovodní sítí k odběratelům. Vodík je tak právně zařazen stejně jako zemní plyn. To je dalším zásadním milníkem na podporu snižování znečišťování ovzduší v procesu českého plynárenství a celé energetiky.

Tato diplomová práce se bude zabývat především vodíkovou technologií a optimálními podmínkami při výrobě a využití vodíku jako energetického zdroje, legislativními opatřeními a návrhu doporučení pro následující provoz.

2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je analyzovat a vyhodnotit možnosti využití vodíku pro energetické účely v petrochemickém průmyslu se zaměřením na technologickou, ekonomickou a environmentální stránku. Práce se soustředí na současné metody výroby vodíku v rafineriích, jejich efektivitu a potenciál přechodu na nízkoemisní varianty, jako je zelený vodík. Součástí práce zmapovat současné využití vodíku v rafinérsko-petrochemickém průmyslu, včetně jeho chemických procesů. Dále analyzovat současné technologie výroby vodíku a jejich ekonomickou a ekologickou efektivitu. Na základě získaných informací vyhodnotit možnosti integrace nízkoemisního vodíku v rafinériích i dopravě a jeho využití jako paliva. Zhodnotit synergické efekty mezi výrobou vodíku a jinými procesy v rafinérii, například využití směsných topných plynů. Výsledkem práce bude komplexní zhodnocení možností přechodu na nízkoemisní vodík a zhodnocení optimální strategie pro jeho využití v rámci udržitelného rozvoje a dekarbonizace průmyslu.

3 Metodika

Teoretická část diplomové práce bude zpracována jako rešerše odborné literatury v oblasti výroby a využití vodíku pro energetické účely. Bude zmíněna dekarbonizace, ropa i energetika. Důležitým bodem diplomové práce bude zmíněna legislativa Evropské unie i České republiky, evropské strategie v energetice i přehled současného stavu a zároveň možnosti financování z fondů Evropské unie i z fondů národních. Bude prostudována základní literatura, normy, internetové odkazy a další odborné prameny.

Metodika bude zahrnovat analýzu současného stavu výroby vodíku v petrochemickém průmyslu. Budou popsány technologické procesy výroby šedého vodíku, spotřeba, jeho využití a současná praxe v chemických procesech. V průběhu práce bude navrhována technologie výroby vodíku z obnovitelných zdrojů energie (OZE). V rámci návrhu bude zvolena vhodná technologie elektrolyzéru, stanovení potřebného výkonu, výpočet spotřeby energie na jednotku vyrobeného vodíku a možnosti integrace OZE. Zmíněn bude návrh kapacity a umístění zařízení.

Dalším krokem, který bude zmíněn, je ukládání a distribuce vodíku, možnosti jeho skladování a distribuce v rámci petrochemického závodu a náklady na jednotlivé varianty. V jedné z kapitol bude porovnáváno využití vodíku v průmyslu, možnosti jeho využití versus konverze na jiné produkty (metanol, čpavek).

V další části ekonomicky zhodnotíme projekt. Budou vypočítány investiční náklady na elektrolyzéry a fotovoltaickou elektrárnu. V ekonomickém zhodnocení bude na základě provozní nákladů, investice podle výkonu FVE, příjmů z dotace a výroby vodíku vypočtena návratnost investice ve srovnání s odkupem elektřiny z jiných zdrojů.

V environmentálním hodnocení bude analyzována emisní stopa výroby zeleného vodíku oproti šedému, energetická účinnost různých technologií výroby vodíku a posouzení dopadu na energickou náročnost. Budou porovnány emise z různých technologií výroby šedého vodíku a zároveň bude porovnána uhlíková stopa energie z obnovitelných zdrojů a fosilních paliv.

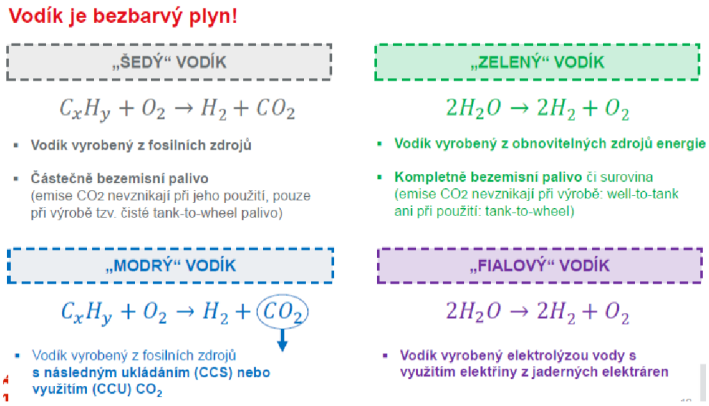
Použité metody se dají shrnout v posloupnosti literární rešerše, technicko-ekonomická analýza, srovnávací metody mezi šedým a zeleným vodíkem, výpočet efektivity výroby, skladování a distribuce a environmentální hodnocení. V závěru bude shrnuto vyhodnocení ekonomické a environmentální efektivita návrhu.

4 Literární rešerše

4.1 Vodík

Vodík je nejzákladnější a nejrozsáhlejší přítomný chemický prvek, symbolizovaný značkou „H“ v periodické tabulce. Je to bezbarvý plyn bez zápachu a vysoce hořlavý ve své čisté formě. Vodík poskytuje větší odvod tepla na jednotku hmotnosti než fosilní paliva, což ukazuje na vysokou perspektivu vodíku jako zdroje energie (Singh, Tiwari, 2024). Vodík je celosvětové uznáván jako jediný udržitelný nosič energie s nulovými emisemi, který dokáže překonat mnohostranné problémy a slouží jako komplexní řešení v energetických zdrojích (Riaz et al., 2023).

Vlastnosti vodíku jako ekologicky nezávadného a schopného využití v široké škále aplikací vedly k silné motivaci jej v budoucnu přijmout jako jeden z hlavních sekundárních zdrojů energie vedle elektřiny (Wijayanta et al., 2019). Dnes je vodík jedním z nejslibnějších chemických prvků a kandidátem na revoluci v energetické transformaci. Vodík se obvykle používá při výrobě chemikálií a méně energeticky náročných odvětvích. Evropská komise zveřejnila vizi vytvoření ekosystémů pro výrobu vodíku jejich integrací do současných programů, jako je Zelená dohoda. Vodík lze vyrábět z fosilních paliv, obnovitelné energie nebo vody. Na obr. 1 je znázorněn vodík v závislosti na způsobu výroby a jeho běžné kvalifikování do barvy. (IE Agency, 2022).



Obr. 1 – Kvalifikace vodíku do barvy (zdroj: ORLEN Unipetrol, 2024)

Vodík přitahuje stále více pozornosti a zájmu ze strany zemí jako všestranný nosič energie, který může pomoci dekarbonizovat v různých odvětvích. Použití vodíku je také velmi rozmanité. Jeho aplikace jsou rozsáhlé, včetně průmyslových odvětví, jako je rafinace ropy, chemikálie a výroba železa a oceli, kde jej lze použít jako vstupní surovinu nebo palivo ke snížení emisí skleníkových plynů. Vodík lze také použít v dopravním sektoru, včetně silnic, železnic, lodí a letectví, kdy se elektřina vyrábí z palivových článků na vodíkový pohon nebo přímým spalováním vodíku. Lze jej využít také pro vytápění budov. Vzhledem k výhodám všestrannosti vodíku a jeho potenciálu při snižování emisí uhlíku roste zájem o využití vodíkových aplikací v různých odvětvích a vodík se stává důležitou součástí strategií mnoha zemí s nulovými čistými emisemi (Calandra, Wang, Cane, Alfiero, 2023).

4.2 Přehled současného stavu

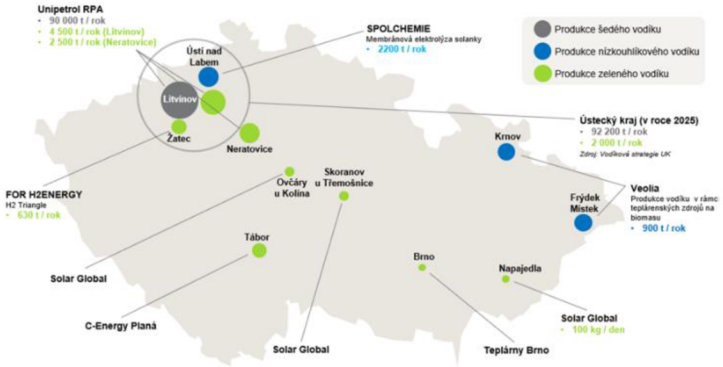
V současné době se vodík vyrábí hlavně ze zemního plynu bez využití technologie CCUS (carbon capture utilization and storage – proces zachytávání a ukládání oxidu uhličitého (CO_2) společně s jeho využitím). Toto představuje asi 62 % vodíku vyrobeného na světě. Uhlí je druhým největším zdrojem paliva používaným při výrobě vodíku, což je zhruba 19 % veškerého vyrobeného vodíku, soustředěného hlavně v Číně. Dalším palivem k výrobě vodíku je ropa, méně než 1 %. Za zmínku stojí, že 18 % vyrobeného vodíku je vedlejším produktem reformování nafty. Vodík vyrobený elektrolýzou vody pomocí elektřiny tvoří jen malý zlomek (IE Agency, 2022).

V Evropské unii v současné době vodík nehraje velkou roli. Jeho výrobu a využití brzdí nákladová konkurenceschopnost, rozsah výroby, infrastruktura, ale také bezpečnost. V rámci celkové skladby energetických zdrojů EU představuje vodík pouze 2 %, z nichž je 95 % vodíku vyrobenou z fosilních paliv, což znamená, že je každý rok z této výroby uvolněno až 100 miliónů tun CO_2 (Guillot, 2023). Vodík může být použit jako surovina a nosič energie k dekarbonizaci několika obtížně snižitelných aplikací, které jsou závislé na fosilních uhlovodících. Z tohoto důvodu všechny velké ekonomiky plánují buď rozšířit svou domácí výrobu vodíku nebo dovážet vodík ze zemí s výhodnými podmínkami pro výrobu vodíku nebo obojí (IE Agency, 2023).

Na národní úrovni téma vodíku jakožto jednoho z možných prostředků k dosáhnutí cíle energetické soběstačnosti a snížení závislosti na ruských fosilních palivech začíná čím dál více rezonovat. V současnosti v České republice převažuje výroba šedého vodíku

zejména v rámci petrochemického průmyslu v litvínovském ORLEN Unipetrolu nebo v ústecké SPOLCHEMII. Chemický sektor je v tuto chvíli největším spotřebitelem vodíku a vodík slouží jak pro vnitřní chemické procesy, tak k výrobě čpavku či jako doplňkový zdroj tepla (Stuchlík, 2022).

Produkce vodíku v rámci České republiky je zobrazena na obr. 2.



Obr. 2 – Produkce vodíku v České republice (zdroj: GrantThorton News, 2022)

V rámci dopravy je využití vodíku zatím zanedbatelné a infrastruktura plnících stanic se vyvíjí velmi pomalu. Pro energetické účely vodík zatím není využíván, a to i přesto, že je již od začátku roku 2024 zakotven v české legislativě jako energetický plyn. Možnosti importu obnovitelného vodíku jsou velmi omezené a produktovody na vodík chybí (Svaz průmyslu a obchodu, 2024).

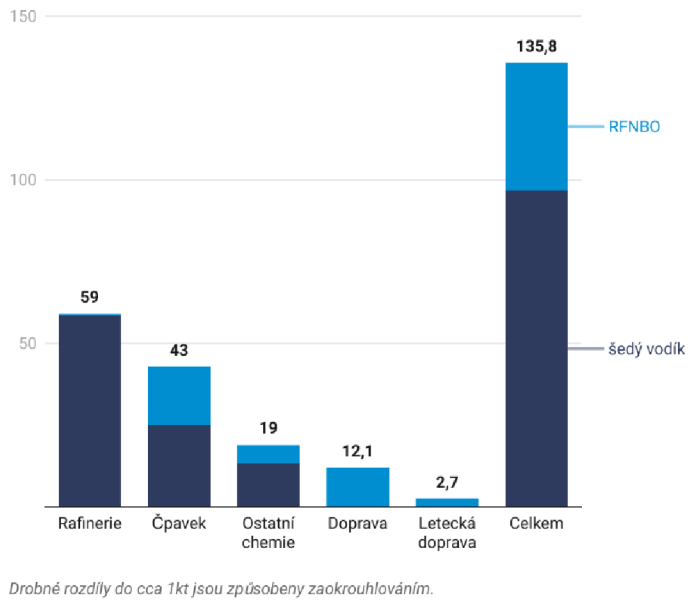
4.3 Vize do budoucna

Vodík má do budoucna obrovský potenciál. Vojenská agrese proti Ukrajině podtrhla potřebu Evropy diverzifikovat své energetické zdroje a urychlit přechod na obnovitelné zdroje. Mezi mnoha technologiemi se ukazuje, že vodík je nepostradatelnou součástí. V současné době v Evropě neexistuje zavedený trh s vodíkem. Pro společnosti nebo členské státy je riskantní, aby investovaly do inovativních technologií samy. Proto Evropská komise povolila podle pravidel státní podpory až do výše 5,4 miliardy eur a je zde předpoklad, že toto rozhodnutí přitáhne další více jak 8 miliard eur ze soukromých investic (EC, 2022).

Jako reakce na ruskou agresi představila Evropská unie balíček REPowerEU, kde aktualizovala cíle v oblasti produkce zeleného vodíku i jeho importu ze třetích zemí. V obou

případech je cíl stanoven na 10 miliónů tun zeleného vodíku do roku 2030. Jednu z vizí představuje také iniciativa European Hydrogen Backbone tvořená 31 operátory přenosových soustav plynu v Evropě. V této vizi se jedná o panevropskou páteřní infrastrukturu, která by do roku 2030 měla čítat 21 000 km a být schopná přepravit 20 miliónů tun vodíku ročně (Stuchlík, 2022).

Závěry studie o využití budoucnosti vodíku v ČR, kterou si nechal zpracovat Svaz průmyslu a dopravy ČR s podporou firmy ORLEN Unipetrol a.s. jsou, že se naše republika musí důsledněji a systematičtěji zaměřit na využití vodíku v průmyslu či dopravě. Pokud by se tak nestalo, hrozí, že firmy budou po roce 2030 platit vysoké pokuty za nedodržování evropských směrnic a budou mít také dražší emisní povolenky. Pokud se nástup vodíkové ekonomiky podcení, může to mít dopad na růst hrubého domácího produktu (HDP), na zaměstnanost, ale i na příliv nových investic (Záruba, 2024). Předpokládaná spotřeba vodíku v České republice v roce 2030 může vystoupat až na 135,8 kilotun, kde dominuje spotřeba v oblasti rafinerie a při výrobě čpavku, což je znázorněno na obr. 3.



Obr. 3 – Předpokládaná spotřeba vodíku v ČR v roce 2030 v [kt] (zdroj: PwC, Svaz průmyslu a dopravy ČR, 2024)

RFNBO – Renewable Fuels of Non-biological Origin – obnovitelné palivo nebiologického původu – obnovitelný vodík.

V těsné blízkosti litvínovského areálu ORLEN Unipetrol připravuje společnost stavbu fotovoltaické elektrárny o výkonu 60 megawattů. Součástí bude elektrolyzér k výrobě tzv. zeleného vodíku, který se bude vytvářet pomocí zdrojů obnovitelné energie. Roční kapacita obnovitelného vodíku se odhaduje až na 4500 tun. Výstavba by měla začít na přelomu roků 2024 a 2025 a dokončení je plánováno na konec roku 2028. Obě technologie, fotovoltaická elektrárna i elektrolyzér, se svým výkonem zařadí mezi největší v České republice. S obnovitelným vodíkem se počítá pro dekarbonizaci dopravy i průmyslu a při výrobě se bude kombinovat vlastní energie vyrobená ze slunce s dodávkami zelené energie od jiných subjektů. Náklady na investici jsou odhadovány kolem čtyř miliard korun (energetikainfo, 2024).

4.4 Energetika v chemickém průmyslu

Chemický průmysl je energeticky náročný zpracovatelský sektor, který podporuje téměř každou ekonomickou činnost a je odpovědný za 15 % přímých ročních emisí uhlíku globálního průmyslového sektoru (Fischedick et al., 2014). Na obr. 4 je zaznamenaná fotografie vizuálního pohledu na znečišťující látky unikající do ovzduší ze stacionárního zdroje. Snížení emisí skleníkových plynů a zlepšení udržitelnosti životního prostředí v tomto sektoru může zahrnovat investice do čisté energie (Louw, 2018).

Navzdory prokázaným opatřením ke zlepšení životního prostředí existují v průmyslovém sektoru, konkrétně v energeticky náročných zpracovatelských odvětvích překážky, kvůli kterým se tyto organizace mění pomaleji. První překážkou, které čelí energeticky náročná zpracovatelská odvětví, jsou delší investiční cykly. Vzhledem k velkému objemu a vysoké kapitálové náročnosti se tato odvětví setkávají s menším počtem příležitostí pro změnu technologie, což vede k efektu uzamčení a pomalejší změně (Wesseling and Vooren, 2017). Vzhledem k naléhavě potřebě stabilizovat energetické systémy s rostoucím podílem proměnlivé obnovitelné energie je velmi důležité navrhnout vodíkový energetický systém, který se přizpůsobí vývoji nové éry energetické transformace (Zhao et al., 2023).

Převážná část vodíku vyrobeného v petrochemických komplexech se spotřebuje na místě. Velmi málo vodíku se dodává ostatním spotřebitelům, protože množství bývají relativně malá. Toto dodávání vodíku se nazývá obchodní vodík. Instalace systému s celostátním pokrytím bude masivní a nákladná. Systém používání plynárenské sítě

k distribuci vodíku by mohl poskytnout čas na rozvoj a na potřebné investice. Lokalizovaná výroba vodíku, využívající buď technologii malé reformy plynu, nebo elektrolyzéru, je již v některých společnostech přijímána (Rand, Dell, 2008).

Elektrochemická přeměna energie, založená na přeměně mezi elektrickou energií a chemickou energií, je klíčová pro skladování a využití obnovitelné elektrické energie, stejně jako pro ekologickou výrobu cenných paliv a chemikálií. Obecná definice vodíkové energie v jakýchkoli chemických vazbách zahrnujících vodík, jako jsou vazby H-H, C-H a N-H. Vzhledem k tomu, že vodík, uhlovodíky a dusíkaté látky nejsou jen paliva s vysokou energetickou hustotou, ale také důležité průmyslové suroviny, je úspěšná implementace efektivního skladování/uvolňování energie ve vodíkovém cyklu H-H, uhlíkovém cyklu C-H a cyklu dusíku N-H. Tyto cykly mají velký význam při vytváření udržitelných energetických systémů a snižování závislosti na fosilních palivech, což přispívá k řešení globální energetické krize a problémů životního prostředí (Wang, Xiao, Zhuang, 2024).

Obr. 4 – Znečišťující látky unikající do ovzduší (zdroj: Zpravodajství Evropského parlamentu)

4.5 Vodíková mobilita

Dekarbonizace silniční dopravy je stěžejním opatřením pro dosažení dlouhodobých cílů pro zmírnění změny klimatu. Odvětví silniční dopravy skutečně odpovídá za 18 % celosvětových emisí (IEA, 2012). Ačkoliv je trh s vodíkovými automobily méně rozvinutý

ve srovnání s elektromobily, mají vozidla na vodíkový pohon značný potenciál vlivem vyšší hustoty vodíku, pokud jde o hmotnost i objem (Szałek, Pielecha, Cieslik, 2021). Obě tyto mobility se však vzájemně doplňují. Bateriová mobilita je vhodnější pro každodenní dopravu na menší vzdálenosti a u vodíkové výhody převažují na delší vzdálenosti (Wiatrak, 2021). Současné omezení pro vodíkové automobily spočívá v infrastruktuře, která je stále omezená nedostatkem vodíkových stanic. Přesto tyto stanice nabízí několik výhod. Jednou z klíčových výhod je pozoruhodně rychlá doba nabíjení, která se pohybuje od 5 do 15 minut (Wang, Gaillard, Hissel, 2019). Do roku 2030 plánuje společnost ORLEN Unipetrol až 28 vodíkových stanicí v České republice a 26 stanicí na Slovensku. Zároveň je v plánu zřídit dvě výrobní a distribuční vodíková centra a dodávat vodík mimo jiné i dopravě železniční (Wiatrak, 2021).

4.6 Dekarbonizace

Dekarbonizace je symbolem úsilí o zmírnění změny klimatu, protože je nejčastěji zmiňovaným prvkem v globálních strategiích zmírňování klimatu. Zahrnuje posun od energetické infrastruktury založené na fosilních palivech k obnovitelným alternativám se zvýšeným důrazem na posílení energetické účinnosti. Přílišné zaměření na dekarbonizaci může nechtěně přehlédnout další zásadní přispěvatele ke zhoršování životního prostředí, protože environmentální i sociální systémy jsou složité a geograficky proměnlivé (Papadis a Tsatsaronis, 2020). Dekarbonizace energetického sektoru je předmětem výzkumu a politických diskusí již několik desetiletí a v posledních letech získává významnou pozornost. Obecně se uznává, že nejzřejmějším způsobem, jak dosáhnout dekarbonizace, je využití obnovitelných zdrojů energie. V souvislosti s dekarbonizací energetického sektoru začalo mnoho převážně průmyslových zemí v nedávné době vypracovávat národní plány na vytvoření vodíkového hospodářství ve velmi blízké budoucnosti. Plány pro zelený vodík se zpočátku snaží zaměřit na sektory, které je obtížné dekarbonizovat a zároveň řešit problémy související se skladováním a přepravou energie bez CO_2. Pro dosažení téměř úplné dekarbonizace musí být energie vyráběna výhradně z obnovitelných zdrojů. V technologiích nazvaných Power-to-X je zelený vodík generován z elektřiny a následně přeměněn na jiný energetický nosič, který lze dále skladovat, přepravovat a využívat. Jedná se například o kapalný vodík, methanol nebo amoniak (Tsatsaronis, 2024).

Jak se diskuse o dekarbonizaci zintenzivňují, soustředí se úsilí na elektrolýzu vody, proces, který využívá elektřinu k štěpení vody na vodík a kyslík. Všechny typy elektrolýzy, např. alkalická elektrolýza, elektrolýza na výměnné protonové membráně a vysokoteplotní elektrolýza, stále generují vodík s vyššími náklady ve srovnání s procesy na bázi fosilních paliv (Incer-Valverde, 2023). Celosvětově bylo oznámeno více než 1400 obnovitelných a nízkouhlíkových vodíkových projektů, které do konce roku 2030 představují investice ve výši 570 miliard dolarů, ačkoli méně než 7 % dosáhlo konečného investičního rozhodnutí (Klingl et al., 2024).

4.7 Zdroje energií

Nové plyny představují budoucnost energetiky z pohledu dlouhodobého rozložení rizik při zajištění dostupnosti, soběstačnosti a ekologické výhodnosti pro všechna odvětví lidských činností. Cílem je maximální využití obnovitelných a recyklovatelných zdrojů pro přeměnu a výrobu energie. Neobnovitelné zdroje energie jsou fosilní paliva, která se v přírodě neobnovují a jsou vyčerpatelná. Jedná se především o uhlí, ropu a zemní plyn. Recyklovatelné zdroje jsou vhodné pro další energetické využití, zejména biologický odpad ze zemědělství, komunální odpad a průmyslový odpad a obnovitelné zdroje se dají kvalifikovat jako zdroje, které se v přírodě přirozeně obnovují. Mezi uhlíkově neutrální zdroje řadíme sluneční záření, vítr, déšť, ale i příliv, vlny a geotermální teplo nebo biomasu (dřevo) (Čagala, Pasková, Galík, Sochor, 2024).

4.8 Globální strategie v energetice

Během posledních tří desetiletí zajistila globalizace obrovský tok kapitálu, zboží, lidí i myšlenek přes národní hranice jako klíčové faktory globální ekonomiky, které podpořily vazby mezi národy z rozvinutých i rozvíjejících se ekonomik (Coeurderoy, 2020). Řešení skutečného přechodu na zelenou energii minimálně zahrnují zavádění technologií obnovitelné energie, snižování emisí skleníkových plynů a podporu energetické účinnosti. Zásadní je, že vyžaduje systémovou restrukturalizaci přesahující pouhou náhradu zdrojů s ohledem na sociální spravedlnost, ekonomickou životaschopnost, dopad na životní prostředí a trvalé cíle udržitelnosti (Smith et al., 2023).

4.8.1 UNFCCC – Rámcová úmluva OSN (organizace spojených národů) o změně klimatu

Rámcová úmluva OSN o změně klimatu, v anglickém znění United Nations Framework Convention on Climate Change, byla přijata na Konferenci OSN o životním prostředí a rozvoji v Rio de Janeiru v roce 1992 a vstoupila v platnost v březnu roku 1994. V rámci mezinárodního vyjednávání poskytuje úmluva možné řešení problémů spojených s probíhající změnou klimatu. Zahrnuje problematiku snižování emisí skleníkových plynů, vyrovnávání se s negativními dopady změny klimatu i finanční a technologickou podporu rozvojovým zemím (MŽP, 2024).

Z Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu vycházejí prohlášení jednotlivých zemí o přehledu emisí. Všechny země se zavazují dodržovat zásadu transparentnosti a potvrzovat přesnost a spolehlivost informací o emisích, které sdílejí. Tyto zprávy jsou výsledkem přísného národního účetnictví a poskytují oficiální záznamy o emisích každé země, což poskytuje cenné údaje pro mezinárodní srovnání a hodnocení (Han et al., 2024).

4.8.2 Pařížská dohoda

V roce 2015 byla podepsána Pařížská dohoda o změně klimatu s cílem zabránit vážným dopadům na životní prostředí (Gao et al., 2017). Pařížská dohoda je mezinárodní dohoda k UNFCCC, která navazuje na Kjótský protokol. Je podepsána 195 zeměmi a stanovuje cíl udržet nárůst průměrné globální teploty výrazně pod hranicí 2 °C a zároveň nepřekročit hranici nárůstu teploty o 1,5 °C (faktaoklimatu, 2024).

Přistoupením k této dohodě se má naplnit společný cíl snížit do roku 2030 emise skleníkových plynů o nejméně 40 % ve srovnání s rokem 1990. Dohoda ukládá povinnosti rozvinutým, ale i rozvojovým státům stanovit si vnitrostátní redukční příspěvky k dosažení dohody (MŽP, 2024). Úspěch Pařížské dohody a dalších souvisejících politik týkající se znečištění životního prostředí do značné míry závisí na institucionální kvalitě dané země. Instituce formulují a regulují environmentální politiky pro snižování emisí. Tyto instituce mají mnoho podob (politickou, vládní, sociální) a jsou ovlivňovány mnoha různými faktory (Salman et al., 2019).

4.9 Evropská legislativa

Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/2001 ze dne 11. prosince 2018 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů v Článku 3 stanovuje závazný celkový cíl Unie pro rok 2030. Členské státy společně zajistí, aby podíl energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie dosáhl v roce 2030 nejméně 32 %. Od 1. ledna 2021 nesmí být podíl energie z obnovitelných zdrojů v jednotlivých členských státech nižší než základní podíl uvedený v tabulce v příloze I části A této směrnice (viz. tab. 1 níže).

Cíl pro podíl energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie v roce 2020 (S_{2020})							
Belgie	13%	**Řecko**	18%	**Litva**	23%	**Portugalsko**	31%
Bulharsko	16%	**Španlsko**	20%	**Lucembursko**	11%	**Rumunsko**	24%
Česko	13%	**Francie**	23%	**Maďarskko**	13%	**Slovinsko**	25%
Dánsko	30%	**Chorvatsko**	20%	**Malta**	10%	**Slovensko**	14%
Německo	18%	**Itálie**	17%	**Nizozemsko**	14%	**Finsko**	38%
Estonsko	25%	**Kypr**	13%	**Rakousko**	34%	**Švédsko**	49%
Irsko	16%	**Lotyšsko**	40%	**Polsko**	15%	**Spojené království**	15%

Tab. 1 – Cíl pro podíl energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie v roce 2020 (tabulka: vlastní, zdroj: Směrnice evropského parlamentu a Rady EU 2018/2001, příloha I, část A)

S ohledem na směrnici Evropského parlamentu a Rady EU 2018/2001 ze dne 11. prosince 2018 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů Evropská komise vydala nařízení v přenesené pravomoci (EU) 2023/1184 ze dne 10. února 2023, kterým se doplňuje stanovením unijní metodiky, v níž jsou vymezená podrobná pravidla pro výrobu kapalných a plynných paliv z obnovitelných zdrojů nebiologického původu používaných v odvětví dopravy. Důvodem nařízení v odst. 2 se uvádí „*Energetický obsah téměř všech kapalných a plynných paliv z obnovitelných zdrojů nebiologického původu používaných v dopravě je založen na vodíku z obnovitelných zdrojů vyráběném elektrolýzou. Kritéria, která je třeba stanovit, jsou důležitá také k zabránění situaci, kdy by poptávka po elektřině pro výrobu vodíku potřebného pro paliva z obnovitelných zdrojů nebiologického původu používaná v odvětví dopravy vedla ke zvýšení dovozu fosilních paliv pro výrobu potřebné elektřiny z Ruska.*“

V odst. 10 se dále uvádí „*Vzhledem ke kolísavé povaze některých obnovitelných zdrojů energie, včetně větrné a solární energie, a přetížení rozvodné sítě nemusí být elektřina z obnovitelných zdrojů pro výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů neustále k dispozici. Je proto vhodné stanovit pravidla, která zajistí, aby se vodík z obnovitelných zdrojů vyráběl v době a na místech, kdy a kde je k dispozici elektřina z obnovitelných zdrojů.*“

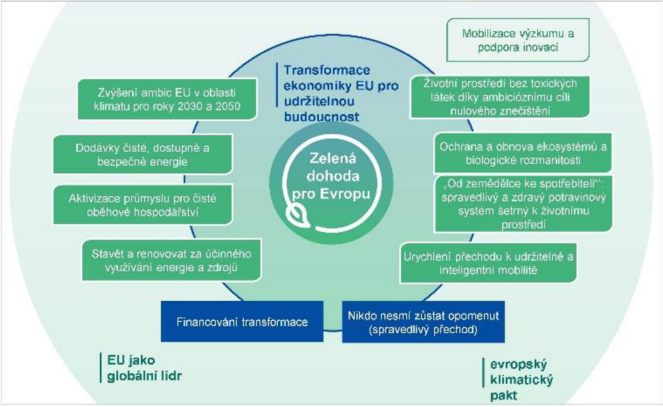
4.10 Evropské strategie v energetice

Vzhledem k tomu, že EU schválila Pařížskou dohodu, Zelenou dohodu pro Evropu a cíl spočívající v nákladově efektivním a spravedlivém přechodu, který by nejpozději do roku 2050 vedl ke klimatické neutralitě, došlo k Usnesení Evropského parlamentu ze dne 19. května 2021 o evropské vodíkové strategii 2020/2242/INI.

4.10.1 Green Deal – Zelená dohoda pro Evropu

Dne 14. července 2021 zveřejnila Evropská komise (EK) balíček legislativních návrhů, jejichž cílem je přizpůsobit klimatickou, energetickou, dopravní a daňovou politiku EU novým pokynům, tzv. Evropská zelená dohoda (Evropská komise, 2019). Hlavními principy nové dohody je přeměnit EU na moderní, celosvětově konkurenceschopnou hospodářskou unii, která dosáhne nulových čistých emisí skleníkových plynů do roku 2050, oddělí hospodářský růst od spotřeby zdrojů a vyrovná rozdíly mezi jednotlivci i regiony, tzv. spravedlivý přechod (Siddi, 2020). Tyto cíle mají učinit z EU první klimaticky neutrální hospodářské společenství na světě. Bylo vytvořeno několik technologií, cest a oblastí činnosti jako řešení na podporu úsilí o zmírnění změny klimatu. Mezi hlavní úkoly patří průmyslová dekarbonizace a podíl na snižování emisí skleníkových plynů v evropském úsilí o dosažení klimatické neutrality (Baleva et al., 2021)

Jedním z klimatických cílů v rámci transformace pro udržitelnou budoucnost jsou dodávky čisté, dostupné a bezpečné energie, kde zásadní roli budou mít obnovitelné zdroje. V návaznosti na tento cíl je uvedena aktivizace průmyslu pro čisté oběhové hospodářství, což vyžaduje plnou mobilizaci průmyslu. Průmysl EU potřebuje průkopníky v oblasti klimatu a zdrojů, kteří přinesou v průmyslových odvětvích do roku 2030 první komerčně využitelné přelomové technologie. Mezi prioritní oblasti patří čistý vodík, palivové články a další alternativní paliva. Komise podpoří přelomové technologie pomocí finančních prostředků z fondů k tomu určených (EUR-LUX, 2019). Transformace ekonomiky Evropské unie pro udržitelnou budoucnost, globální cíl a přechod na čistší Evropu v rámci Zelené dohody pro Evropu je přehledně znázorněný na obr. 5.



Obr. 5 – Zelená dohoda pro Evropu (zdroj: eur-lex.europa.cz, 2024)

4.10.2 IPCEI Hy2Tech

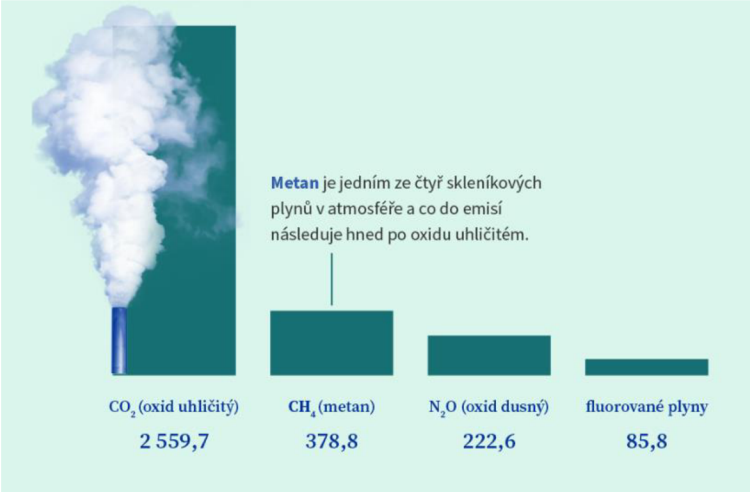
V roce 2022 schválila Evropská komise vůbec první důležitý projekt společného evropského zájmu v odvětví vodíku. Zaměřuje se na vývoj inovativních technologií pro vodíkový hodnotový řetězec k dekarbonizaci průmyslových procesů a mobility. Zahrnuje 35 společností a 41 projektů z 15 členských států. Mezi těmito státy je i Česká republika. IPCEI Hy2Tech přispívá k cílům EU v oblasti dekarbonizace, jak je stanoveno v zákoně EU o klimatu. Přispívá také k plánu REPowerEU, hraje svou roli při diverzifikaci dodávek energie a odklonu od ruských fosilních paliv. Zároveň vytváří pozitivní vedlejší efekty v celé EU, výsledky výzkumu i vývoje budou šířeny i ve prospěch společností, které nejsou součástí projektu. Jednotlivé projekty jsou podrobeny technickému posouzení, zda splňují požadavky na inovativnosti přesahující nejmodernější technologii. V rámci projektu společnosti mohou získat pouze to, co je nezbytné k jeho uskutečnění (EC, 2022).

4.10.3 Systém EU pro obchodování s emisemi (EU ETS)

Systém EU pro obchodování s emisemi je trh s uhlíkem založený na obchodním systému stanovujícím stropy emisí v energeticky náročných průmyslových odvětvích a odvětví výroby energie. Je hlavním nástrojem EU při řešení problematiky snižování emisí. Byl zaveden v roce 2005 a od této doby se emise v rámci EU snížily o 41 %. Systém EU ETS se vztahuje na výrobu elektřiny ve všech členských státech Evropské unie a zemích Evropského sdružení volného obchodu (Island, Lichtenštejnsko a Norsko) a také v Severním Irsku. Zahrnuje emise skleníkových plynů z přibližně 10 000 zařízení v odvětví energetiky a zpracovatelském průmyslu, jakož i provozovatele letadel létajících v rámci EU. Od roku

2024 se systém vztahuje také na námořní dopravu. Systém se vztahuje na skleníkové plyny z konkrétních činností a zaměřuje se na emise, které lze měřit, vykazovat a ověřovat s vysokou mírou přesnosti. Především se jedná o oxid uhličitý (CO_2) z výroby elektřiny a tepla, z energeticky náročných průmyslových odvětví včetně rafinérií, oceláren a výroben železa, hliníku a dalších kovů, cementu, atd. Oxid dusný (N_2O) vznikající při výrobě kyseliny dusičné, adipové a glyoxylové a glyoxalu je jedním z dalších plynů a také perfluoruhlovodíky (PFC) z výroby hliníku. Od roku 2024 jsou povinny monitorovat a vykazovat své emise zařízení na spalování komunálního odpadu nad určitou prahovou hodnotou (EC, 2024).

Na obr. 6 v přehledném grafu vydala Evropská agentura pro životní prostředí údaje emisí skleníkových plynů za rok 2020.



Obr. 6 – Emise skleníkových plynů v EU (v milionech kg CO_2 ekv.), údaje za rok 2020 (zdroj: Evropská agentura pro životní prostředí, 2024)

4.10.4 Fit for 55

Fit for 55 je reforma systému EU pro obchodování s emisemi. Jedná se o soubor návrhů na revizi a aktualizaci právních předpisů Evropské unie v oblasti klimatu, energetiky a dopravy, které by měly přispět k dosažení klimatických cílů EU, jimiž je cílem snížit emise skleníkových plynů aspoň o 55 % do roku 2050 dosáhnout klimatické neutrality. Nová ustanovení zahrnují rozšíření o emise skleníkových plynů z námořní dopravy, rychlejší snižování emisních povolenek v systému a postupné rušení bezplatných povolenek pro některá odvětví, zavedení celosvětového programu kompenzace a snižování emisí oxidu uhličitého v mezinárodním civilním letectví, navýšení finančních prostředků dostupných

z Modernizačního a Inovačního fondu a revizi rezervy tržní stability. Jedním z bodů tohoto balíčku je také přechod z fosilních paliv k obnovitelným a nízkouhlíkovým plynům, mezi které řadíme také vodík (European Council and Council of the EU, 2024).

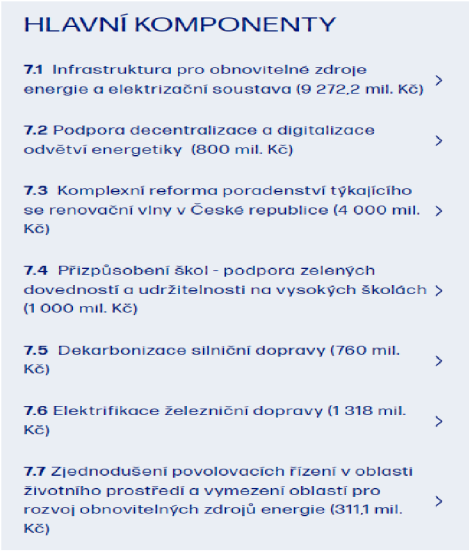
4.10.5 Evropská vodíková strategie

Vodíková strategie pro klimaticky neutrální Evropu vznikla v Bruselu v červenci 2020 sdělením Komise Evropskému parlamentu, radě, evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru a výboru regionu. Vodík lze používat jako vstupní surovinu, palivo nebo nosič a úložiště energie. Má mnoho využití v odvětvích průmysl, dopravy, energetiky i stavebnictví. Při jeho používání se neuvolňuje oxid uhličitý a tím téměř neznečišťuje ovzduší. Mohl by být jedním z řešení, jak dekarbonizovat průmyslové procesy a hospodářská odvětví, v nichž je nutné snižování emisí uhlíku a zároveň velmi obtížné tohoto dosáhnout. Vodík je z těchto důvodů nezbytný k podpoření závazku EU dosáhnout do roku 2050 vodíkové neutrality a k celosvětovému úsilí o provádění Pařížské dohody a snaze dosáhnout nulového znečištění. Prioritou EU je rozvíjet využití vodíku z obnovitelných zdrojů, vyráběného zejména pomocí větrné a solární energie. Rozhodnutí ve prospěch vodíku z obnovitelných zdrojů se opírá o sílu evropského průmyslu ve výrobě elektrolyzéru, což povede také k vytvoření nových pracovních míst a k hospodářskému růstu v EU, ale také k podpoře nákladově efektivního integrovaného systému. V současné době technologie vyspívá a náklady se snižují, tím by mohlo dojít k zavedení vodíku z obnovitelných zdrojů ve velkém měřítku. Vodíkový ekosystém se však bude pravděpodobně v Evropě rozvíjet postupně, s různou rychlostí v jednotlivých odvětvích a regionech a vyžádá si různá politická řešení. Evropská unie by měla aktivně podporovat nové příležitosti ke spolupráci se sousedními zeměmi a regiony, pokud jde o čistý vodík, a pomoc tak přejít na čistou energii a podpořit udržitelný růst a rozvoj (EUR-LEX, 2024).

4.10.6 Plán REPowerEU

S cílem snížit energetickou závislost na Rusku oznámila Evropská komise v květnu 2022 spuštění plánu REPowerEU, plánu na zlepšení účinnosti a dekarbonizace evropského energetického systému. Do roku 2027 si EU stanovila cíl zvýšit podíl obnovitelné energie v odvětví dopravy, vytápění i výroby elektřiny. Předpoklady pro urychlení trhu s obnovitelnými zdroji energie v EU existují, ale k dosažení cílů REPowerEU a uhlíkové neutrality budou muset členské státy odstranit ekonomické, infrastrukturní a byrokratické

překážky (Di Francia and Cupo, 2023). V rámci REPowerEu získá Česká republika dodatečné finanční prostředky ve výši 17 461,3 mil. korun českých především na posílení energetické bezpečnosti a na pomoc s energetickou transformací. Připravovaná opatření urychlí dekarbonizaci a přispějí ke snížení nákladů na energie pro české domácnosti, firmy i veřejný sektor. Finanční prostředky budou rozděleny do několika hlavních komponentů (obr. 7) (NPO, 2024).



Obr. 7 – Rozdělení finančních prostředků mezi hlavní komponenty pilíře REPowerUE (zdroj: Národní plán obnovy, 2024)

4.11 Národní dokumenty a legislativa

Právo životního prostředí dnes tvoří tři navzájem se ovlivňující systémy, a to právo mezinárodní, unijní (evropské) a právo vnitrostátní. Právo české je právem mezinárodním a unijním velmi silně ovlivňováno a prostupováno. Odhaduje se, že větší část (60–80 %) norem je již dána a jen některé části tak mohou být upraveny právem vnitrostátním zcela autonomně a odlišně (Frouz a Moldan, 2015).

Na znečišťování ovzduší se podílí jak antropogenní (způsobované činností člověka), tak přírodní zdroje. Mezi nejvýznamnější antropogenní zdroje pak patří především lokální topeniště (zejména spalování pevných paliv), silniční doprava, průmysl a energetika a zemědělství. Pro jednotlivé zdroje či skupiny zdrojů jsou právními předpisy stanoveny podmínky pro jejich provoz (MŽP, 2024).

Novela č. 469/2023 Sb. Energetického zákona aktualizuje definici plynu a doplňuje ji zejména o moderní vodík, což umožní zacházení s ním podle pravidel pro plyn v energetickém zákoně. Za účelem snížení emisí skleníkových plynů je nezbytné realizovat postupný přechod od fosilních paliv na nízkouhlíkové a obnovitelné plyny, např. biometan, syntetický metan a vodík a nastavit pravidla pro jejich integraci do trhu se zemním plynem, aby postupně docházelo k čistší výrobě v energetickém sektoru (energetikainfo, 2024). Předpisy o ochraně ovzduší chrání před znečištěním, zejména ze zdrojů spalujících fosilní paliva (uhlí, ropné produkty, plyn). Vztahují se na zdroje stacionární i mobilní. Stanovují se také podmínky pro další snižování množství vypouštěných látek. Tyto úpravy jsou rovněž jedním z nástrojů ke snižování vypouštění látek ovlivňujících klimatický systém Země (Mezřický, 2005).

4.11.1 Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. v platném znění

Dle § 1 odst. 1 zákona č. 201/2012 Sb. se uvádí „*Ochranou ovzduší se rozumí předcházení znečišťování ovzduší a snižování úrovně znečišťování tak, aby byla omezena rizika pro lidské zdraví způsobená znečištěním ovzduší, snížení zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší a poškozujícími ekosystémy a vytvoření předpokladů pro regeneraci složek životního prostředí postižených v důsledku znečištění ovzduší,* (dále jen zákon)“.

Pro účely tohoto zákona se vodík rozumí pohonnou hmotou dle § 2a, písmeno a). Dle § 20, odst. 1 je *dodavatel fosilních paliv povinen zajistit snížení emisí skleníkových plynů na jednotku energie obsaženou v pohonné hmotě jím uvolněné do volného daňového oběhu pro dopravní účely a v elektřině pro dopravní účely o 6 % ve srovnání se základní hodnotou produkce emisí skleníkových plynů pro fosilní pohonné hmoty stanovenou prováděcím předpisem. Dle odst. 2 může dodavatel povinnost splnit také prodejem vodíku pro dopravní účely na daňovém území České republiky, pokud mu tím vznikla povinnost přiznat a zaplatit daň z minerálních olejů podle jiného právního předpisu*.

Na znečišťování ovzduší se podílí jak antropogenní (způsobované činností člověka), tak přírodní zdroje. Mezi nejvýznamnější antropogenní zdroje pak patří především lokální topeniště (zejména spalování pevných paliv), silniční doprava, průmysl a energetika a zemědělství. Pro jednotlivé zdroje či skupiny zdrojů jsou právními předpisy stanoveny podmínky pro jejich provoz (MŽP, 2022).

4.11.2 Národní akční plán čisté mobility

Tento plán pomáhá implementovat jednotlivá opatření a významně přispívá ke snižování emisí skleníkových plynů v dopravě. Aktualizaci tohoto plánu schválila vláda ČR na rozvoj infrastruktury pro alternativní paliva, modernizaci vozového parku v silniční dopravě a dekarbonizaci dopravy. Důraz se neklade pouze na oblast elektromobilů, ale i podporu vodíkových technologií a stimulaci poptávky po vozidlech s nízkými emisemi. Na cíle čisté mobility se úzce váže Národní plán obnovy (NPO, 2024).

Cílem aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility je do roku 2025 zvýšit počet osobních elektrických vozidel na 50 tisíc a lehkých užitkových vozidel na 4 tisíce. Tento počet má dále růst do roku 2030 na 250 tisíc osobních a 20 tisíc lehkých užitkových vozidel a do roku 2035 až na 1 milion osobních a 60 tisíc lehkých užitkových vozidel. Strategie podporuje budování rozsáhlé sítě dobíjecích a plnicích stanic pro elektrická a vodíková vozidla, včetně prioritní výstavby infrastruktury na hlavní síti TEN-T (MPO, 2024).

4.12 Vodíková technologie a vodíková ekonomika

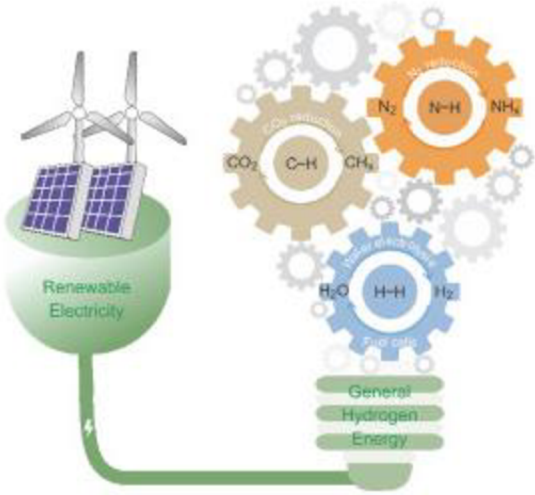
Při výrobě vodíku z obnovitelných zdrojů mohou mít z ekonomického pohledu vliv zeměpisně-klimatické podmínky. Nepříznivé klimatické podmínky vedou k nižším výkonům při srovnatelných investičních nákladech, a to znamená ve výsledku vyšší cenu vyrobeného vodíku ve srovnání se zeměmi, které mají klimatické podmínky lepší. Dalším faktorem je nedostatečná připravenost plynárenské infrastruktury pro přepravu, distribuci a skladování směsí vodíku, omezená kompatibilita soustavy, nedostatečná kapacita zdrojů pro výrobu nízkouhlíkového vodíku i absence pilotních projektů pro získání technologického know-how. Jedním z důležitých faktorů je bezpečnost. Výroba a využití vodíku oproti jiným chemickým výrobám či používáním fosilních paliv může představovat zvýšené nebezpečí pro uživatele i přesto, že na druhé straně přináší značné výhody, neboť palivo je v případě čistého vodíku netoxické (MPO, 2024).

Nástup vodíkové ekonomiky záleží na několika faktorech. Jsou jimi cenová dostupnost (náklady na vodík versus náklady substitucí), existující a příznivá regulace a dostupnost vodíku, kam můžeme zařadit infrastrukturu a samotnou surovinu a dostupnost technických řešení pro průmysl. Důvodem současného nízkého využívání vodíku jsou vysoké náklady a chybějící infrastruktura (SPČR, 2024).

Vodíková ekonomika bude vyžadovat dva typy systému skladování vodíku, jeden pro přepravu a druhý pro stacionární aplikace. Oba mají různé požadavky a omezení. Předpokládá se, že sektor dopravy bude první velkoobjemový uživatel vodíku v budoucí vodíkové ekonomice. Požadavky na skladování vodíku pro dopravní aplikace jsou mnohem vyšší než ty pro stacionární aplikace. Provozní požadavky pro „ideální“ skladování vodíku pro dopravní aplikace zahrnují vícecyklovou vratnost absorpce vodíku nejméně 500 cyklů, nízký provozní tlak méně než 4 bary, provozní teplotu v rozsahu od 50 °C do 150 °C, rychlou kinetiku příjmu a uvolňování vodíku, vysokou gravimetrickou a objemovou hustotu vodíku větší nebo rovno 9 % hmotnosti a více nebo rovno 70 g vodíku na litr skladovacího systému, bezpečnost za provozních podmínek a přijetí veřejností a náklady na systém skladování vodíku nižší než 15 GBP (liber) na jeden kilogram (Edwards, Kuznetsov, David, 2007).

I když je vodík považován za nejrozšířenější materiál ve vesmíru, ve stavu molekulárního vodíku se na Zemi kvůli jeho chemické povaze nevyskytuje v hojném množství. Proto se k extrakci vodíku z různých molekulárních sloučenin používají různé technologie, které jsou bezpečnější, zelenější a hojnější. V současnosti údaje naznačují, že zemní plyn se používá jako hlavní zdroj surovin pro výrobu vodíku, více než 50 %. Zásadní krok směrem k udržitelné výrobě vodíku představují elektrolyzační články na bázi pevných oxidů (SOEC). Použití inovativních technik, strategií a pokročilých materiálů v této technologii zvýšilo výkon a trvanlivost těchto systémů, ačkoli problémy s degradací přetrvávají, což implikuje hlavní zaměření na budoucí pokrok (Lahrichi, El Issmaeli, Kalanur, Shankara, Bruno, Pollet, 2024).

Realizace vodíkového hospodářství je neodvolatelně spojena s palivovým článkem. Toto zařízení je v podstatě vodní elektrolyzér pracující obráceně, kdy palivo je přiváděno do záporné elektrody a kyslík nebo vzduch do kladné elektrody. Dochází k elektrotechnické reakci – palivo oxiduje, redukuje se kyslík, tvoří se voda a napříč článkem se vytváří napětí, takže pak může být odebírán stejnosměrný proud (Rand, Dell, 2005). Kromě předností vysoké hustoty energie a snadné výroby je vodík neznečišťujícím nosičem energie, protože produkuje vodu (H_2O) pouze při spalování vzduchu nebo při vybíjení palivových článků. Energie vodíku založená na elektrochemické přeměně (obr. 8) mezi H_2 a H_2O (cyklus vodíku) je tak dlouho považována za slibnou alternativu k energetickým systémům založeným na fosilních palivech (Wang, Xiao, Zhuang, 2024).



Obr. 8 – Cykly elektrochemické přeměny vodíku (zdroj: Wang et al., 2024)

4.12.1 IPPC – Integrovaná prevence a omezování znečištění

IPPC je pokročilým způsobem regulace vybraných průmyslových a zemědělských činností při dosažení vysoké úrovně ochrany životního prostředí jako celku. Cílem integrované prevence a omezování znečištění je předcházet vzniku znečištění, případně omezování jeho vzniku, pomocí volby vhodných výrobních postupů a technologií. Zároveň by mělo docházet k úspoře nákladů za spotřebované suroviny, energie a koncové technologie. IPPC překonává princip složkového přístupu, který často vedl pouze k přenosu znečištění z jedné složky životního prostředí do druhé (MŽP, 2022).

4.13 Financování z fondů EU

Jedním z hlavních cílů EU je zvyšování životní úrovně. Prostřednictvím podpory z evropského rozpočtu je možné získávat finance pro další rozvoj i v České republice. Evropské fondy jsou s více než sto padesáti tisíci úspěšných projektů jedním z nejvíce viditelných nástrojů politiky soudružnosti České republiky. Politika soudružnosti tvoří jeden ze základních pilířů fungování Evropské unie a její smysl spočívá v podpoře projektů pomáhajících vyrovnávat rozdíly ve vyspělosti regionů, zvyšovat jejich konkurenceschopnost a zlepšovat kvalitu života všech občanů. Evropské fondy stále zůstávají významnou součástí investičního prostředí, a to i přes určitou administrativní náročnost. Jsou příležitostí pro financování spousty projektových záměrů, a to i měst, obcí, malých a středních podniků a neziskových organizací (MMR, 2022).

4.13.1 Inovační fond EU

Cílem Inovačního fondu je podpora velkých inovativních projektů demonstrujících nízkouhlíkové technologie a postupy v energeticky náročných průmyslových odvětvích, v oblasti obnovitelných zdrojů energie, skladování energie, zachycování a ukládání uhlíku (CCS) či v průmyslovém zachycování a využívání uhlíku (CCU). Výše financí se bude odvíjet od cen emisních povolenek v období let 2020 až 2030. Inovační fond by tak mohl disponovat až 10 miliardami eur (SFŽP, 2024).

Celkové financování z EU pro období let 2021-2027 na projekty související s vodíkem se v současné době odhadují na 18,8 miliardy eur. Podpora je přidělována prostřednictvím několika programů. Dvěma hlavními zdroji financování jsou Nástroj pro oživení a odolnost a Inovační fond. Inovační fond spravuje Evropská komise a Česká republika uspěla s projektem z oblasti výroby vodíku v podané výzvě. Inovační fond by se tak měl zaměřit na podporu velkých i malých projektů v oblasti vodíkového hospodářství. S podporou fondu by mělo dojít k inovativní elektrifikaci a aplikaci vodíku v průmyslu s předpokládanou alokací 1 miliarda eur s cílem redukovat využívání fosilních paliv v průmyslových procesech. Do inovativní výroby čistých technologií by mohlo být alokováno 700 miliónů eur na výstavby výrobních kapacit obnovitelných zdrojů energie, na elektrolyzéry a palivové články, akumulaci energie a na tepelná čerpadla. Dalších 300 miliónů eur se předpokládá na mid-size pilotní projekty, což zahrnuje konstrukce a provoz pilotních projektů zaměřených na validaci, testování a optimalizaci inovativních dekarbonizačních aktivit uvedených v příloze I. směrnice o EU ETS. Na obecnou dekarbonizaci, která zahrnuje aktivity podporující inovaci a nízkouhlíkové technologie v sektorech uvedených v příloze I. EU ETS, dále pak Carbon Capture and Storage (CCS) a výstavbu nových obnovitelných zdrojů energie, je předpoklad financování ve výši 1 miliardy eur. V posledním bodě je alokováno 800 miliónů eur na aukci na provozní podporu výroby obnovitelného vodíku v rámci Evropské vodíkové banky. Jedná se o provozní podporu ve formě fixní částky rozdílu mezi cenou vyrobeného šedého a obnovitelného vodíku. Podpořen bude jen obnovitelný vodík vyráběný podle pravidel směrnice o obnovitelných zdrojích energie (Sochor, 2023).

4.13.2 Modernizační fond EU

Cílem Modernizačního fondu je v období let 2021 až 2030 podpořit investice do modernizace energetických soustav a zlepšení energetické účinnosti. Umožní tak rychlejší přechod na nízkouhlíkové hospodářství. Pro ČR bude dostupných minimálně 150 miliard korun, což je zhruba 15,6 % z celkových prostředků fondu. Modernizační fond byl vytvořen evropskou směrnicí 2003/87/ES o EU ETS. Pro financování fondu jsou vyčleněna 2 % emisních povolenek za období 2021 a 2030. Celkem by měl mít Modernizační fond k dispozici 227 miliónů kusů povolenek, ty jsou průběžně prodávány na trhu, a proto je celkový objem finančních prostředků závislý na vývoji cen těchto povolenek. Zřízení tohoto fondu se odrazilo i na národní úrovni v zákoně č. 383/2012 Sb. o podmínkách obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů. Od ledna 2020 je platná novela, která do zákona přidává nový paragraf upravující Modernizační fond (MŽP, 2024).

V zákoně č. 383/2012 Sb., § 12 odst. 1 se uvádí, že *„Peněžní prostředky přidělené České republice z Modernizačního fondu podle čl. 10d směrnice 2003/87/ES, v platném znění, (dále jen „prostředky Modernizačního fondu“) jsou příjmem rozpočtu Státního fondu životního prostředí. Prostřednictvím Modernizačního fondu se využijí rovněž veškeré povolenky podle čl. 10c odst. 4 směrnice 2003/87/ES, v platném znění, a 50 % povolenek podle čl. 10 odst. 2 písm. b) směrnice 2003/87/ES, v platném znění“*. V odstavci 2 stejného paragrafu je specifikováno, že „*Část prostředků Modernizačního fondu, která odpovídá výnosu z povolenek podle čl. 10c odst. 4 směrnice 2003/87/ES, v platném znění, se použije přednostně na podporu projektů provozovatelů zařízení na výrobu elektřiny za účelem modernizace, diverzifikace a dekarbonizace odvětví energetiky*“. O poskytování prostředků z Modernizačního fondu rozhoduje podle tohoto zákona ministr životního prostředí a při posuzování budou zvýhodněny projekty realizované v regionech postižených útlumem těžby uhlí. V rámci zákona o obchodování s emisními povolenkami byl stanoven Státní fond životního prostředí České republiky příjemcem prostředků z Modernizačního fondu a plní roli zprostředkovatele.

Jeden z programů Modernizačního fondu se nazývá RES+, kde budou podporovány projekty nových nepalivových obnovitelných zdrojů energie, což zahrnuje například výstavbu fotovoltaických elektráren, výstavbu vodíkové technologie a výstavbu a modernizaci větrných elektráren včetně vodíkových technologií a prvků aktivního energetického hospodářství. Další program je GreenGas, kde budou podporovány produkce

a využití plynných a kapalných paliv vyráběných u obnovitelných zdrojů, zejména infrastruktura pro mezinárodní a vnitrostátní přepravu, distribuci a skladování obnovitelného vodíku, RFNBO a biometanu a elektrolyzéry pro výrobu obnovitelného vodíku (SFŽP, 2024).

4.13.3 Horizont Evropa a Fond pro spravedlivou transformaci

Horizont Evropa je Rámcový program EU pro výzkum inovace. Financuje vývoj nových vodíkových technologií, včetně palivových článků, vodíkových automobilů i infrastruktury. Klíčovou součástí je také partnerství zaměřené na vývoj vodíkových technologií. Fond pro spravedlivou transformaci podporuje přechod od fosilních paliv k nízkouhlíkovým technologiím v regionech nejvíce postižených odklonem uhlí. Lze využít jak na vodíkovou infrastrukturu, tak na průmyslové projekty spojené s vodíkem (dotaceeu, 2025).

5 Vlastní práce

V této kapitole bude diplomová práce zaměřena na výrobu a využití vodíku v petrochemickém průmyslu, s porovnáním výroby vodíku z různých zdrojů energie, jeho využití a strategické plány do budoucna v rámci přechodu ze šedého vodíku na tzv. zelený (čistý) vodík neboli výroba vodíku z obnovitelných zdrojů energie. Současný průmysl je stále ve většině případů zásobován zdroji energie z fosilních paliv. Aby se dosáhlo snižování produkce skleníkových plynů, a především oxidu uhličitého tak, jak se Česká republika zavázala v mezinárodních dohodách a v dohodách EU, je nutné investovat do nových technologií a modernizovat stávající. Pokud by se mělo vyprodukovat stejné množství vodíku z obnovitelných zdrojů jako je momentální celková výroba, nestačila by nám veškerá energie ze všech solárních a větrných elektráren na světě. Tato práce porovná zároveň návratnost investice technologie z obnovitelných zdrojů energie, které jsou zahrnuty teprve do fáze přípravy, včetně jejich výkonu, investičních nákladů, dotací nebo plánované množství výroby vodíku.

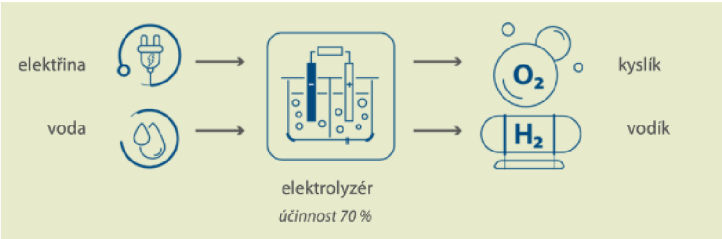
5.1 Výroba vodíku

Vodík není zdrojem energie, ale její nosič. Na zemi se nevykytuje v elementární podobě a jeho využití je mnohem širší než pouze jako palivo. Ročně je na světě vyrobeno více než 65 miliónu tun vodíku. V dnešní době se drtivá většina světového vodíku vyrábí z fosilních paliv a to nejčastěji ze zemního plynu, zhruba 62 %, dále pak z uhlí 19 % a z ropných zbytků a dalších vedlejších produktů vzniklých při průmyslové výrobě 18 %. Téměř vždy jde o proces zahřátí uhlíkatého paliva v přítomnosti s nějakým katalyzátorem, během nějž při jeho reakci dojde k chemickému rozkladu a následné reakci se vzduchem. Při tomto procesu však vzniká poměrně velké množství oxidu uhličitého (CO_2). Na 1 kg vodíku může být vyprodukováno až 10 kg CO_2. Jedná se o šedý vodík. Tato metoda je nejvyužívanější také z důvodu nízkých nákladů. Snížit množství skleníkových plynů z takto vyrobeného vodíku je možné zachytáváním vzniklého oxidu uhličitého. Tento proces se nazývá Carbon Capture System (CCS) neboli systém zachytávání uhlíku. CCS proces se v České republice nevyužívá, jelikož je náročný na umístění z pohledu geomorfologické situace. K jeho ukládání je potřeba nepropustných hornin, které se zde nevyskytují.

Nejlepším řešením je vyrábět vodík bez přímé produkce těchto plynů, tedy elektrolýzou vody. Jedná se o jednoduchý chemický proces, kdy dochází k rozkladu vody

H_2O na ionty H_2^+ a O_2^-. K tomuto procesu je potřeba vodu a elektřinu. Na výrobu 1 kg vodíku potřebujeme okolo 55-60 kWh elektrické energie a přes 10 litrů vody. Aby však docházelo k čisté výrobě vodíku, musí být dodávka elektrické energie z obnovitelných zdrojů.

Výroba obnovitelného vodíku elektrolýzou je energeticky náročná, protože při ní dochází ke ztrátám určitého množství elektrické energie. Zpětná přeměna vodíku na elektřinu vede k dalším energetickým ztrátám. Předpoklad stanovení účinnosti elektrolyzéru je okolo 70 %, jak je zaznamenáno na obr. 9. Účinnost se liší podle použitých technologií.



Obr. 9 – Výroba vodíku elektrolýzou s účinností 70 % (zdroj: Evropský účetní dvůr)

Tato bezemisní výroba vodíku by do budoucna mohla stále častěji nahrazovat zemní plyn. Problém by však mohl nastat v distribuci. Nabízí se varianta přimíchávání vodíku do plynovodního potrubí distribuční a přepravní soustavy. Vodík je ale oproti zemnímu plynu méně viskózní, čili je více tekutý a tím rychleji potrubím poteče. To může způsobit hned několik technických problémů, jako jsou například vibrace v potrubí nebo přeprava většího množství plynu spolu s přepravou daného množství energie. Nároky na těsnost u technologií používající se k přepravě vodíku budou mnohem větší než u zemního plynu. Dalším problémem by mohlo být také tzv. vodíkové křehnutí, jev působící na ocelové materiály. V kontaktu s vodíkem při tlaku vyšším než 10 barů molekuly vodíku mohou pronikat do krystalické mřížky materiálu a dochází tak ke křehnutí až po trhliny v potrubí. Rozdíly ve fyzikálně chemických vlastnostech zemního plynu a vodíku jsou uvedeny v tabulce (Tab. 2).

Vlastnosti	Jednotky	Zemní plyn	Vodík
molekulová hmotnost	g/mol	16	2
bod tání (při tlaku 101,3 kPa)	°C	-182,5	-259,2
bod varu (při tlaku 101,3 kPa)	°C	-161,6	-252,7
kritická teplota	°C	-82,7	-239,9
kritický tlak	Mpa	4,596	1,29
hustota plynu	kg/m3	0,68	0,09
relativní hustota plynu (vzduch=1)	-	0,55	0,07
teplota vznícení	°C	600	520
dolní mez výbušnosti	obj.%	5	4
horní mez výbušnosti	obj.%	15	75
výhřevnost	MJ/m3	35,9	10,8
spalné teplo	MJ/m3	38,8	12,8

Tab. 2 – Rozdíly ve fyzikálně chemických vlastnostech zemního plynu a vodíku (tabulka vlastní, zdroj: Galík T., 2024: Biometan a vodík pro mladé)

Vodík je možné získávat ze zemního plynu, ropy, z uhlí nebo elektrolýzou vody (obr. 10). V současné době se v rámci petrochemických procesů získává nejvíce vodíku ze zemního plynu, zhruba 48 %. Výroba vodíku z ropy činí 30 %, z uhlí 18 % a z vody pouze 4 %. Aby došlo k získání vodíku H2, je nutné mít dostatek energie na rozštěpení vazeb H (vodík) - O (kyslík) i C (uhlík) – H (vodík). Rovnice pro získávání vodíku jsou následující – pro zemní plyn rovnice 1, pro fosilní zdroje rovnice 2 a pro elektrolýzu vody rovnice 3:

Získávání vodíku:

- ✓ zemní plyn:

  $$\mathbf{CH_4 + 2H_2O \rightarrow 2H_2 + CO_2} \quad (1)$$

- ✓ ropa – fosilní zdroje (parciální oxidace těžkých zbytků) :

  $$\mathbf{C_xH_y + O_2 \rightarrow H_2 + CO_2} \quad (2)$$

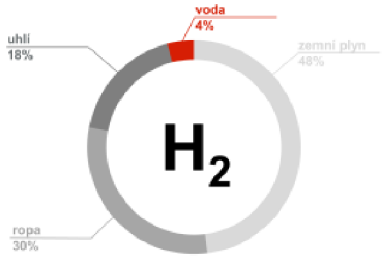
  - ➢ jedná se o tzv. šedý vodík vyrobený z fosilních zdrojů
  - ➢ emise CO_2 nevznikají při jeho použití, ale pouze při jeho výrobě
  - ➢ toto se nazývá čisté tank-to-wheel palivo
  - ➢ zajímavostí je, že do této rovnice spadá také „modrý vodík“, avšak rozdíl je v jeho následném ukládání uhlíku CCS nebo jeho využitím CCU, který se ale u nás nevyužívá

- ✓ elektrolýza vody:

  $$\mathbf{2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2} \quad (3)$$

  - ➢ jedná se tzv. o zelený vodík vyrobený z obnovitelných zdrojů energie

- kompletně bezemisní palivo či surovina
- emise CO_2 nevznikají ani při výrobě ani při použití
- toto se nazývá well-to-tank (výroba) a tank-to-wheel (použití)
- zajímavostí je, že do této rovnice spadá také „fialový vodík“, avšak rozdíl je, že se k jeho výrobě využívá elektřina z jaderných elektráren



Obr. 10 – Podíl získávání vodíku v rámci petrochemických procesů (zdroj: Unipetrol, 2024)

Pro výrobu zeleného vodíku je potřeba hodně vody. V následné rovnici 4 výroby zeleného vodíku jsou uvedeny hodnoty.

Rovnice: $$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad (4)$$

	18 g/mol	2 g/mol	16 g/mol
Voda:	9 kg	1 kg	8 kg

5.2 Emisní náročnost vodíku

Zelený vodík vyrobený z plně obnovitelného zdroje má nulovou emisní náročnost – 0 g CO_2/1 kg vodíku. V elektrolyzéru musí emisní náročnost splnit kritérium úspory 70 % CO_2 oproti fosilní výrobě elektřiny 94 g CO_2/MJ. Hodnoty emisní náročnosti se vypočítávají měsíčně. Pokud je překročena legislativně stanovená hodnota 3,38 kg CO_2/1 kg vodíku, již se nejedná o obnovitelné palivo nebiologického původu (RFNBO). Nízkouhlíkový vodík však není podporován k plnění cílů legislativy, jako je to u vodíku z obnovitelných zdrojů. Aby v ČR byla zachována konkurenceschopnost, bojuje Ministerstvo průmyslu za co nejméně striktní pravidla výroby vodíku. Cíl v dopravě podle posledních informací je nastaven na 0,5 %, v průmyslu ve výši 42 %. Z tohoto cíle

v průmyslu je vyjmut vodík, který je použit jako meziprodukt pro výrobu konvenčních paliv a biopaliv v rafinerii, nebo je vyroben pomocí dekarbonizace průmyslových plynů, anebo je vyroben jako vedlejší produkt v rámci průmyslových instalací.

5.3 Využití vodíku

Vodík je dobře známá a hojně používaná chemikálie napříč průmyslem. Jedním z hlavních použití je při výrobě současných kapalných paliv. Důležitou a osvědčenou technologií je výroba čpavku, tzv. Haber-Bosch syntéza, za kterou byla udělena Nobelova cena za chemii v letech 1918 a 1931. Bezemisní vodík má téměř neomezený potenciál dekarbonizovat rafinérský, petrochemický a jiný těžký průmysl. V petrochemickém průmyslu se vodík používá k výrobě čpavku 50 %, paliv 35 %, metanolu 10 % a v ostatních výrobních procesech 5 %.

5.3.1 Vodík pro mobilitu

Čistota vodíkového paliva je stanovena mezinárodní normou ISO 14 687-2, tak jak je uvedeno v tabulce 3. Výroba v současné době probíhá tak, jak je již popsáno v předchozích kapitolách. Čistý vodík je dle normy 99,99 obj. %.

Směs	Vzorec	Max. obsah	Jednotka
Vodík	H_2	99,97	Vol %
Voda	H_2O	5	ppm
Uhlovodíky	THC	2	ppm
Kyslík	O_2	5	ppm
Helium	He	300	ppm
Dusík	N_2	100	ppm
Argon	Ar	100	ppm
Oxid uhličitý	CO_2	2	ppm
Oxid uhelnatý	CO	0,2	ppm
Síra	TS	4	ppb
Formaldehyd	CH_2O	10	ppb
Kyselina mravenčí	CH_2O_2	200	ppb
Čpavek	NH_3	100	ppb
Halogenové sloučeniny	TX	50	ppb

Tab. 3 – Norma ISO 14 987-2 stanovující čistotu vodíku pro FCVE (Fuel Cell Electric Vehicle – elektrický automobil s palivovými články) (tabulka vlastní, zdroj: ORLEN Unipetrol)

První veřejné vodíkové čerpací stanice v ČR byly vybudovány v roce 2021 v Praha – Barrandov a v Litvínově, v roce 2022 poté v Brně a v Praze – Horní Počernice a v roce 2023

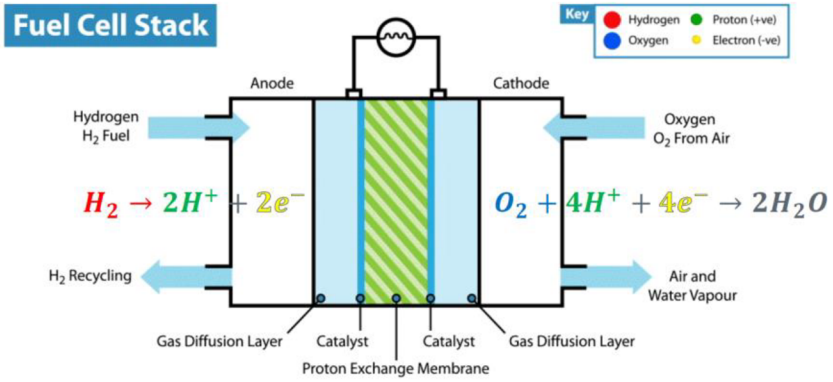
v Plzni. Plnící stanice jsou vybaveny výkonnými čerpadly, která stlačí vodík na 700 atmosfér. Náklady na takovou pumpu se šplhají až k 25 miliónům korun. V Litvínově již tento rok proběhl také zkušební provoz vodíkového autobusu. Spotřeba vodíku pro autobusovou dopravu je až šestinásobně vyšší než u osobního automobilu.

Vodíková auta však na vodík nejezdí. V motorové části mají zabudovaný palivový článek. Nepoužívají tedy ke svému pohonu elektřinu uloženou v baterii, ale vyrábějí si vlastní energii pomocí chemické reakce vodíku s kyslíkem v sadě palivových článků. Palivový článek čerpá vodík z tlakového zásobníku a následně se slučuje s kyslíkem a vyrábí tak elektřinu k pohonu elektromotoru a vodní páru, což je patrné na obr. 11. Tento proces probíhá v polymerní elektrolytické membráně (PEM) palivového článku. Ten je složený ze sady tenkých desek z grafitu a vodivých kovů, oddělených membránami. Jeden článek podává napětí okolo 1,5 voltu a k dosažení výkonu 100 kW je potřeba do jednoho svazku poskládat kolem tři sta. V každém z nich musí proudit plyny a odtékat voda. Chemická účinnost samotné reakce dosahuje 83 %, ale dochází tam ke ztrátám, které je nutné odečíst, např. chlazení, vhánění vzduchu, regulace. Praktická účinnost systému tak klesá do rozmezí 35 – 50 %. Pořád ale je primárním zdrojem energie elektrárna a vodík je jen nosič. Jednoduše řečeno, pokud se jedná o obnovitelné zdroje, tak se z elektřiny vlastně vyrobí vodík, který pak vyrábí v automobilech elektřinu. Palivový článek je oproti baterii uložené v elektromobilu skladnější a lehčí. Vodíkový pohon tak bude do budoucna daleko výhodnější pro dálkové autobusy nebo nákladní dopravu, které by jinak musely tahat několikatunové akumulátory. Dálková a těžká doprava jinou možnost, než vodík do budoucna nejspíš mít nebude.

Na následných rovnicích 5 a 6 je to patrné:

výroba vodíku z obnovitelných zdrojů $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ (5)

výroba elektřiny v automobilech $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ (6)



Obr. 11 – Zásobník palivových článků (zdroj: ORLEN Unipetrol)

Fuel Cell Stack – zásobník palivových článků

Hydrogen – vodík

Oxygen – kyslík

Hydrogen fuel – palivový vodík

Oxygen from air – kyslík ze vzduchu

Recycling – recyklace vodíku

Air and water vapour – vzduch a vodní pára

Gas diffusion layer – plynová difúzní vrstva

Catalyst – katalyzátor

Proton Exchange membrane – protonová výměnná membrána

Potenciál vozidel FCEV je závislý na několika faktorech. Jedním z nich je dostupnost zeleného vodíku, který je vyráběn pomocí obnovitelné energie a dále na infrastruktuře poskytující dostatečnou síť vodíkových čerpacích stanic po celé Evropě.

V současné době se uvádí, že čas strávený na vodíkových stanicích je většinou pod pět minut. Ačkoli výroba vodíku zatím produkuje emise, do budoucna je počítáno s vodíkem z obnovitelných zdrojů, tím se výrazně přispěje k dekarbonizaci dopravy. Nevýhodou zůstávají stále vysoké investiční náklady na pořízení vodíkových elektromobilů a zatím také vysoké náklady za palivo. To by se mohlo s nárůstem počtu vozidel měnit a ceny by mohly klesat. Jediné nižší náklady jsou za dálniční známku a jako ekologické vozidlo má další výhody nejen u nás, ale i v zahraničí, jako například parkování, zóny, poplatky.

5.4 Výroba a využití vodíku ve světě

Přestože první země, která představila vodíkovou strategii, je Japonsko, ve světě vodíkovému trhu vévodí Čína, za ní Severní Amerika. V Číně se aktuálně využije 29 % produkovaného vodíku, je tedy největším producentem. V roce 2020 disponovala Čína méně než 10 % celosvětové kapacity elektrolyzéru instalovaných pro výrobu vodíku, v roce 2022 se kapacita zvýšila na více než 200 MW, což udává zhruba 30 % celosvětové kapacity a v roce 2023 dokonce dosáhla 1,2 GW, což je zhruba 50 % celosvětové kapacity. Čína má navíc největší podíl na trhu s elektrolyzéry a taktéž má největší elektrolyzér na světě, a to o výkonu 260 MW.

5.5 Technologie výroby vodíku používaná v petrochemickém závodě a jeho využití z chemického hlediska

V současné době se v rafinérsko-petrochemickém průmyslu využívá několik možných technologií pro výrobu vodíku. Téměř všechen vyrobený vodík následně využívá v rámci společnosti pro výrobu dalších produktů a pouze část je dále dodávána dalším odběratelům. Vyráběný vodík ve společnosti je šedý vodík, stále vyráběný z fosilních paliv. Ke snížení emisí v tomto závodě slouží zařízení nazývané fléry. Jedná se o polní hořák neboli havarijní pochodeň k dodatečnému spalování plynů. Emise z tohoto zařízení však není možné měřit z důvodu vysokých teplot na zařízení. Jakýkoliv odplyn z výroby je možné odflérovat. Ve fázi realizace je záměr výstavby nové fotovoltaické elektrárny a vybudování největšího elektrolyzéru v zemi. Jedná se o miliardový projekt, po jehož dokončení by společnost v roce 2025 mohla dosáhnout výrobní kapacity až 990 tun vodíku.

5.5.1 Parciální oxidace (POX) - výrobna zplyňování mazutu (těžkých ropných produktů)

Ropa se přivede do rafinérie, tam se z ní získá benzín a nafta, zbytek z ropy „putuje“ na zplyňování. Krom vodíku se ve výrobně zplyňování mazutu vyrábí také odsířený syntézní plyn a oxid uhličitý, jehož složení a chemické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 4 a 5. Řízené chemické reakce probíhají v reaktorech Shell. Reaktory jsou uspořádány jako tři dvojice, každý z reaktorů je možné samostatně provozovat, vyhřívat nebo odstavit do studené zálohy, popřípadě zcela demontovat z technologického celku. Spalováním zemního plynu je předehřátá vyzdívka reaktorů, tak aby došlo k vyhřátí a uvedení reaktorů do provozních teplot potřebných k procesu zplyňování. Až se reaktory vyhřejí na samozápalnou teplotu,

spalování zemního plynu je odstaveno. Poté se do reaktorů nasává surovina a zahajuje se chemická reakce. Za současného přidávání kyslíkoparní směsi dochází ke zplyňování suroviny v reaktorech. Jedná se o exotermický proces parciální oxidace, který probíhá za teploty 1300 – 1400 °C. Současně se zplyňovanými ropnými zbytky je do generátoru přivedena předehřátá kyslíkoparní směs.

CO	0,09 % obj.	CO_2	0,00 % obj.
H_2S	0,00 % obj.	H_2	0,83 % obj.
C_2H_6	0,53 % obj.	C_3H_8	0,18 % obj.
C_4H_{10}	0,05 % obj.	C_5H_{12}	0,02 % obj.
C_6H_{14}	0,01 % obj.	CH_4	98,29 % obj.

Tab. 4 – Chemické složení zemního plynu (tabulka: vlastní, zdroj: ORLEN Unipetrol)

Specifická hmotnost	0,67 kg.m³
Spalné teplo	39,7 MJ.m³
Výhřevnost	35,9 MJ.m³
Meze výbušnosti	5,2 15,0 % obj.
Bod vznícení	632 °C
Skupina výbušnosti	II A
Teplotní třída	T 2

Tab. 5 – Fyzikálně – chemické vlastnosti plynu (tabulka: vlastní, zdroj ORLEN Unipetrol)

Vstupními surovinami jsou černý destilát (ČD), vakuové zbytky a visbreakingový zbytek. Tyto těžké ropné zbytky projdou parciální oxidací (POX) za přítomnosti kyslíku a páry v reaktorech. K výrobě páry potřebné v technologii jednotky se využívá teplo surového syntézního plynu. Vstupním palivem je zemní plyn. Výstupním produktem je vzniklý syntézní plyn. Ten je vypírán vodou, čímž je zbaven sazí a následně pak sirovodíku vypírkou. Odsířený syntézní plyn je v teplotní jednotce podroben konverzi oxidu uhelnatého na oxid uhličitý, který je vyprán speciálním roztokem. Následnou metanizací jsou ve vodíku odstraněny stopy oxidu uhelnatého i uhličitého. V tab. 6 je uvedena charakteristika všech ropných zbytků a v tabulce 7 obecné charakteristiky kapalných paliv:

ČD – černý destilát – plynové oleje (ropné), těžké vakuové, těžký topný olej

VZ – vakuový zbytek – zbytek ropný, vakuovaný, asfalt

VBR – visbreakingový zbytek – zbytek ropný, termálně krakovaný vakuový asfalt

Označení	Jednotka	ČD	VZ	VBR
S	% m/m	max. 2,7	max. 3,5	max. 3,8
Na	mg/kg	max. 50	max. 50	max. 50
obsah popela	% m/m	max. 0,040	1294 ppm	-
viskozita při 20 °C	mm^2/s	cca 5-40	-	-
viskozita při 50 °C	mm^2/s	-	<350	<1850
hustota při 20 °C	kg/m^3	955-980	1005-1025	-
bod vzplanutí	°C	> 250	> 250	> 250
bod varu při tlaku 101,3 kPa	°C	350-600	500	500
bod měknutí	°C	-	60	80
Tenze par při 20 °C	kPa	<0,01	<0,01	<0,01
Teplota na příjmu	°C	80-90	110-130	150-160
Teplota skladovací	°C	<100	110-130	150-160
Množství	t/hod.	max. 50	max. 50	max. 50

Tab. 6 – Charakteristika ropných zbytků (tabulka: vlastní, zdroj: ORLEN Unipetrol)

V tabulce 7 je definováno, že těžký topný olej i destilační zbytky z rafinace obsahují velké množství uhlíku, což může zvyšovat náklady za uhlíkové poplatky, emisní povolenky. Plynový olej má hodnoty hodné nízké nebo nejsou měřitelné. Tyto hodnoty jsou uvedeny v evropském dokumentu BREF – Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách BAT pro velká spalovací zařízení. Vždy je nutné modernizovat a nahrazovat stávající zařízení tak, aby se minimalizovali dopady na životní prostředí a docházelo ke snižování emisí ze stacionárních zdrojů.

Vlastnost	Jednotka	Plynový olej	Těžký topný olej	Destilační zbytek z rafinace
Obsah uhlíku	%	NA	84–90	85–88
Obsah vodíku	%	NA	10–13	8–12
Obsah síry	%	<0,1	<1	1–4
Obsah vody	%	<0,02	<1,5	<0,5
Obsah sedimentů	%	<0,1	<0,25	<0,2
Obsah sodíku	ppm	NA	1–200	NA
Obsah vanadu	ppm	NA	1–200	200–350
Kinematická viskozita (20 °C)	mm^2/s	<9,5	>28,4	NA
Bod vzplanutí (hořlavost)	°C	>55	>70	NA
Hustota při 15 °C	kg/dm^3	0,87	0,94 – 1,04	NA
Spalné teplo	MJ/kg	45	41,5 – 44,5	NA
Výhřevnost	MJ/kg	42	39,5 - 42	38–40
Poznámka: NA: Není k dispozici				

Tab. 7 – Obecné charakteristiky kapalných paliv (tabulka: vlastní, zdroj: BREF – Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách BAT pro velká spalovací zařízení)

Na metanizaci přichází plyn z druhého stupně vypírky CO_2. V celém systému výměníků vstup – výstup plynu je předehříván s využitím reakčního tepla. Teplota plynu je zvýšena na teplotu 250–260 °C, která je potřebná pro průběh metanizační reakce. Tato reakce je exotermická, viz rovnice 7, 8 a 9:

$$CO + 3\ H_2 = CH_4 + H_2O \tag{7}$$

$$CO_2 + 4\ H_2 = CH_4 + 2\ H_2O \tag{8}$$

$$O_2 + 2\ H_2 = 2\ H_2O \tag{9}$$

Reakcí dojde ke snížení obsahu z 0,2 % mol. CO_2 a 0,4 % mol. CO na obsah 10 ppm CO + CO_2 v součtu. Potřebná reakční rychlost je zajišťována katalyzátorem na bázi niklu (Ni). Plyn z reaktoru, čistý vodík, předává teplo vstupujícímu plynu a po ochlazení vystupuje jako konečný produkt. Proces metanizace probíhá za tlaku 2,6 – 2,7 MPa a v rozmezí teplot 30–340 °C.

Tyto termochemické procesy patří mezi šedé nebo modré vodíkové technologie, v závislosti na tom, zda se zachytává oxid uhličitý. Proces tohoto zachytávání již byl zmíněn. Je to tzv. Carbon Capture and Storage, proces, při kterém je zachytáván oxid uhličitý, který je následně uložen, aby neunikl zpět do ovzduší.

Přínos výroby vodíku zplyňováním mazutu:

Plynný vodík je dodáván k další úpravě a poté výsledný čistý vodík putuje potrubím v areálu pro syntézy čpavku, jednotku Rafinerie a RPA. Pomocí molekulových sít jsou odstraněny nežádoucí složky a je získáván vodík o vysoké čistotě, který je pak dodáván odběratelům. Oxid uhličitý, odpadávající při vypírce CO_2 je surovinou pro tvorbu technického oxidu uhličitého.

5.5.2 Pyrolýza

Základem je tepelný rozklad neboli pyrolýza uhlovodíkových surovin za vzniku pyrolýzního plynu. Pyrolýzní plyn je směs vodíku H_2, oxidu uhelnatého CO, oxidu uhličitého CO_2 a metanu CH_4. Jeho úpravou a dělením se získávají hlavní produkty, jež jsou ethylen, propylen, C4 frakce nebo benzen pro petrochemický průmysl. Technologické úseky se mimo jiné skládají z pyrolýzní pece, teplého dílu, komprese a dělení pyrolýzního plynu. Surovinami jsou především primární benzín, plynový olej, hydrokrakovaný vakuový destilát (HCVD) a zkapalněné uhlovodíkové plyny (LPG), může být ale také plastový odpad.

Předehřátá surovina vstupuje do konvekčních částí pyrolýzních pecí. Technologická pára o tlaku kolem 600 Mpa a teplotě 170–300 °C se přidává v poměru 0,45 až 0,8 pro kapalné suroviny a 0,3 až 0,6 pro plynné. V radiační části dochází k pyrolýze – teplenému štěpení. Plynné suroviny a primární benzín se štěpí při teplotě 830–855 °C, plynový olej a HCVD pak při teplotě 790 – 805 °C. Hlavním produktem je pyrolýzní plyn neboli směs vodíku a uhlovodíků od metanu, až po nejtěžší olejové frakce. Pyrolýzní plyn je nadále ochlazován na teplotu kolem 200 °C. Teplo potřebné k pyrolýze suroviny se vyvíjí spalováním topného plynu. Ten obsahuje převážně metan a je bezsirný. Palivo se spaluje v plynových hořácích. Spaliny jsou kontinuálně analyzovány na obsah kyslíku, oxidu uhelnatého a dusičnanů. K emisím znečišťujících látek může docházet pouze ze spalování zemního a topného plynu, který ale svým složením odpovídá plynu zemnímu. Ochlazený pyrolýzní plyn vstupuje do procesu dělení. Jedná se o destilaci, hydrogenaci a adsorpci. Komprese pyrolýzního plynu je prováděna v několika stupních, kdy za každým stupněm komprese následným ochlazením zkondenzuje část vody a uhlovodíků. Mezi třetím a čtvrtým stupněm komprese jsou odstraněny z plynu kyselé složky H_2S a CO_2. Je zde tedy zařazena louhová vypírka kyselých plynů.

Probíhající reakce znázorněny v rovnicích 10 a 11:

$$H_2S + 2NaOH = Na_2S + 2H_2O \quad (10)$$

$$CO_2 + 2NaOH = Na_2\ CO3 + H_2O \quad (11)$$

Odpadní louh se neutralizuje pomocí kyseliny sírové. Neutralizovaný odpadní louh od kyselých plynů (H_2S a CO_2) odchází do systému odpadních vod, kyselý plyn je zaveden ke spálení. Vzhledem ke skutečnosti, že technologické zařízení komprese včetně louhové vypírky pyroplynu je uzavřené zařízení, nevznikají emise uhlovodíků do ovzduší.

V další fázi se provede sušení a hluboké chlazení pyrolýzního plynu až na teplotu -165 °C. Během podchlazení zkondenzují všechny složky pyroplynu kromě vodíku a oxidu uhelnatého a části metanu. Metan se po uvolnění z kapalné fáze komprimuje a přidává do topného plynu. V plynné fázi zůstává pouze vodík.

Po ochlazení a vysušení je část vodíku přiváděna k dočištění. Ze systému separace vystupuje surový vodík s obsahem asi 0,1–0,3 % obj. Pro další použití je zbaven oxidu uhelnatého (rovnice 12) v metanizačním reaktoru po předchozím předehřátí na 260 °C jejich vzájemnou reakcí v přítomnosti katalyzátoru za vzniku metanu.

$$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O \quad (12)$$

Přínos výroby vodíku pyrolýzou:

Upravený vodík se dále využívá jako nástřik jednotky PSA (pressure swing adsorption – výroba vysoce čistého vodíku) k výrobě čistého vodíku, k selektivní hydrogenaci C_2 frakce, k selektivní hydrogenaci pyrolýzního benzínu pro výrobu benzenu a pro potřeby hydrodealkylace. Vysoce čistý vodík z jednotky PSA se pak využívá k selektivní hydrogenaci C_2 frakce a C_3 frakce a pro potřeby výroby polyethylenu a polypropylenu. Všechna technologická zařízení jsou uzavřená a nevznikají tak emise škodlivých látek do ovzduší.

5.5.3 Jednotka CCR (Continuous Catalytic Reforming) - jednotka reformingu s kontinuální regenerací katalyzátoru

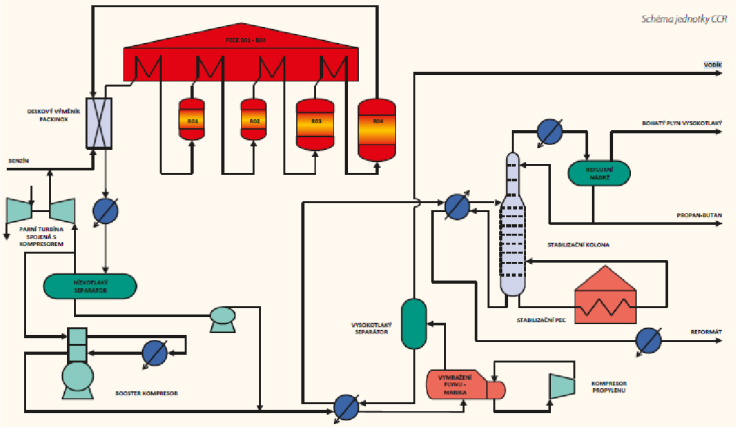
Surovina pro tuto jednotku CCR je získávána destilací ropy, následnou hydrogenací primárního benzínu a jeho redestilací. Vstupní surovinou je tedy odsířený těžký benzín z jednotky redestilace a těžký benzín z jednotky hydrokraku. Hlavním produktem je vysokooktanová aromatická směs uhlovodíků s označením reformát, která je jednou z hlavních složek automobilového benzínu. Produkty a jejich další zpracování jsou uvedeny v tab. 8.

Produkty	reformát	propan-butan	plyn vysokotlaký	vodík
Další zpracování	mísení autobenzínu	dělení plynu	dělení plynu	stlačení a distribuce do hydrogenačních a hydrokrakovacích jednotek

Tab. 8 - Výstupní suroviny vyrobené na jednotce CCR (zdroj: vlastní)

Dalšími produkty jsou vodíkový plyn a kapalný plyn, převážně propan-butan. Těžké benzíny z destilace ropy mají nízké oktanové číslo a není možné jej použít pro výrobu automobilového benzínu. Oktanové číslo se zvyšuje procesem katalytické reformování. Při tomto procesu se mění struktura uhlovodíků. Reformování se provádí v přítomnosti katalyzátoru a vodíku, který zabraňuje koksotvorným reakcím. Katalyzátory jsou bimetalické Pt-Sn – platina a cín na nosiči alumina. Při katalyckém reformování se vodík nespotřebovává, ale naopak vzniká. U reformingu CCR katalyzátor cirkuluje mezi reaktory

a regenerátorem a tam dochází k regeneraci. Na obr. 12 je možno shlédnout schéma jednotky CCR.



Obr. 12 – Schéma jednotky CCR (zdroj: ORLEN Unipetrol, 2024)

Směs benzínu je tedy vedena do výměníku, kam je zaveden cirkulační plyn z výtlaku turbokompresoru a tato směs je dále předehřívána v reformingovém předehřívači. Ohřev 490–515 °C. Po tomto ohřevu je surovina zavedena do prvního reaktoru. Endotermní reakce způsobující snížení teploty o více jak 100 °C, což je pro reakci zásadní a reaktorový odtah, který je dále používán jako nástřik pro druhý reaktor, musí být opět předehříván. Ve druhém reaktoru je snížení teploty už pouze kolem 80 °C. Odtah z třetího reaktoru s poklesem teploty o 60 °C je ohříván v peci a v posledním reaktoru klesá teplota o 40 °C. Ve všech čtyřech reaktorech je reakční směs vedena přes katalyzátor, který neustále cirkuluje. Z odtahu čtvrtého reaktoru jsou po chlazení odděleny vodíkové plyny od kapaliny. Pro dopravu katalyzátoru se využívá potrubí dopravující katalyzátor ze spodní násypky do horní násypky. Toto se nazývá lift (zvednout, výtah). Jednotka má 5 liftů, přičemž dva využívají dusík, a tři vodíkový plyn.

<u>Přínos výroby vodíku jednotkou CCR</u>:

Uvolněný vodíkový plyn je rozdělen. Část se vrací po komprimaci na začátek procesu do výměníků jako cirkulační plyn a zbytek je po čištění a ochlazení na teplotu kolem 0 °C oddělen od kapaliny a odváděn ke kompresi přímo v jednotce CCR, kde se komprimuje na tlak 2,3 Mpa. Následně je dodáván na jednotku KaDP (komprese a distribuce plynu). Do této jednotky je dodáván stejně tak vodík z výrobny POX i z pyrolýzy a posílá se do závodní sítě vodíku k využití pro hydrorafinační a hydrokrakovací procesy v rafinérii, popřípadě pro výrobu čpavku.

Výnos vodíku však není nijak závratný. CCR jednotka obvykle produkuje vodík jako vedlejší produkt, protože výtěžnost vodíku je 1–2 % hmotnostních na vstupní surovinu. Z jedné tuny těžkého benzinu lze tak získat přibližně pouze 10–20 kg vodíku.

5.6 Výroba vodíku z pohledu environmentálního u konkrétních technologií

Hlavní rozdíl je mezi šedým a zeleným vodíkem. Základními faktory environmentálního pohledu jsou produkce emisí a energetická účinnost. S tím je následně spojen dopad na biodiverzitu a krajinu, dopad na klima a na spotřebu přírodních zdrojů.

5.6.1 Produkce emisí ze zdrojů znečištění

Výroba vodíku pyrolýzou uhlíkových surovin (např. zemního plynu, biomasy nebo také plastového odpadu) je alternativní cesta k produkci tzv. türkiskového vodíku. Vzniká za nepřítomnosti kyslíku, přičemž vzniká vodík H_2 a pevný uhlík C místo oxidu uhličitého CO_2. Tímto procesem přímé emise závisejí na zdroji energie pro ohřev reakce a hodnoty se pohybují okolo 0,5 – 2 kg CO_2 ekv./kg H_2, pokud je zdrojem energie fosilní palivo.

Při pyrolýze zemního plynu (metanu CH_4) se nepřímé emise v rámci životního cyklu pohybují mezi 1 – 3 kg CO_2 ekv./kg H_2 (na jeden kilogram vodíku). Přímé emise závisejí na zdroji energie pro ohřev reakce. Pyrolýzou biomasy se při zahřátí rozkládá organické sloučeniny na pyrolýzní plyn a biouhlí. Pokud se biouhlí uloží nebo použije v půdě, proces tak může být uhlíkově negativní. Produkce emisí je velmi nízká nebo negativní podle závislosti na využití uhlíkového zbytku. Pyrolýza plastových odpadů vede k tvorbě vodíku, uhlovodíkových plynů a tuhého uhlíku, jelikož plasty obsahují uhlovodíky podobné ropě. Emise závisí na energetickém vstupu a využití vedlejších produktů. Pyrolýza uhlíkových surovin je však spíše nízkoemisní alternativa k výrobě vodíku, která neprodukuje CO_2 přímo. Její uhlíková stopa závisí hlavně na zdroji energie pro proces. Pokud je využita biomasa, může být dokonce uhlíkově negativní.

Výroba vodíku parciální oxidací (POX), zplyňování mazutu patří mezi šedé vodíkové technologie. Tímto procesem vzniká syntézní plyn (vodík, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a metan). Oxid uhelnatý je převeden na H_2 reakcí vysokoteplotní konverze vody a plynu. Přímé emise mohou dosáhnout až 11 kg CO_2 ekv./kg H_2. Nepřímé emise CO_2 mohou vyšplhat na 11–14 kg CO_2 ekv./kg H_2.

Emisní bilance při výrobě vodíku jednotkou CCR závisí na podílu reformingových metod. Tato metoda se používá především ve velkokapacitních výrobních jednotkách. Emise oxidu uhličitého při výrobě vodíku jednotkou CCR při účinnosti procesu přibližně 70 % mohou dosáhnout hodnoty 8–10 kg CO_2 ekv./kg H_2. Většina CO_2 se uvolňuje do ovzduší. Nepřímé emise v rámci životního cyklu výroby se pohybují v rozmezí 9–11 kg CO_2 ekv./kg H_2.

Výroba vodíku z obnovitelných zdrojů energie se obvykle provádí elektrolýzou vody. Přímé emise jsou v tomto případě nulové, pokud je celý proces poháněn z obnovitelných zdrojů. Při hodnocení celkových emisí se berou v úvahu emise nepřímé, které jsou spojené s výrobou zařízení, dopravou a údržbou. V závislosti na typu obnovitelného zdroje a použité elektrolýzy mohou být hodnoty emisí vypočteny na 1–4 kg CO_2 ekv./kg H_2. Nejnižší hodnoty mají vodní a jaderné energie, okolo 1 kg CO_2, vyšší pak větrná energie, 2 kg CO_2 a nejvyšší solární, s hodnotami 3–4 kg CO_2 ekv./kg H_2.

Přechod na zelený vodík může snížit emise v rafinériích o 50-80 %. Přesto výroba vodíku touto technologií může být téměř uhlíkově neutrální s dlouhodobou udržitelností.

Všechny uvedené hodnoty převedeme do tab. 9.

METODA VÝROBY VODÍKU		PŘÍMÉ EMISE (kg CO_2 ekv./kg H_2)	NEPŘÍMĚ EMISE (kg CO2 ekv./kg H2)
PYROLÝZA	zemní plyn (metan CH_4)	0,5-2	1–3
	biomasa	0 až negativní	1–3
ZPLYŇOVÁNÍ MAZUTU	těžké ropné zbytky	~11	11–14
JENDOTKA CCR	těžký benzín	8–10	9–11
ZELENÝ VODÍK	vodní a jaderná energie	0	1
	větrná	0	2
	solární	0	3–4

Tab. 9 – Srovnání emisí různých metod výroby vodíku (tabulka: vlastní, zdroj: Hytep)

5.6.2 Energetická účinnost

Energetická účinnost výroby vodíku závisí na konkrétní technologii (tab. 10) a zdroji energie, ale také na celkové účinnosti systému. Energetickou účinnost metody výroby vodíku z obnovitelných zdrojů může do budoucna zlepšit vývoj pokročilých elektrolyzéru, který může zlepšit účinnost až nad 85 %. Kombinace s odpadním teplem zvýší ekonomiku

výroby. Ke zlepšení mohou přispět také skladovací technologie, které sníží ztráty při přepravě a distribuci. Přeměna elektřiny na vodík pomocí elektrolýzy má energetickou účinnost 60–80 %, při skladování a distribuci dochází ke ztrátám. Přeměna zpět na elektřinu do palivových článků může snížit účinnost na 40–60 %. Celková účinnost vodíkového energetického cyklu (elektřina – vodík – elektřina) může klesnout až pod 30–40 %, což je výrazně méně než přímé využití elektřiny. Při výrobě vodíku z těžkých topných plynů využívající fosilní paliva nebo průmyslové odpady mohou dosáhnout 60–75 % energetické účinnosti. Při oxidaci uhlovodíků, která probíhá za vysokých teplot, se energetická účinnost snižuje kvůli vyšším ztrátám tepla na 50–65 %. Při přeměně zpět na elektřinu klesá účinnost na 40–60 %. Celková účinnost tak může klesnout na 20–40 %, přesto je proces ekonomicky výhodný v průmyslových odvětvích, kde jsou těžké plyny vedlejším produktem.

Metoda výroby vodíku	Účinnost (%)
Výroba z těžkých topných plynů	60–75
Výroba z těžkých uhlovodíků	50–65
Elektrolýza (OZE)	60–80

Tab. 10 – Porovnání energetické účinnosti výroby vodíku z OZE s ostatními technologiemi (tabulka: vlastní, zdroj: International Journal of Hydrogen Energy)

Výhodou výroby vodíků v chemickém průmyslu je oběhové hospodářství. Podporuje cirkulární ekonomiku, protože umožňuje využití odpadních surovin a tím snižování emisí a zvyšování energetické účinnosti. Zbytkové rafinérské oleje a plyny lze přeměnit na vodík, namísto spalování jako odpad. Pyrolýzní oleje z plastového odpadu lze taktéž dále zpracovat na vodík. Odpadní vodík z chemických procesů se také dále zpracovává jako surovina pro výrobu čpavku, metanolu, plastů i syntetických paliv. V rafinériích je možné použít vodík k odsíření ropných produktů (hydrodesulfurizace), nebo k přeměně těžkých olejových frakcí na lehčí paliva procesem hydrokrakování. Využití bioolejů a plastového odpadu lze využít pro výrobu nízkouhlíkového vodíku a je tak pro průmysl stále klíčové. Energetické využití vodíku je možné spalováním v průmyslových kotlích místo zemního plynu, dále pak palivové články pro elektrickou energii a teplo a další možnost je zpětná výroba elektřiny v kombinaci s obnovitelnými zdroji. Klesající cena obnovitelné elektřiny, vývoj pokročilých elektrolyzérů, ale i vodík jako surovina a energetický nosič propojující průmysl, energetiku i dopravu do cirkulárního systému by mohly být budoucností z pohledu ekonomického

i energetického. Největší potenciál do budoucna mohou být syntetická paliva (metanol, čpavek).

5.7 Výroba a využití vodíku z pohledu ekonomického

Náklady na výrobu vodíku se dají pouze odhadovat. Náklady jsou ovlivněny mnoha faktory, včetně ceny elektrické energie, nákladů na technologie, legislativních požadavků, ale i dostupnosti a ceně zdrojů. Mezi další faktory je možné řadit ceny vstupních surovin, efektivitu technologie a požadavky trhu.

5.7.1 Odhady provozních nákladů výroby vodíku u technologií využívaných v rafinérsko-petrochemickém průmyslu

Odhad provozních nákladů na výrobu vodíku zplyňováním mazutu:

Ceny výroby vodíku z těžkých ropných produktů závisí na několika faktorech, včetně ceny vstupních surovin, vstupního paliva, v tomto případě zemního plynu, a účinnosti procesu. Náklady na výrobu dle dostupných informací se mohou pohybovat kolem 1,6– 2,65 EUR (americký dolar) za jeden kilogram vodíku (1600–2650 EUR za jednu tunu). Ve společnosti mohou být ceny výroby i nižší, jelikož těžké ropné zbytky jsou dostupné jako levný odpad z rafinace.

Odhad provozních nákladů na výrobu vodíku pyrolýzou:

Náklady na tuto metodu výroby závisí na ceně vstupních surovin a vstupního paliva jako je zemní plyn, topný plyn nebo biomasa. Záleží taktéž na efektivitě technologie a energetických nárocích. Cena výroby se obvykle pohybuje okolo 1,06–2,12 EUR za jeden kilogram, což odpovídá 1060 –2120 EUR za jednu tunu vyrobeného vodíku.

Odhad provozních nákladů na výrobu vodíku jednotkou CCR:

Vstupní suroviny mají proměnlivé náklady v závislosti na trhu ropy. Typicky se však pohybuje cena vstupních surovin v rozmezí 0,53–1,06 EUR za jeden kilogram, což odpovídá 530–1060 EUR za jednu tunu. Provoz jednotky má však velmi vysokou energetickou náročnost, protože vyžaduje teploty kolem 450–500 °C. Energetické náklady tak mohou tvořit 15 – 20 % celkových výrobních nákladů. Provozní náklady se tedy mohou pohybovat 610–1280 EUR za jednu tunu. Pokud je vodík vyráběn jako vedlejší produkt, jeho efektivní

náklady bývají nižší, než při výrobě primárními metodami jako je například reformování metanu. Je možné rozdělit tedy náklady na výrobu vodíku jednotkou CCR jako vedlejší produkt, kdy se cena odhadem pohybuje na již zmíněných 610–1280 EUR za jednu tunu vodíku a na výrobu při plné alokaci nákladů na vstupní suroviny a energie, kdy cena může stoupnout až na 3190–5310 EUR na jednu tunu vodíku v závislosti na ceně vstupních surovin a provozních podmínkách.

Odhad provozních nákladů na výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů energie:

Náklady na výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů energie jsou ovlivněny mnoha faktory, včetně ceny elektrické energie, nákladů na technologie, legislativních požadavků a dostupnosti obnovitelných zdrojů. Náklady by měly do budoucna klesat, vzhledem k rozvoji technologií a zvyšováním efektivity výroby. Cena výroby jednoho kilogramu vodíku se v současné době odhaduje v ČR na mezi 5,31–5,68 EUR, což odpovídá 5310–5680 EUR za jednu tunu.

5.7.2 Prodejní ceny vodíku na plnících stanicích v České republice a v Evropě

V roce 2023 byla cena na plnících stanicích v ČR dotovaná z propagačních důvodů a kilogram vodíku se tak dal pořídit za 278,- Kč. Od roku 2024 akční nabídka skončila a došlo ke skokovému zdražení na 499,- Kč za jeden kilogram vodíku, které trvá dodnes. Stále však aktuální cena nepokrývá provozní náklady, a to především kvůli nízkému odběru. Vodíkových aut je v provozu minimum a ani provoz několika vodíkových autobusů odběr nezvýší natolik, aby provoz vodíkových plnících stanic nebyl ztrátový. V Evropě se ceny za kilogram vodíku pohybují odlišně. Jejich výši je možné sledovat na portálu H2.live na mapě vodíkových stanic. V Polsku je možné pořídit kilogram vodíku za 69 PLN (polských zlotých), což je v přepočtu aktuálního kurzu přibližně 413,- Kč. V Německu se ceny liší nejvíce. V Drážďanech je cena nejnižší a pohybuje se na 13 EUR (eura), což je podle aktuálního kurzu okolo 380,- Kč za kilogram vodíku. Nejvyšší částku zaplatí odběratelé u rakouských hranic ve výši 19,25 EUR, v přepočtu na české koruny 485,- Kč. V Rakousku se pohybuje cena za kilogram vodíku zatím na nejvyšší hodnotě ve výši 23,99 EUR, v porovnání v české měně se vyšplhá cena na 604,- Kč za kilogram. Do porovnání je zahrnuta cena také ve Švýcarsku, kde se cena pohybuje od 19,75–20,50 CHF (švýcarský frank). V tab. 11 je přehled cen z již zmíněných evropských států v českých korunách.

Stát	cena vodíku (CZK/1 kg)
Česká republika	499
Polsko	413
Německo (nejnižší cena)	380
Německo (nejvyšší cena)	485
Rakousko	604
Švýcarsko (nejnižší cena)	529
Švýcarsko (nejvyšší cena)	549

Tab. 11 – Prodejní ceny vodíku na plnících stanicích v evropských státech (tabulka: vlastní, zdroj: H2.live)

Nejběžněji využívaná vodíková auta mají deklarovaný dojezd okolo 650 km. Plnou nádrž natankují zhruba za 3000,- Kč. Jeden kilometr provozu tak vyjde na 4,6,- Kč. Pro porovnání je možné zmínit ceny fosilních paliv. Jeden litr nafty stojí 36,24,- Kč. Při spotřebě 6 litrů na 100 km, ujedeme jeden kilometr za 2,17,- Kč. Při provozu automobilu na benzín se cena za jeden kilometr, při spotřebě 6 litrů na 100 km a při aktuální ceně 37,62,- Kč za jeden litr benzinu, pohybuje okolo 2,26,- Kč.

5.7.3 Technologie výroby vodíku z obnovitelných zdrojů energie s pomocí elektrolyzéru

Elektrolyzéry na výrobu vodíku z OZE mají klíčovou roli v rozvoji vodíkové ekonomiky. Používají elektrolýzu vody k rozkladu na vodík a kyslík, přičemž je využívána elektřina z obnovitelných zdrojů energie, mezi něž řadíme vodní, větrnou, jadernou i solární. V současné době se využívají nejčastěji tři typy elektrolyzérů, tab. 12. Nejstarší a nejrozšířenější technologií jsou alkalické elektrolyzéry (AEL). Mají relativně nízké investiční náklady, ale na druhou stranu nejnižší účinnost, která se pohybuje kolem 60-70 %. Mezi kompaktnější a flexibilnější elektrolyzéry se řadí PEM elektrolyzéry, tzv. Proton Exchange Membrane (membrána pro výměnu protonu). Mají vyšší pořizovací náklady, ale vyšší účinnost, která dosahuje 70-80 % a rychlou reakci na změnu výkonu obnovitelného zdroje energie. Technologicky složitější, potencionálně vhodné elektrolyzéry pro průmyslové integrace s odpadním teplem jsou SOEC elektrolyzéry neboli Solid Oxide Elecrolysis Cell (elektrolýza pevných oxidů). Jedná se o vysokoteplotní elektrolyzéry při teplotě 700-1000 °C, které mají nejvyšší energetickou účinnost více než 80 %.

Typ elektrolyzéru	Účinnost (%)	Cena (CZK/kw) instalačního výkonu)
AEL elektrolyzér	60-70	51 400
PEM elektrolyzér	70-80	77 100
SOEC elektrolyzér	80-85	N

Tab. 12 – Účinnost a cena jednotlivých typů elektrolyzérů (zdroj: vlastní)

Ceny elektrolyzéru by měly postupně klesat se zvyšující se poptávkou. Evropská komise schválila státní podporu ve výši 6,9 miliardy eur na vodíkové projekty v sedmi členských státech. Česká republika plánuje investovat tři miliardy korun z Modernizačního fondu do výstavby nových elektrolyzérů. Výše podpory se obvykle pohybuje mezi 40-70 % způsobilých nákladů projektu, v závislosti na konkrétních podmínkách výzvy a charakteru projektu. Celkově tedy lze očekávat, že s pokračujícími investicemi a technologickým pokrokem bude trh s elektrolyzéry pro výrobu vodíku z OZE nadále růst, což přispěje k širšímu využití zeleného vodíku v různých sektorech ekonomiky. Náklady na instalaci elektrolyzéru v ČR se liší. Nejlevněji lze pořídit AEL elektrolyzér, kde se náklady a instalaci pohybují okolo 51 400,- Kč za kilowatt (kW) instalovaného výkonu. U PEM elektrolyzéru jsou ceny vyšší a blíží se k 77 100,- Kč za kilowatt instalovaného výkonu. Přesné údaje o ceně SOEC elektrolyzéru nejsou stále dohledatelné, protože jejich vývoj je ve fázi výzkumu. Pořizovací cena však bude nejvyšší, protože technologie vyžaduje vysoké provozní teploty, což klade nároky na speciální materiály.

5.8 Návrh a porovnání technologie výroby vodíku z OZE a jeho využití v petrochemickém průmyslu

Obecná analýza a porovnání možností umožní ukázat různé scénáře využití vodíku a jejich dopady. Při návrhu je klíčové zhodnotit celý hodnotový řetězec, tedy nejen výrobu, ale i ekonomickou udržitelnost, environmentální přínosy a možnosti využití.

5.8.1 Hlavní faktory pro komplexní zhodnocení výroby a využití vodíku z OZE

Technická proveditelnost:

Jako první je nutné zjistit dostupnost obnovitelného zdroje energie a jeho stabilitu. Důležitý je výběr elektrolyzéru a zvážit jeho účinnost, investiční náklady a životnost, ale také kapacita výroby a dostupnost OZE s případným využitím přebytku. Klíčové je skladování a distribuce, zda se cílí na lokální spotřebu, anebo na transport.

Ekonomická analýza:

Do analýzy musí být zahrnuty investiční náklady (CAPEX) na elektrolyzéry, kompresory, skladování, distribuční síť, ale také případně vlastní zdroj energie, např. fotovoltaickou elektrárnu. Důležitým faktorem jsou provozní náklady (OPEX) mezi něž patří cena elektřiny, údržba, voda, pracovní síla, apod. Započítat do ekonomické analýzy je potřeba cenu vyrobeného vodíku a tržní poptávku. Před návrhem je důležité zajistit si stabilní odběr a započítat využití pro vlastní průmysl. Při novém záměru je možnost financování z dotací, fondů EU a vlastních investic.

Environmentální dopady:

Prioritní při návrhu záměru by mělo být snížení emisí oxidu uhličitého. Při výrobě elektrolýzou vody bude mít velký vliv spotřeba vody, kdy na výrobu 1 kg vodíku je potřeba až 9 litrů vody. Záměr výstavby by neměl mít negativní dopad na krajinu. Vodíková infrastruktura by neměla být budována tak, aby narušovala krajinu, ale zároveň ani v zastavěných oblastech, kde by narušovala blahobyt obyvatel. Minimalizovat by se měly ztráty při výrobě, skladování a využití. Energetická účinnost se musí držet na nejvyšších hodnotách.

Právní a regulační faktory:

Při návrhu se nesmí zapomenout na regulace EU, bezpečnostní normy, emisní povolenky, ale ani na připojení k síti. Emisní povolenky mohou být jedním z vlivů na konkurenceschopnost zeleného vodíku. Legislativa počítá i s využitím elektřiny z obnovitelných zdrojů energie. Výroba z tohoto zdroje však nepodléhá zákonu o ochraně ovzduší, protože neprodukuje žádné emise.

Možnosti využití:

Využití vodíku je primárně zaměřeno na rafinérii a mobilitu. V průmyslu je využití na další chemické procesy samozřejmostí. Může být použit na hydrokrakování, výrobu syntetických paliv, oceli, chemikálie, čpavek, ale také v případě přebytků ne zpětnou výrobu elektřiny.

5.8.2 Technologie výroby zeleného vodíku

Výpočet maximálního množství vyrobeného vodíku závisí na několika faktorech, zejména na účinnosti elektrolyzéru a počtu provozních hodin za rok. Počet provozních hodin při stabilním provozu odpovídá 8000 hodin. v tab. 13 je zaznamenán rozdíl mezi provozem AEL elektrolyzéru a PEM elektrolyzéru, oba o výkonu 3000 kW. Jednou z hodnot v tabulce je životnost elektrolyzéru, kdy alkalický elektrolyzér má životnost 60 000-90 000 provozních hodin, což při běžném provozu odpovídá 20-30 let. PEM elektrolyzér má životnost pouze 20 000-60-000 provozních hodin, což odpovídá 7-20 let v závislosti na provozních podmínkách. Pro stabilní provoz s dlouhou životností jsou tak vhodnější AEL elektrolyzéry. PEM elektrolyzéry jsou vhodnější pro variabilní provoz především s obnovitelnými zdroji energie. Mají ale také vyšší náklady na údržbu. Z kapitoly 5.7.3 jsou do tabulky přidané ceny za instalaci elektrolyzérů.

Výpočet ceny za instalaci:

AEL elektrolyzér: 3000 kW x 51 400,- = 154 200 000,- Kč

PEM elektrolyzér: 3000 kW x 77 100,- = 231 300 000,- Kč

Parametry	AEL elektrolyzér	PEM elektrolyzér
Výkon	3000 kW	3000 kW
Účinnost	60-70	70-80
Spotřeba energie (na 1 kg H_2)	55 kWh	50 kWh
Počet provozních hodin	8000	8000
Roční spotřeba elektřiny	24 000 MWh	24 000 MWh
Množství vyrobeného vodíku	436 tun	480 tun
Cena za instalaci	154 200 000,- Kč	231 300 000,- Kč
Životnost v provozních hodinách	60 000-90 000	20 000-60 000
Životnost v letech	20-30	7-20

Tab. 13 – Porovnání provozu AEL elektrolyzéru a PEM elektrolyzéru (zdroj: vlastní)

Výpočet roční spotřeby elektřiny pro AEL elektrolyzér:

3000 kW x 8000 h = 24 000 000 kWh za rok = 24 000 MWh za rok

Výpočet množství vyrobeného vodíku pro AEL elektrolyzér:

$$\frac{24\,000\,000\ kWh}{55\ kWh/kg} = 436\,000\ kg\ H_2\ za\ rok = 436\ t/rok$$

Výpočet roční spotřeby elektřiny pro PEM elektrolyzér:

3000 kW x 8000 h = 24 000 000 kWh za rok = 24 000 Mwh za rok

Výpočet množství vyrobeného vodíku pro PEM elektrolyzér:

$$\frac{24\,000\,000\ kWh}{50\ kWh/kg} = 480\,000\ kg\ H_2\ za\ rok = 480\ t/rok$$

5.8.3 Možnosti ukládání a distribuce vodíku

Nejlepší možnost ukládání vodíku pro využití v průmyslu a mobilitě jsou tlakové zásobníky. Jedná se o nejrozšířenější technologii pro krátkodobé skladování. Ukládají se pod tlakem 350-700 barů, kdy nižší tlak je především v průmyslu a vyšší v mobilitě. Tato možnost je efektivní pro malé a střední objemy, náklady však rostou s tlakem. Další z možností je kapalný vodík (LH_2), který se skladuje při teplotě -253 °C. U takto nízké teploty je nutností kryogenní technologie, která je přizpůsobená takto nízkým teplotám. Kapalný vodík je vhodný pro velkoobjemový transport, jeho nevýhodou jsou velmi vysoké nároky na zkapalnění, které spotřebují zhruba 30 % energie vodíku. LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers) je metoda, kdy se vodík chemicky váže v kapalné sloučenině. Jedná se o metodu s bezpečnější manipulací a vysokou energetickou hustotou. Nutností je ale katalytická dehydrogenace pro uvolnění vodíku. Skladovat a distribuovat vodík je možné také jako vodík vázaný ve čpavku nebo metanolu. Takto vázaný vodík se snadněji transportuje a je často využíván v průmyslu i jako palivo. Jeho výhodou je možnost zpětné konverze na vodík nebo přímé použití, například čpavek má již zavedenou globální infrastrukturu. Ekonomické porovnání metod ukládání a distribuce vodíku je vytvořeno v tab. 14.

Technologie	Tlakové zásobníky	Kapalný vodík	LOHC	Vodík ve čpavku
Investiční náklady (CAPEX) EUR/kg H_2	500-1500 (zásobníky a kompresory)	1500-3500 (kryogenní infrastruktura)	2000-4000 (syntéza a dehydrogenace)	1000-2500 (syntéza a skladovací infrastruktura)
Provozní náklady (OPEX)	Nízké (malá spotřeba energie, údržba kompresorů)	Vysoké (ztráty odpařováním, vysoká spotřeba energie)	Střední (náklady na katalyzátory a dehydrogenaci)	Střední (náklady na syntézu a rozklad čpavku)
Energetické ztráty	5-10 % (stlačování)	30-40 % (zkapalnění a odpařování)	10-20 % (hydrogenace a dehydrogenace	10-25 % (syntéza a zpětné štěpení NH_3)
Cena přepravy (EUR/kg H_2/1000 km)	1-3 (potrubí) 5-10 (cisterny)	10-15 (kryogenní tankery)	5-8 (cisterny, tankery)	3-6 (lodní doprava, potrubí)
Celkové náklady na skladování a přepravu (EUR/kg H_2)	1-4 (lokální skladování)	5-15 (zkapalnění a přeprava)	3-8 (hydrogenace, přeprava, dehydrogenace)	2-6 (syntéza, přeprava a rozklad NH_3)

Tab. 14 – Ekonomické porovnání metod ukládání a distribuce vodíku (zdroj: vlastní zpracování na základě dostupné literatury – IEA, DOE, International Journal of Hydrogen energy)

Nejlevnější metoda skladování a distribuce vodíku jsou tlakové zásobníky pro krátkodobé skladování a lokální distribuci. Kvůli vysokým energetickým ztrátám a nákladům na kryogenní infrastrukturu vyjde nejdráž kapalný vodík. Metoda LOHC nabízí dobrou flexibilitu, ale potřebuje dodatečnou energii pro zpětnou extrakci vodíku. Pro dálkovou přepravu je nejlevnější vodík ve čpavku, protože má již zavedenou infrastrukturu a lze ho tak snadno přepravovat v lodích i v potrubí. Pro petrochemický průmysl může být nejlepší kombinace různých technologií. Nejlépe tlakové zásobníky pro krátkodobé skladování v areálu nebo čpavek pro dálkovou přepravu.

5.8.4 Porovnání způsobů využití vodíku

Vodík lze využít v několika klíčových oblastech. V rafinériích lze vodík využít k hydrokrakování nebo k hydrodesulfurizaci, výrobě syntetických paliv, může se energeticky využívat (spalování, palivové články) nebo využít ke zpětné výrobě elektřiny v případě přebytků. Každý způsob využití má své výhody, nevýhody i ekonomickou perspektivu. Nejefektivnější využití je náhrada šedého vodíku v rafinériích a výroba syntetických paliv. Hlavní výhodou je okamžitá redukce emisí oxidu uhličitého. Nevýhoda je ale stále vysoká cena oproti fosilním palivům. Jednou z možností okamžité náhrady

fosilních paliv je spalování vodíku jako náhrada za zemní plyn. Spalování vodíku pro výrobu elektřiny je kvůli nízké účinnosti nejméně efektivní.

5.8.5 Investiční náklady a návratnost

Hlavní složka investičních nákladů je nákup elektrolyzéru. V současné době se dá pořídit za 2000-3000 EUR za 1 kW instalačního výkonu, do roku 2050 se očekává pokles až na 400 EUR/kW. Investovat je možné do obnovitelného zdroje energie, především solární a větrná. Cena závisí na lokalitě a instalované kapacitě elektrárny. Další investiční položkou je systém skladování a distribuční infrastruktura. Celkové investiční náklady se pohybují v řádech milionů až stovek milionů eur v závislosti na velikosti projektu.

Návratnost investice (ROI) závisí na ceně vodíku na trhu. Ta se aktuálně pohybuje až na hranici 20 EUR za 1 kg vodíku. Do roku 2050 se předpokládá pokles ceny na 0,7 – 1,5 EUR/kg vodíku. Předpokladem návratnosti jsou stabilní odběratelé a podpora z emisních povolenek. Návratnost by tak mohla být okolo 10-15 lety bez dotace, s dotací může klesnout i na 5-10 let.

EU silně podporuje projekty zeleného vodíku a nabízí různé dotační programy. Dotace mohou pokrýt 50-70% investičních nákladů, což výrazně zlepšuje ekonomickou udržitelnost projektu. Kromě veřejných dotací lze financovat projekty i z privátních zdrojů. Zelené projekty jsou zajímavé pro banky i fondy. Chemický a petrochemický průmysl a energetické společnosti mohou spolupracovat s průmyslovými partnery. Větší petrochemický průmysl může využívat kombinaci dotací, investic a návratnost emisních povolenek ke snížení investičních i provozních nákladů.

Pro analýzu návratnosti investice budou použity tři scénáře cen elektrolyzérů o výkonu 3000 kW a dvě technologie PEM elektrolyzér a AEL elektrolyzér. K analýze bude pro základní výpočet použita provozní doba 4000 hodin, kdy se jedná o konzervativní odhad provozu elektrolyzéru pouze v době, kdy vyrábí elektřinu FVE. Průměr prodejní ceny vodíku je v současné době v EU 334,-, což odpovídá 13 EUR. Cena elektřiny z FVE je v průměru 50 EUR/MWh. Vstupní parametry výpočtu jsou rozepsány v tab. 15.

Parametr	Hodnota
Výkon elektrolyzéru	3000 kW
Účinnost PEM elektrolyzéru	70 % (50 kWh/kg H_2)
Účinnost AEL elektrolyzéru	60 % (55 kWh/kg H_2)
Provozní doba	4000 h/rok
Cena elektřiny z FVE	50 EUR/MWh (0,05 EUR/kWh)
Provozní náklady elektrolyzéru	3 % investice/rok
Ostatní provozní náklady	1 EUR/ kg H_2
Prodejní cena vodíku (EU průměr)	13 EUR/kg H_2
Životnost elektrolyzéru	AEL: 25 let, PEM 15 let

Tab. 15 – Vstupní parametry výpočtu (zdroj: vlastní výpočty a syntéza informací)

Výpočet výroby vodíku ročně při provozní době 4000 hodin/rok:

AEL elektrolyzér $\frac{3000\ x\ 4000}{55} = 218000\ kg/rok = 218\ t/rok$ → 436t/rok při provozní době 8000 hodin

PEM elektrolyzér $\frac{3000\ x\ 4000}{50} = 240000\ kg/rok = 240\ t/rok$ → 480t/rok při provozní době 8000 hodin

Provozní náklady:

AEL: 0,05 x 55 + 1 = 3,75 EUR/kg

PEM: 0,05 x 50 + 1 = 3,50 EUR/kg

Čistý zisk na 1 kg vodíku:

AEL: 13 – 3,75 = 9,25 EUR/kg

PEM: 13 – 3,50 = 9,5 EUR/kg

Dalším krokem výpočtu jsou investiční náklady za elektrolyzéry. Konzervativní hodnoty pro evropský trh zohledňující výrobní náklady, logistiku, montáž a případné certifikace jsou 2000 EUR/kW pro AEL elektrolyzér a 3000 EUR/kW pro PEM elektrolyzér. U čínských výrobců je možné tyto elektrolyzéry pořídit za nižší ceny, AEL elektrolyzér v průměru 800 EUR/kW a PEM elektrolyzér 1500 EUR/kW. Optimistická vize cen k roku 2035 by mohla hodnoty snížit v průměru na 400 EUR/kW u AEL elektrolyzéru a 1000 EUR/kW u PEM elektrolyzéru. V následné tabulce 16 budou porovnány celkové investiční náklady na 3000 kW elektrolyzéry.

CAPEX	AEL elektrolyzér	PEM elektrolyzér
Evropský trh	6 000 000	9 000 000
Čínský trh	2 400 000	4 500 000
Optimistický pokles cen (2035)	1 200 000	3 000 000

Tab. 16 – Celkové investiční náklady na 3000 kW elektrolyzér (tabulka: vlastní, zdroj: IEA, Hydrogen COuncil, DOE, IRENA)

Výpočet bodu zvratu (návratnost investice):

$$bod\ zvratu = \frac{CAPEX\ (EUR)}{čistý\ zisk\ na\ kg\ (EUR)\ x\ roční\ výroba\ H_2\ (kg)}$$

V tabulce 17 jsou zaznamenány hodnoty bodu zvratu (návratnost investice) vypočítané podle rovnice bodu zvratu, s použitými hodnotami vzniklými z výpočtů výše.

CAPEX	AEL elektrolyzér	PEM elektrolyzér
Evropský trh	2,97	3,95
Čínský trh	1,19	1,97
Optimistický pokles cen (2035)	0,59	1,32

Tab. 17 – Tabulka vypočítaných bodů zvratů z různých scénářů (zdroj: vlastní výpočty)

Pokud by projekt získal dotaci 50 %, doba návratnosti se zkrátí. Stejně tak, pokud by provozní doba byla na maximální hodnotě 8000 hodin. AEL elektrolyzéry mají kratší dobu návratnosti ve všech scénářích. Čínské elektrolyzéry zkracují návratnost, protože jejich investice je podstatně nižší než na evropském trhu. Zvyšovat se ale mohou jejich provozní náklady. Pokles cen elektrolyzéru po roce 2030 do budoucna výrazně zlepší ekonomiku pro plánované budoucí záměry.

Výpočty bodu zvratu výše se týkají pouze projektu, kde by investiční náklady byly pouze na nákup elektrolyzéru a FVE by již byl zprovozněna. Pokud by bylo nutné k investičním nákladům připočítat také investici do fotovoltaické elektrárny, návratnost investice se prodlouží.

Výpočet bude vycházet z parametrů pro FVE v tabulce 18. Typická výroba FVE ve střední Evropě 1kWp je přibližně 1000 kWh/rok. Pro porovnání bude několik možností nastavení výkonu FVE. Při výkonu 5 MWp by byla nízká investice a snížení nákladů na elektřinu o 21 %, ale pro průmysl by tato varianta byla nedostatečná. 24 MWp FVE by

znamenala plnou soběstačnost, ale vysoké investiční náklady a nutnost řešit případnou akumulaci energie. Dobým kompromisem mezi investicí a úsporami by mohla být FVE o výkonu 10 MWp, což by znamenalo zhruba 42 % spotřeby elektrolyzéru o výkon 3000 kW.

Ve výpočtu v kapitole *5.8.2 Technologie výroby zeleného vodíku* je výsledná roční spotřeba elektřiny při výkonu elektrolyzéru 3000 kW na hodnotě 24000 MWh/rok. Z toho by vycházela nejlépe fotovoltaické elektrárna o výkonu 24 MWp, což ale nemusí znamenat optimální řešení. Předpokládané investiční náklady na 1 kWp výkonu jsou 800 EUR. Průměrná cena elektřiny je v současné době 100 EUR/MWh.

Parametr	5 MWp	10 MWp	24 MWp
Roční výroba elektřiny	5000 MWh	10 000 MWh	24 000 MWh
Podíl na spotřebě elektrolyzéru (24000 MWh/rok)	21 %	42 %	100 %
Investiční náklady (800 EUR/kWp)	4 000 000 EUR	8 000 000 EUR	19 200 000 EUR
Roční provozní náklady (2 % investice)	80 000 EUR	160 000 EUR	384 000 EUR
Úspora na elektřině (100 EUR/MWh)	500 000 EUR	1 000 000 EUR	2 400 000 EUR
Čistá roční úspora (po provozních nákladech)	420 000 EUR	840 000 EUR	2 016 000 EUR

Tab. 18 – Vstupní parametry pro porovnání návratnosti investice pro různé výkony FVE (zdroj: vlastní výpočty a syntéza informací)

Návratnost investice:

$$Návratnost\ investice = \frac{investiční\ náklady}{čistá\ roční\ úspora}$$

Návratnost investice bez dotace se u všech variant pohybuje kolem 9,5 roku, což je přijatelné vzhledem k životnosti FVE 25 let. Pokud by byla poskytnuta dotace ve výši 50 %, návratnost se zkrátí na 4,8 let. Výpočet by probíhal z polovičních investičních nákladů a se stejnou čistou roční úsporou.

5.8.6 Výpočet bodu zvratu (návratnost investice) pro celý systém:

Ze všech výsledků budou vybrány nejoptimálnější možnosti pro výrobu zeleného vodíku pomocí elektrolyzéru a FVE jako zdrojem energie. Pro výpočet bude porovnán elektrolyzér PEM o výkonu 3000 kW z evropského trhu. Výpočet bude vycházet z FVE o výkonu 5 MWp, 10 MWp a 24 MWp. Zbylá elektřina potřebná pro stabilní výrobu vodíku při plných provozních hodinách od jiných dodavatelů bude pořizována za současnou průměrnou cenu 50 EUR/MWh, pokud se nadále bude vykupovat pouze elektřina z OZE.

Celková spotřeba elektřiny 24 000 MWh/rok. Ve výpočtu bude zohledněna produkce vodíku za rok při 8000 provozních hodinách u elektrolyzéru.

Vstupní parametry elektrolyzér:

Investiční náklady PEM elektrolyzér: 9 000 000 EUR

Roční produkce vodíku PEM elektrolyzér: 480 t

Prodejní cena vodíku (13 EUR/kg) PEM elektrolyzér: 13 x 480 000 = 6 240 000 EUR

Provozní náklady (odpis – 3 % investice/rok) PEM elektrolyzéru: 270 000 EUR/rok

Vstupní parametry FVE 5 MWp, 10 MWp a 24 MWp jsou použity z tab. 17:

Parametr:	5 MWp	10 MWp	24 MWp
Roční výroba elektřiny:	5000 MWh	10 000 MWh	24 000 MWh
Podíl na spotřebě elektrolyzéru (24000 MWh/rok):	21 %	42 %	100 %
Investiční náklady (800 EUR/kWp):	4 000 000 EUR	8 000 000 EUR	19 200 000 EUR
Roční provozní náklady (2 % investice):	80 000 EUR	160 000 EUR	384 000 EUR

Celkové investiční náklady bez dotace:

FVE 5 MWp + PEM: 4 000 000 + 9 000 000 = 13 000 000 EUR

FVE 10 MWp + PEM: 8 000 000 + 9 000 000 = 17 000 000 EUR

FVE 24 MWp + PEM: 19 200 000 + 9 000 000 = 28 200 000 EUR

Celkové náklady s dotací 50 %:

FVE 5 MWp + PEM: 2 000 000 + 4 500 000 = 6 500 000 EUR

FVE 10 MWp + PEM: 4 000 000 + 4 500 000 = 8 500 000 EUR

FVE 24 MWp + PEM: 9 600 000 + 4 500 000 = 14 100 000 EUR

Provozní náklady za nákup energie při garanci dodávané energie z OZE:

Cena energie z OZE: 50 EUR/MWh

PEM elektrolyzér: 0,05 x 50 + 1 = 3,5 EUR/kg provozní náklady včetně ostatních provozních nákladů 1 EUR/kg

FVE 5 MWp – nutno dodat 79 % podílu spotřeby energie → 24 000 – 5 000 = 19 000 MWh → vyrobí 380 t vodíku ze 480 → 380 000 x 3,5 = **1 330 000 EUR**

FVE 10 MWp – nutno dodat 58 % podílu spotřeby energie → 24 000 – 10 000 = 14 000 MWh → vyrobí 280 t vodíku ze 480 → 280 000 x 3,5 = **980 000 EUR**

FVE 24 MWp – nutno dodat 0 % → 0 t ze 480 → veškerou elektřinu vyrobí vlastní FVE, ale ostatní provozní náklady zůstávají 1 EUR/kg → 480 000 x 1 = **480 000 EUR**

Roční provozní náklady:

Provozní náklady (3 % investice elektrolyzéru) + provozní náklady (2 % investice FVE) + provozní náklady z nákupu elektrické energie od jiných dodavatelů

Výpočet bodu zvratu je zpřehledněn v tabulce 19. Roční příjmy zahrnují příjem za prodej vodíku, roční provozní náklady procenta z investice FVE i elektrolyzéru a náklady na nákup elektřiny z OZE od jiných dodavatelů. Investice je zohledněna bez dotace a s dotací 50 %.

Technologie FVE + PEM elektrolyzér	Investice	Roční příjmy (EUR)	Roční provozní náklady (EUR)	Čistý roční zisk (EUR)	Bod zvratu (roky)
FVE 5 MWp (bez dotace)	13 000 000	6 240 000	1 680 000	4 560 000	2,9
FVE 10 MWp (bez dotace)	17 000 000	6 240 000	1 410 000	4 830 000	3,5
FVE 24 MWp (bez dotace)	28 200 000	6 240 000	1 134 000	5 106 000	5,5
FVE 5 MWp (s dotací)	6 500 000	6 240 000	1 680 000	4 560 000	1,4
FVE 10 MWp (s dotací)	8 500 000	6 240 000	1 410 000	4 830 000	1,8
FVE 24 MWp (s dotací)	14 100 000	6 240 000	1 134 000	5 106 000	2,8

Tab. 19 – Výpočet bodu zvratu pro celý navrhovaný systém bez dotace a s dotací 50 % při využití chybějícího zdroje energie nákupem elektrické energie z OZE (zdroj: vlastní výpočty)

V další tabulce, tab. 20, porovnáme bod zvratu v případě, že by bylo nutné vyrábět vodík z elektřiny z fosilních paliv. Současná průměrná cena elektřiny se pohybuje kole 100 EUR/MWh. Tím se změní provozní náklady na výrobu jednoho kilogramu vodíku.

Cena energie z jiných zdrojů: 100 EUR/MWh

PEM elektrolyzér: 0,1 x 50 + 1 = 6,0 EUR/kg provozní náklady včetně ostatních provozních nákladů 1 EUR/kg

FVE 5 MWp – nutno dodat 79 % podílu spotřeby energie → 24 000 – 5 000 = 19 000 MWh → vyrobí 380 t vodíku ze 480 → 380 000 x 6 = **2 280 000 EUR**

FVE 10 MWp – nutno dodat 58 % podílu spotřeby energie → 24 000 – 10 000 = 14 000 MWh → vyrobí 280 t vodíku ze 480 → 280 000 x 6 = **1 680 000 EUR**

FVE 24 MWp – nutno dodat 0 % → 0 t ze 480 → veškerou elektřinu vyrobí vlastní FVE, ale ostatní provozní náklady zůstávají 1 EUR/kg → 480 000 x 1 = **480 000 EUR**

Technologie FVE + PEM elektrolyzér	Investice	Roční příjmy (EUR)	Roční provozní náklady (EUR)	Čistý roční zisk (EUR)	Bod zvratu (roky)
FVE 5 MWp (bez dotace)	13 000 000	6 240 000	2 630 000	3 610 000	3,6
FVE 10 MWp (bez dotace)	17 000 000	6 240 000	2 110 000	4 130 000	4,1
FVE 24 MWp (bez dotace)	28 200 000	6 240 000	1 134 000	5 106 000	5,5
FVE 5 MWp (s dotací)	6 500 000	6 240 000	2 630 000	3 610 000	1,8
FVE 10 MWp (s dotací)	8 500 000	6 240 000	2 110 000	4 130 000	2,0
FVE 24 MWp (s dotací)	14 100 000	6 240 000	1 134 000	5 106 000	2,8

Tab. 20 - Výpočet bodu zvratu pro celý navrhovaný systém bez dotace a s dotací 50 % při využití chybějícího zdroje energie nákupem elektrické energie z fosilních paliv (zdroj: vlastní výpočty)

5.8.7 Zdroje energií pro výrobu zeleného vodíku

Solární energie:

Solární panely přeměňují sluneční energii na elektrickou, která se následně používá k elektrolyzování vody na vodík a kyslík. Solární energetické systémy mohou být instalovány na různých místech, od střed budov až po velké solární plochy.

Větrná energie:

Větrné turbíny využívají kinetickou energii větru k výrobě elektrické energie, která se rovněž používá pro elektrolyzéry k výrobě vodíku. Je jedním z nejefektivnějších obnovitelných zdrojů pro výrobu zeleného vodíku, zejména ve větrných oblastech.

Vodní energie:

Hydroelectricita je dalším obnovitelným zdrojem, který může být použit pro výrobu zeleného vodíku. Pokud je dostupná dostatečná vodní energie (přehrady, řeky), může se tato energie využít k elektrolyzování vody.

Výhodou použití obnovitelných zdrojů energie spočívá v tom, že při výrobě zeleného vodíku nezatěžují životní prostředí emisemi oxidu uhličitého. Významným faktorem je i potenciál pro masovou výrobu zeleného vodíku, který by mohl nahradit fosilní paliva

v těžkém průmyslu a transportu. Výroba zeleného vodíku vyžaduje značné množství elektřiny pro elektrolyzéry. Cena elektřiny z obnovitelných zdrojů hraje klíčovou roli. Očekává se, že v průběhu času náklady na zelený vodík budou klesat, jak se zlepší účinnost elektrolyzérů a sníží cena obnovitelných zdrojů energie. Pokrok v oblasti elektrolyzérů může dále snižovat náklady a zvyšovat efektivitu výroby vodíku. S rostoucí globální poptávkou po vodíku a mezinárodními dohodami o dekarbonizaci se očekává, že trh se zeleným vodíkem bude růst. To povede k širší dostupnosti zeleného vodíku, což může zjednodušit jeho nasazení v různých sektorech.

Různé technologie výroby vodíku z obnovitelných zdrojů mají odlišný dopad na produkci emisí, a to jak přímých, tak nepřímých, které jsou spojeny s výrobou, instalací a provozem dané technologie. Samotná elektrolytická výroba vodíku emise CO_2 neprodukuje, pokud je poháněná z obnovitelných zdrojů. Rozdíl vzniká hlavně v uhlíkové stopě výroby elektřiny. Nejnižší emise vznikají z vodních elektráren a jaderných. Větrné mají hodnoty také velmi nízké. U nepřímých emisí je kromě provozních emisí důležité zhodnotit uhlíkovou stopu výroby zařízení. Při výrobě solárních panelů je součástí křemík, hliník a sklo, což přispívá k vyšší uhlíkové stopě. Větrné turbíny zahrnují ocel a beton pro věže, což zanechává uhlíkovou stopu, která je však nižší než u solárních panelů. U jaderných elektráren výroba paliva a likvidace odpadu mají nepřímé emise, které jsou v celkovém hodnocení nízké. U vodních elektráren může stavba přehrad uvolnit metan z biomasy pod vodou. V tab. 21 budou hodnoty celkové produkce emisí z obnovitelných zdrojů energie porovnány se síťovou elektřinou (EU mix 2023) a s výrobou elektřiny z fosilního zdroje (uhlí).

Zdroj elektřiny	Celkové emise CO_2 (g/kWh)	Celkové emise (na 1 kg H_2 při účinnosti 65 kWh/kg)
Vodní energie	0-50 g	0-2 kg
Jaderná energie	0-50 g	0-3 kg
Větrná energie	5-20 g	1,3 kg
Solární energie	20-80 g	5,2 kg
Síťová elektřina (EU mix 2023)	~ 250 g	16,3 kg
Fosilní paliva (uhlí)	~ 900 g	58,5 kg

Tab. 21 – Celková uhlíková stopa vodíku z OZE v porovnání s fosilními zdroji (tabulka vlastní: zdroj: AVČR)

6 Výsledky

Nízkouhlíkový vodík je méně podporovaný, přesto v legislativě definovaný. Ke splnění emisí u nízkouhlíkového vodíku v rámci dekarbonizačního balíčku pro trh s plyny, nesmí emise při výrobě tohoto vodíku přesáhnout 3,38 kg CO_2 na 1 kg vodíku. Stanovené cíle vydané EU si vyžádají přibližně 115 miliard v investičních (kapitálních) nákladech (CAPEX). Rozdělení investičních nákladů na konkrétní účely je vyobrazeno v tab. 22. Další podporu mohou vyvolat náklady provozní (OPEX).

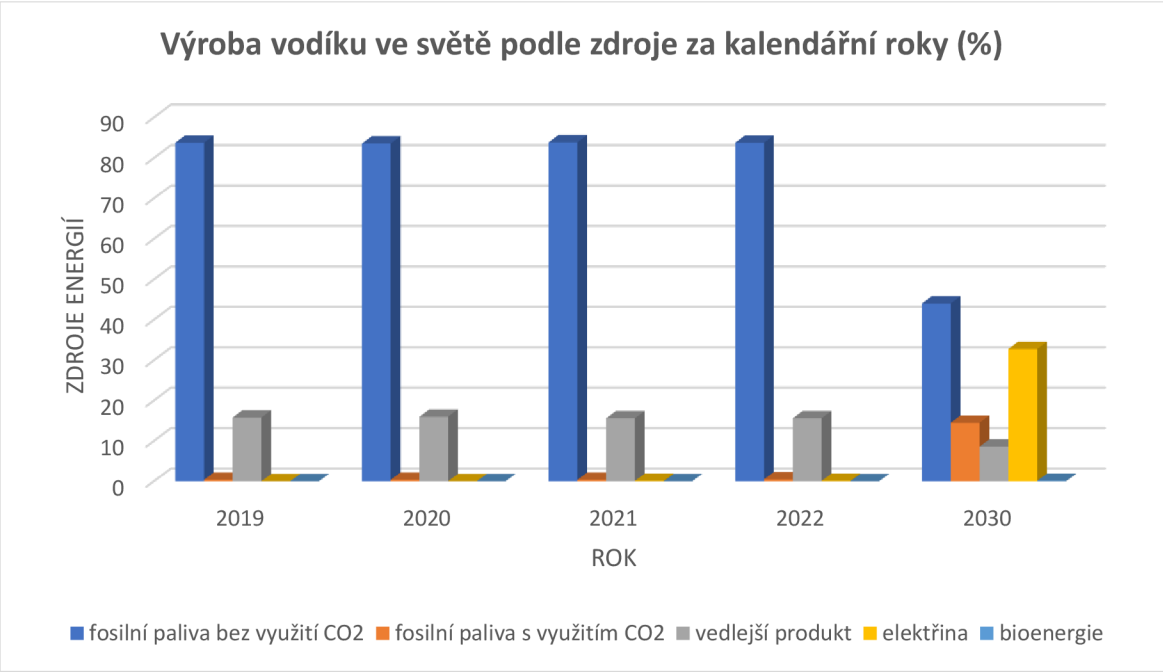
Elektrolyzéry	Obnovitelné zdroje energie	Skladování	Dopravní prostředky a infrastruktura	E-Kerosin výroba	Repurposing přepravní a distribuční infrastruktury
27 mld.	57 mld.	2 mld.	22 mld.	1 mld.	5,2 mld.

Tab. 22 - Investiční (kapitální) náklady pro stanovené cíle EU (tabulka: vlastní, zdroj: SPČR)

Poptávka po zeleném vodíku v roce 2030 je odhadem 40 kilotun. Odhad spotřeby v průmyslu zahrnuje rafinerii a počítá i s možnými výjimkami dle RED. V roce 2022 spotřeba vodíku činila 122 kilotun, a to pouze v průmyslu. V dopravě je využíván minimálně. V roce 2023 bylo registrováno pouze 24 osobních vodíkových vozidel. Přepokládaná poptávka v energetice, teplárenství a v ostatním průmyslu kromě chemického je zatím v časovém horizontu od roku 2030 až 2035 nulová.

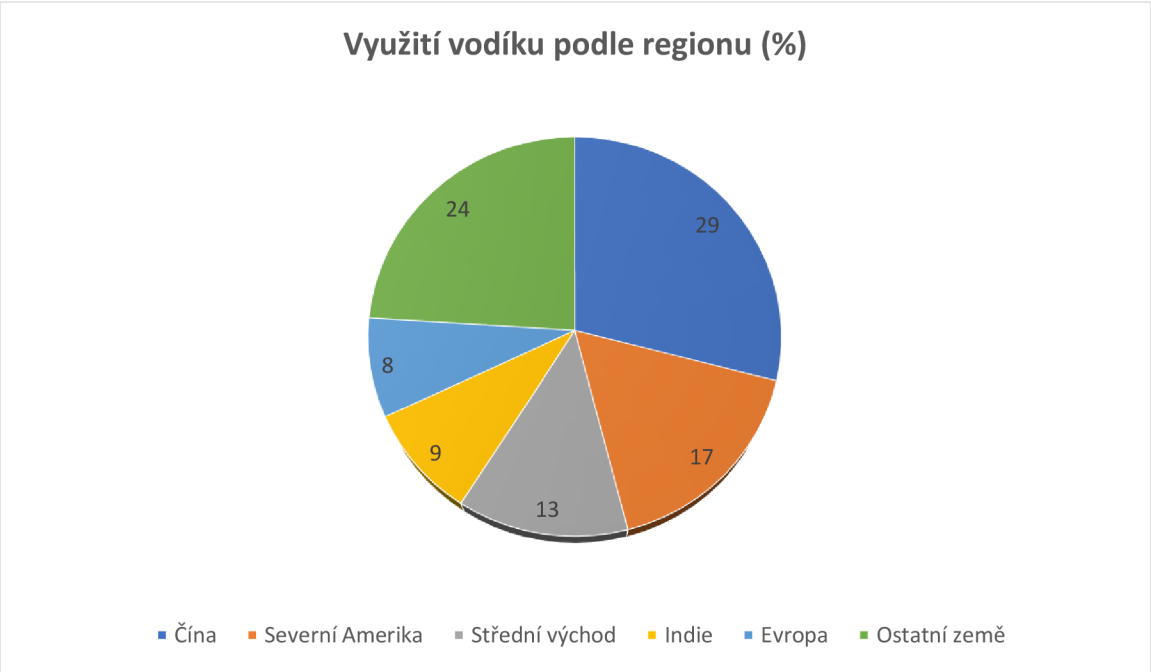
6.1 Grafy a výsledky výroby a využití vodíku ve světě

Výroba vodíku ve světě podle zdroje brána od roku 2019 až po plán v roce 2030 je zaznamenána na obr. 14. Od roku 2019 do roku 2022 není rozdíl nějak významný. Celosvětový předpoklad k roku 2030 však již určité změny zaznamenává. Především se snižuje výroba vodíku z fosilních paliv bez dalšího využití oxidu uhličitého a zvyšuje se výroba vodíku z fosilních paliv s následným využitím oxidu uhličitého, který je možné především v chemickém průmyslu dále zpracovávat. V současné době je většina vodíku využívána jako vedlejší produkt, ať už při výrobě metanu, čpavku nebo jiných produktů. Jako zdroj elektřiny se v současné době také moc nevyužívá, to se má ale do roku 2030 změnit.



Obr. 13 – Výroba vodíku ve světě podle zdroje energií od roku 2019 až do plánované výroby v roce 2030 (zdroj: vlastní)

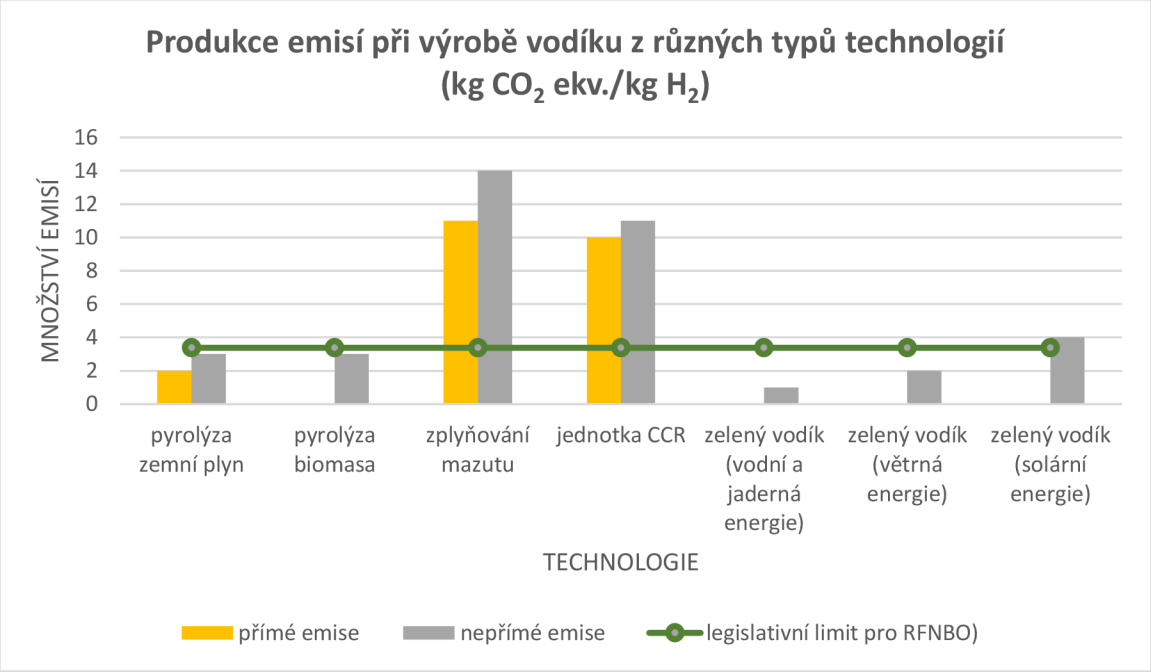
Na obr. 15 je patrné, že nejvíce je vodík využíván v Číně a následně v Severní Americe. V Evropě je vodík využíván opravdu ve velmi malém množství a překvapivě i v Indii, která je jedním z větších znečišťovatelů ovzduší ve světě. V Evropě by se tyto hodnoty měly měnit, jelikož se státy EU zavázaly v rámci Zelené dohody snížit produkci emisí do roku 2050.



Obr. 14 – Využití vodíku podle regionu (zdroj: vlastní)

6.2 Grafy a výsledky produkce emisí při využití konkrétních technologií výroby vodíku

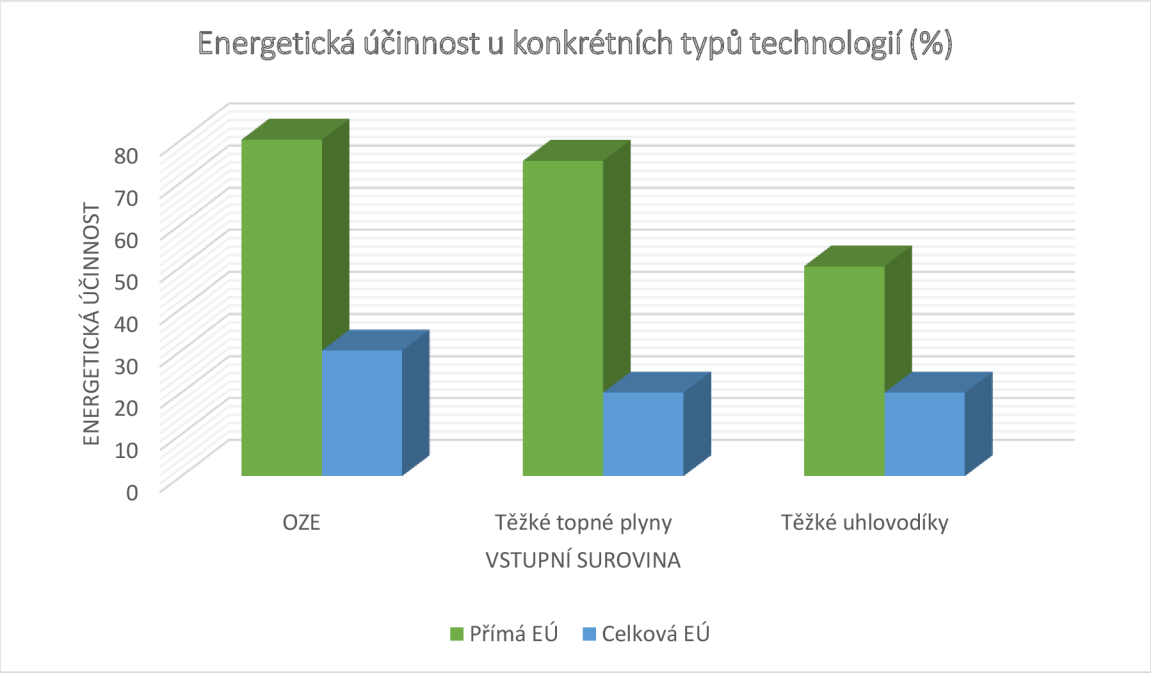
Ze získaných dat je možné vyčíst, že největším zdrojem znečišťování je výroba vodíku zplyňováním mazutu bez zachytávání oxidu uhličitého CO_2. Hodnota přímých emisí může v tomto případě vyšplhat až na 11 kg CO_2 ekv./kg H_2. Nulové hodnoty přímých emisí jsou však zjištěny hned u několika technologií. V případě zeleného vodíku je nula u všech možných obnovitelných zdrojů energie. Zároveň ale pyrolýza biomasy je jeden z mála procesů výroby vodíku, který může být uhlíkově negativní, pokud je biouhlí trvale uloženo. Je tedy ekologicky významným procesem. Obr. 16 graficky znázorňuje produkci emisí při výrobě vodíku z různých typů technologií. Do přehledu je zahrnutá maximální hodnota k danému typu technologie. Legislativní limit produkce CO_2 pro výrobu vodíku z obnovitelného paliva nebiologického původu (RFNBO) je 3,38 kg CO_2/kg H_2. Pokud je tato hodnota překročena, již se nejedná o RFNBO.



Obr. 15 – Produkce přímých emisí při výrobě vodíku z různých druhů technologií (zdroj: vlastní)

6.3 Graf a výsledky energetické účinnosti u konkrétních typů technologií výroby vodíku

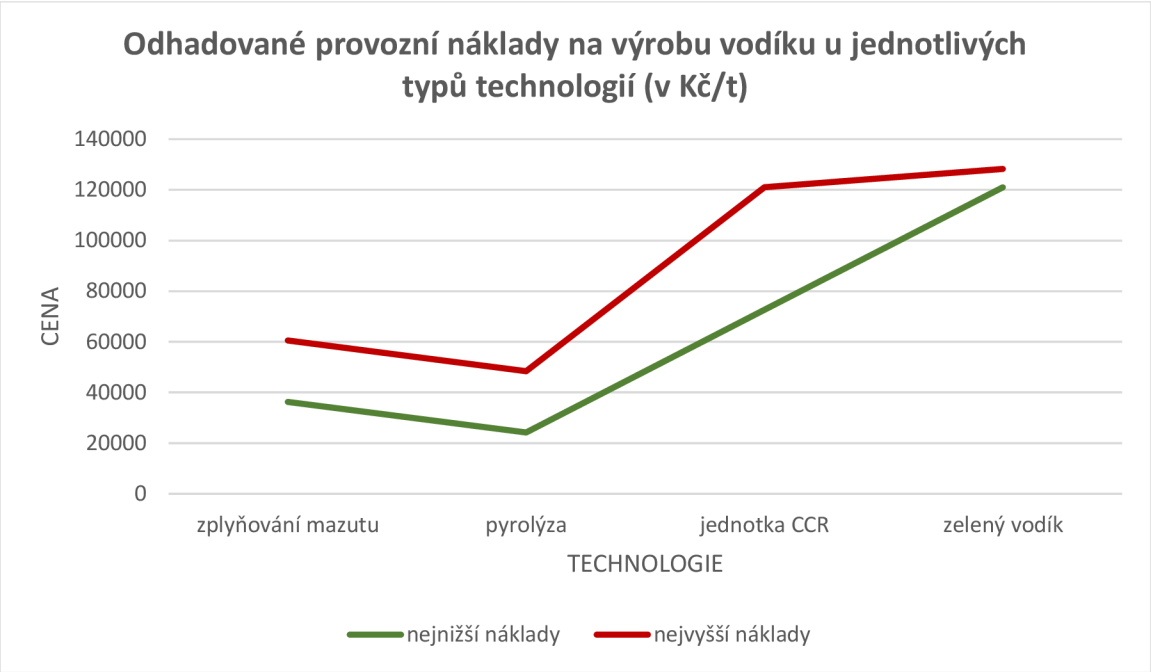
Energetická účinnost je nejvyšší při výrobě vodíku z obnovitelných zdrojů energie. U všech technologií by největší účinnost byla v přímé výrobě elektřiny. V celkovém systému se však energetická účinnost snižuje vlivem skladování, dopravy a distribuce a následné přeměně vyrobeného vodíku zpět na elektřinu do palivových článků. Nejnižší energetická účinnost ze získaných dat je při výrobě vodíku z těžkých uhlovodíků, tzv. při zplyňování mazutu. Rozdíly v energetické účinnosti jsou porovnány na obr. 17.



Obr. 16 – Energetická účinnost u konkrétních typů technologií (zdroj: vlastní)

6.4 Odhadované provozní náklady na výrobu vodíku u jednotlivých typů technologií

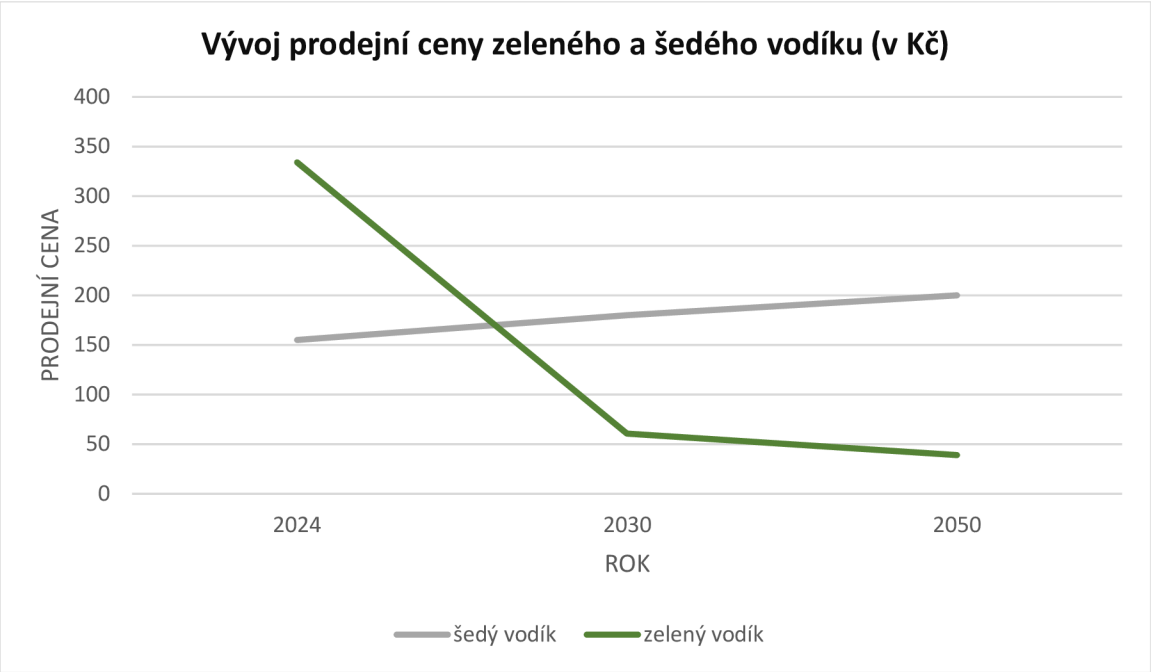
Odhadované provozní náklady závisí na aktuálních cenách energií, nákladů na technologie a dostupnosti obnovitelných zdrojů. Na obr. 18 je patrné, že nejnižší náklady jsou u procesu výroby vodíku pyrolýzou, které však závisí na ceně zemního plynu, popřípadě na dostupnosti biomasy. Největší náklady je možné zaznamenat při výrobě zeleného vodíku. Náklady se zde zvyšují také podle dostupnosti obnovitelných zdrojů energie, zda postačí výroba z vlastních procesů nebo zda bude zdroj energie dodáván od jiných dodavatelů.



Obr. 17 – Odhadované provozní nálady na výrobu vodíku u jednotlivých typů technologií (zdroj: vlastní)

6.5 Prodejní ceny vodíku z obnovitelných zdrojů energie v porovnání s prodejní cenou vodíku v chemickém průmyslu

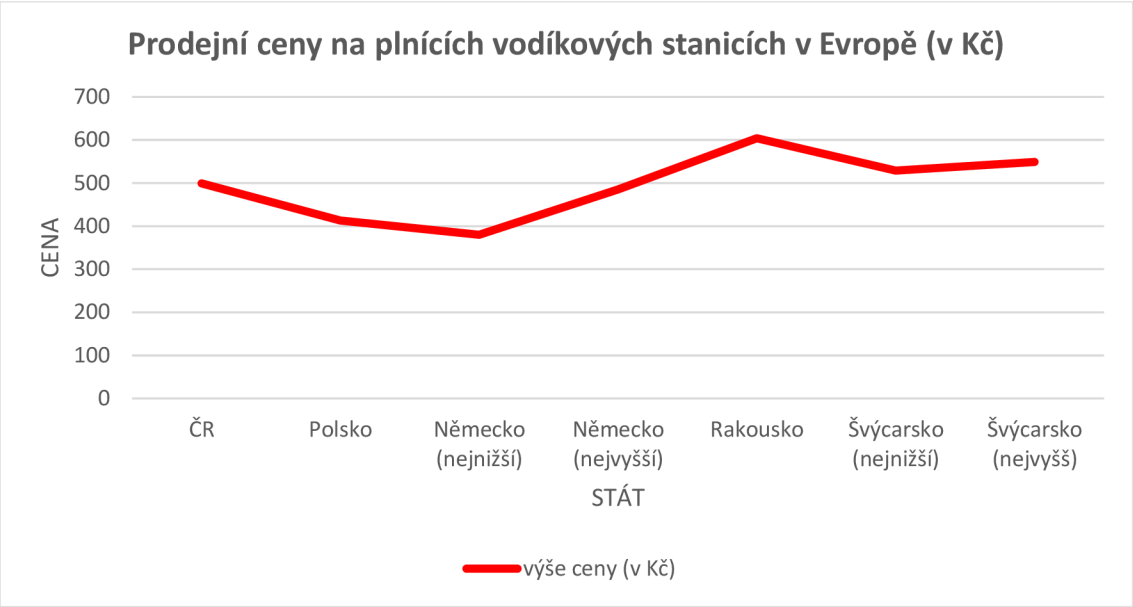
Prodejní cena vodíku v chemickém průmyslu se liší v závislosti na způsobu výroby, nákladech na suroviny, energetických nákladech a dalších faktorech. Na obr. 19 jsou zavedeny prodejní ceny zeleného vodíku a šedého vodíku. Průměrná prodejní cena šedého vodíku vyráběného v chemickém průmyslu, se pohybuje okolo 155,- Kč za jeden kilogram vodíku. Tato cena by se měla zvyšovat poptávkou po zeleném vodíku a snížením poptávky po vodíku šedém. Cena zeleného vodíku, produkovaného elektrolýzou vody za využití obnovitelných zdrojů energie, je v současné době vyšší. Podle dostupných studií se cena zeleného vodíku v EU pohybuje okolo 334,- Kč za jeden kilogram vodíku. V České republice cena vodíku z obnovitelných zdrojů vystoupala na 500,- Kč za jeden kilogram poté, co již přestala být dotována. Do roku 2030 by mohla cena vodíku za jeden kilogram klesnout na 34 – 60,5 Kč. Předpoklad ceny za jeden kilogram vodíku do roku 2050 je dokonce ještě nižší a to 17 – 39,- Kč. Garance cen budoucích je ale nejistá. Ovlivňovat ji budou náklady na pořízení elektrolyzérů, které vzhledem k nízké poptávce zatím neklesají, tak jak bylo předpokládáno.



Obr. 18 - Vývoj prodejní ceny zeleného a šedého vodíku do roku 2050 (zdroj: vlastní)

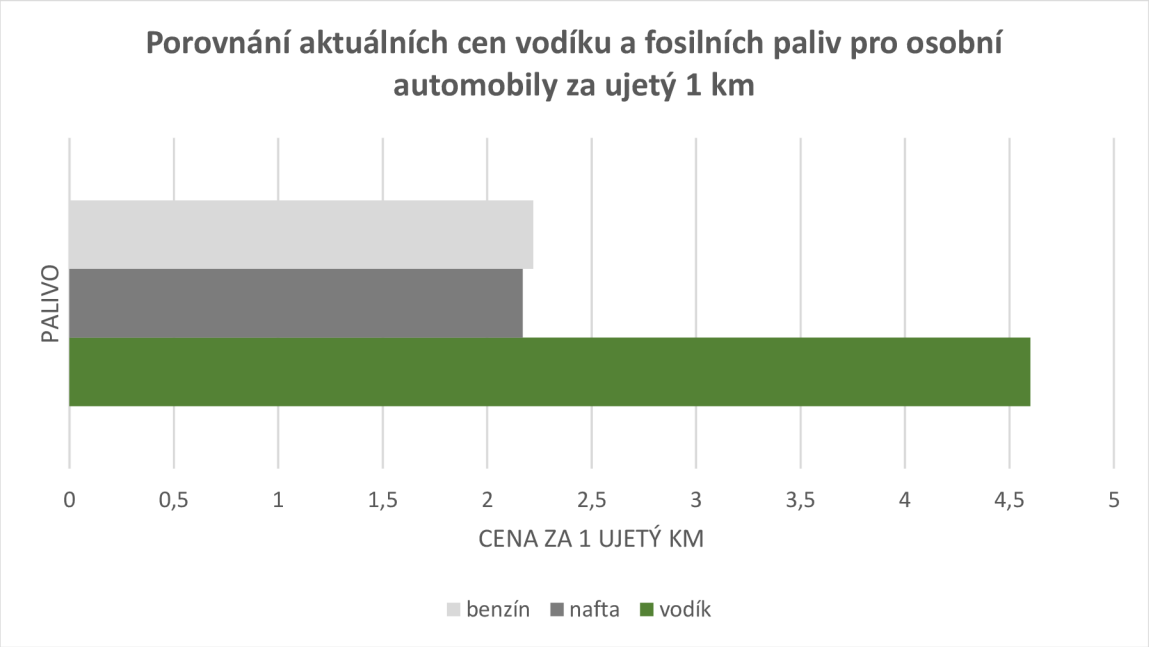
6.6 Prodejní ceny vodíku na plnících stanicích v Evropě včetně ČR

Aktuální prodejní ceny za jeden kilogram vodíku se pohybují v každém státě na jiných hodnotách. Tyto ceny jsou ovlivněny mimo jiné i počtem odběratelů. V ČR je v současné době objem prodané energie pro vodíkovou elektromobilitu zanedbatelný a rozvoj této infrastruktury se spíše dotuje, v Evropě ale na tom nejsou o mnoho lépe. Nejlevněji vyjde jeden kilogram vodíku v Německu, v okolí Drážďan, kde se cena pohybuje okolo 380,- Kč za jeden kilogram vodíku, poté v Polsku ve výši 413,- Kč za jeden kilogram vodíku a nejvíce si odběratelé zaplatí ve Švýcarsku, kde cena dosahuje až 549,- Kč za jeden kilogram vodíku. Trh s vodíkem se neustále rozvíjí, což přispívá k rozšiřování vodíkové infrastruktury, ale stále vysoká cena kvůli nízkým odběrům celý proces brzdí. Na obr. 20 je zobrazen přehled prodejních cen v evropských státech.



Obr. 19 - – Prodejní ceny vodíku na plnících stanicích v Evropě (zdroj: vlastní)

V porovnání s cenami fosilních paliv v ČR, je používání vodíkových automobilů stále nákladné. Cena za jeden odjetý kilometr se při spotřebě vodíkových automobilů pohybuje na částce 4,6,- Kč/km. Avšak u automobilů jezdících na fosilní paliva při spotřebě 6 litrů na 100 km se u dieselových automobilů cena pohybuje na 2,17,- Kč/km a u benzínových automobilů na 2,22,- Kč/km. Rozdíl je znázorněn na obr. 21.



Obr. 20 – Porovnání cen vodíku a fosilních paliv pro osobní automobily za jeden ujetý kilometr (zdroj: vlastní)

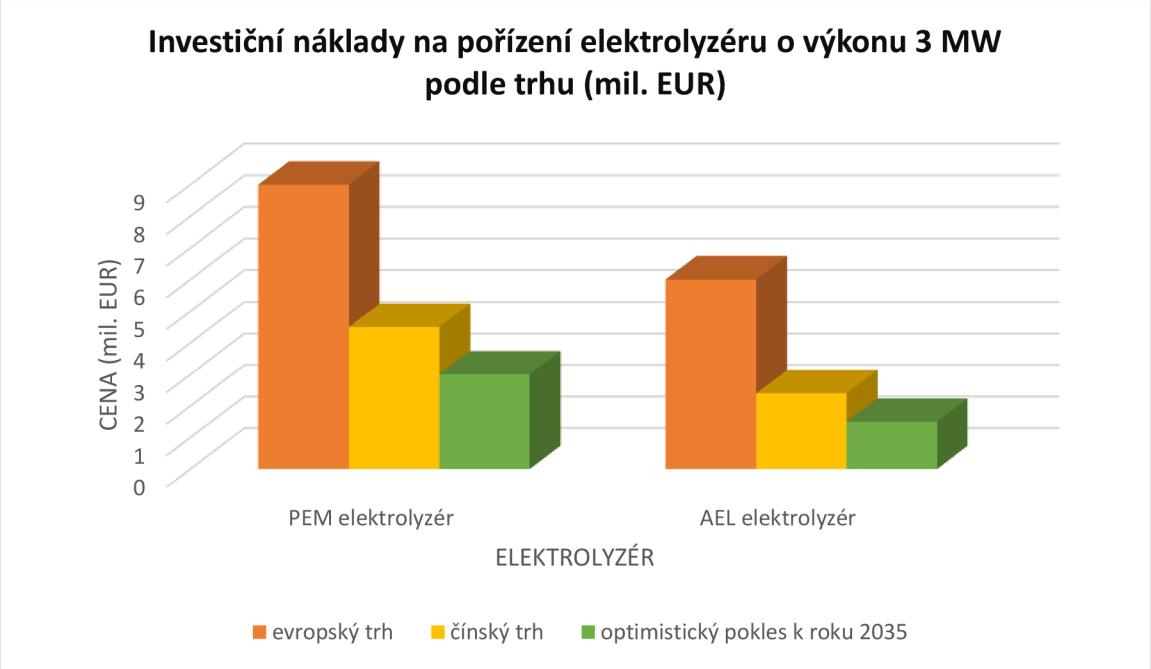
6.7 Celková uhlíková stopa výroby vodíku z OZE v porovnání s výrobou z fosilních zdrojů

Nejnižší uhlíkovou stopu má vodíková výroba napájená vodní energií, jadernou a větrnou. Solární elektřina je nízkoemisní, ale má vyšší emise kvůli výrobě panelů. Přesto je stále výrazně čistší než vodík z fosilních zdrojů. Pokud elektrolyzér běží na běžnou síťovou elektřinu, mix s fosilními zdroji, může mít vodík uhlíkovou stopu srovnatelnou se šedým vodíkem. Důležitým faktorem je efektivita elektrolyzéru a životnost technologie. Pro dosažení skutečně zeleného vodíku je důležité, aby elektrolyzér byl napájen solární elektřinou po celý rok, což může vyžadovat i jiné flexibilní systémy. Dostupnost a efektivita obnovitelných zdrojů energie jsou závislé na geografické poloze lokality, kde se nachází. Sluneční a větrná energie se liší v intenzitě podle regionu, což ovlivňuje výkonnost FVE i větrných turbín. V návrhu technologie se musí zohlednit klimatické podmínky a energetický potenciál daného území, aby byla zajištěná stabilní dodávka elektrické energie pro elektrolyzéry. V následném grafu, obr. 22 je znázorněna uhlíková stopa výroby vodíku s různou dodávkou elektrické energie do elektrolyzéru.

Obr. 21 – Celková uhlíková stopa vodíku z OZE a fosilních zdrojů (zdroj: vlastní)

6.8 Porovnání investičních nákladů na pořízení PEM a AEL elektrolyzéru o výkonu 3 MW

Investiční náklady na pořízení elektrolyzéru se liší podle typu elektrolyzéru a podle toho, na jakém trhu se bude pořizovat. AEL elektrolyzér má nižší investiční náklady, pokud se pořídí na čínském trhu, investice je ještě nižší. Nízká cena je však na úkor kvality a tím i vyšších provozních nákladů. Pokles cen elektrolyzéru na evropském trhu se očekává. Výrazně se tak zlepší ekonomika projektu. Na obr. 23 je porovnán rozdíl v investicích mezi evropským a čínským trhem a pro porovnání je též zahrnut optimistický pokles cen k roku 2035.

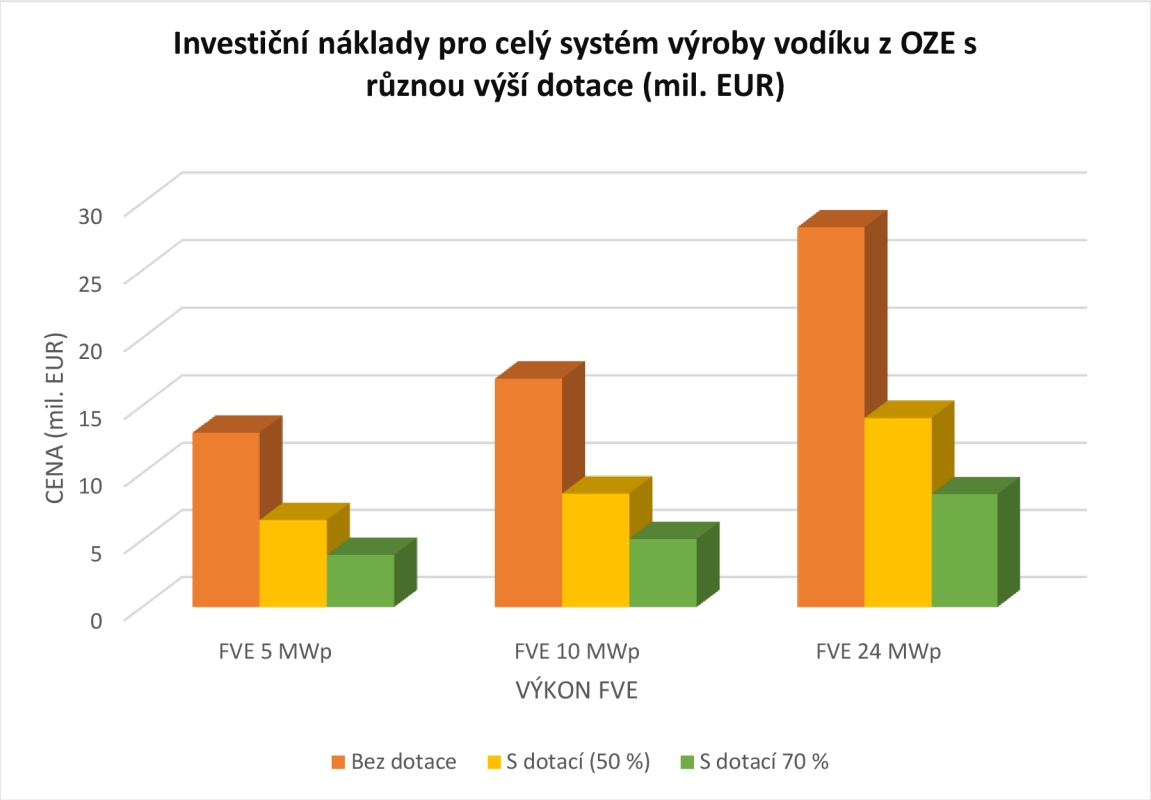


Obr. 22 – Investiční náklady na pořízení elektrolyzéru o výkonu 3 MW podle trhu (zdroj: vlastní)

6.9 Porovnání investičních nákladů pro celý systém výroby vodíku z OZE s různou výší dotace

V současné době je možné projekty financovat z fondů EU. Pokud se využijí dotační programy, lze získat až 70 % z celkových způsobilých výdajů. Reálné investice tak mohou klesnout a ovlivnit její návratnost. Dotaci je možné využít na nákup fotovoltaických systému i elektrolyzéru. Solární energie vyžaduje flexibilní elektrolyzér, ideálně PEM. Konzervativní hodnoty pro evropský trh zohledňují nejen výrobní náklady, ale i logistiku, montáž a případné certifikace. Pokud by investice směřovala k nákupu technologie z čínského trhu,

byla by sice nižší, ale bez garance životnosti a pravděpodobně by zvyšovala provozní náklady. V grafu na obr. 24 zohledňujeme nákup celého systému s cenami pro evropský trh, a zda je projekt bez dotace nebo s dotací 50 % a 70 %.

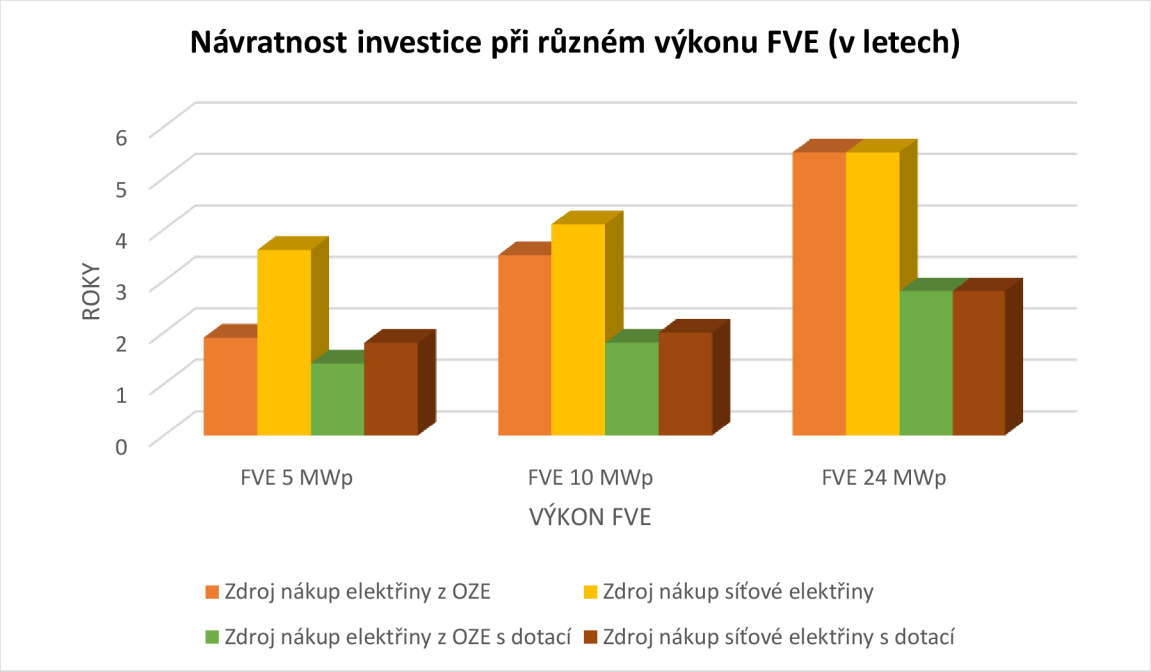


Obr. 23 – Investiční náklady pro celý systém výroby vodíku z OZE s různou výší dotace (zdroj: vlastní)

6.10 Návratnost investice (bod zvratu) pro celý systém výroby vodíku z OZE

Návratnost investice závisí především na investičních nákladech, na dotacích, prodejní ceně vodíku a ceně elektřiny z OZE, popřípadě i z jiných zdrojů. Důležitým faktorem je i výkon elektrolyzéru i fotovoltaického systému. Volba systému záleží také na jeho využití, a zda je klíčová cena a dlouhá životnost, nebo flexibilita a čistota vodíku. V grafu na obr. 25 je porovnána návratnost investice u technologie s PEM elektrolyzérem o výkonu 3 MW, ale s rozdílným výkonem fotovoltaického systému. Čím vyšší výkon FVE, tím menší provozní náklady na nákup elektřiny od jiných dodavatelů. Čistý roční zisk je vypočítán z příjmů za prodej vodíku a výdajů na provoz. Snížení návratnosti investice je podpořeno dotacemi. Nejkratší doba návratnosti investice je u FVE 5 MWp s dotací. V současné době je stále pořízení velké FVE velmi nákladné a pokud se bude odebírat elektřina z OZE za průměrnou cenu na trhu, vyplatí se odkup. Problémem může být nedostatečné zásobování. Pokud by

muselo dojít na nákup síťové elektřiny, provozní náklady by se vyšplhaly, jelikož cena na trhu za síťovou elektřinu je dvojnásobně vyšší.



Obr. 24 – Porovnání návratnosti investice při různém výkonu FVE a nákupem elektrické energie z jiných zdrojů (zdroj: vlastní)

6.11 Vyhodnocení ekonomické a environmentální efektivity návrhu

Na základě předchozích výpočtů lze shrnout klíčové ekonomické parametry návrhu. Investiční náklady PEM elektrolyzéru jsou stanoveny na 9 milionů eur, fotovoltaická elektrárna má cenu stanovenou podle výkonu od 7-10 milionů eur. Celkové investiční náklady jsou odhadovány na 13-19 milionů eur.

Provozní náklady jsou závislé na ceně elektřiny, kdy v průběhu návrhu byla průměrná cena stanovena na 100 EUR/Mwh ze síťové elektřiny podle dostupnosti na trhu. Cena elektřiny z OZE byla stanovena na 50 EUR/Mwh. Spotřeba elektrolyzéru pro 8000 provozních hodiny byla vypočítána na 24 000 MWh za rok. Celkové náklady na elektřinu tak mohou vystoupat až na 2,4 milionů korun. Údržba a provozní náklady 2-3 % z investice za elektrolyzér a FVE. Odhadovanou cenou prodeje vodíku 10 EUR za kilogram byla vypočítána návratnost investice při produkci vodíku 480 tun ročně. Návratnost investice byla porovnána bez dotace i s případnou dotací 50 % a 70 %. V závěru bylo zjištěno, že investice by byla ekonomicky smysluplná, zejména pokud je dostupná dotační podpora, čímž by byla také kratší doba návratnosti okolo 2-4 let, což je v průmyslových projektech přijatelná doba.

Pokud cena šedého vodíku poroste vlivem zdražení emisních povolenek, může být zelený vodík ještě konkurenceschopnější.

Bod zvratu by mohly ovlivnit i další příjmy nebo úspory. Jednou z hodnot je úspora za emisní povolenky, pokud toto připočteme jako dodatečný příjem, návratnost se ještě zkrátí. Pokud by FVE vyráběla více elektřiny, než spotřebuje pro výrobu vodíku, může být přebytečná elektřina prodána dalším odběratelům. Na provozní náklady je také možnost zažádat o dotaci na výrobu vodíku nebo elektřiny z OZE, což by znamenalo další úsporu do výpočtu. Bod zvratu se dá výrazně zkrátit kombinací těchto možností.

Při nahrazení šedého vodíku zeleným by ušetřené emise mohly dosáhnout 4500-6000 t CO_2 za jeden rok. Úspor by bylo dosaženo snížením nákladů za emisní povolenky. Energetická účinnost je téměř srovnatelná s výrobou šedého vodíku např. pyrolýzou, ale musel by zdroj energie pro srovnání produkce emisí být z OZE. Výroba zeleného vodíku má nulové přímé emise a jeho výroba výrazně snižuje uhlíkovou stopu. Ekonomicky výhodnější by byl z dlouhodobého hlediska, pokud se zvýší cena emisních povolenek nebo pokud vláda zavede přísnější regulace CO_2.

Projekt dává smysl z ekonomického i environmentálního hlediska zejména pokud bude zajištěna stabilní cena elektřiny z OZE a podpora ze strany státu. Pro maximální efektivitu je vhodné kombinovat elektrolyzér s vlastní FVE.

7 Zhodnocení

Z dostupných informací a výsledků vyplývá, že návrh technologie pro výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů energie pro petrochemický průmysl bude znamenat velkou investici. Investiční náklady budou podpořeny z fondů Evropské unie, avšak část nákladů bude vynaložena z vlastních zdrojů investora. Pro splnění závazku vůči Evropské unii pro zlepšení kvality ovzduší a klimatických změn je to pozitivní vývoj. Ačkoliv je budování vodíkových technologií z obnovitelných zdrojů energie dobrým úmyslem, naráží na málo rozvinutý trh v této oblasti. Návratnost investice tak potrvá, pokud nebudou stálí odběratelé a nevyrobí se maximální množství vodíku za rok. Ač má zelený vodík vysoký potenciál stát se klíčovým nástrojem v dekarbonizaci globální ekonomiky, stále se potýká s vysokými náklady a omezenou dostupností. Šedý vodík je v současnosti levnější a dominantní v průmyslu, ale je závislý na fosilních palivech a emisně náročný. Dlouhodobě udržitelnější řešení ta nabízí vodík zelený. S vývojem technologií a rostoucí podporou obnovitelných zdrojů energie se očekává, že jeho náklady postupně klesnou, a tím se stane dostupnějším pro širší použití. Pokud se zvýší cena šedého vodíku, například zdražením emisních povolenek, ekonomicky by dával projekt na výrobu zeleného vodíku smysl. Zelený vodík zcela eliminuje emise CO_2, což je jeho hlavní výhodou. Zelený vodík se tak může plně zapojit do chemického průmyslu. Nejvhodnější kombinace projektu by byl PEM elektrolyzér, s fotovoltaickou elektrárnou 10 MWp a vyšší. Další výhodou projektu pro petrochemický průmysl je skutečnost, že se vodík používá k dalším chemickým procesům. Pokud by projekt měl být nezávislý na dodavatelích elektrické energie, je nutné navrhnout systém s fotovoltaickou elektrárnou, která pokryje veškerou spotřebu energie. Znamenalo by to minimální produkci emisí a zároveň snížení provozních nákladů o nákup elektrické energie z jiných zdrojů. Přesto je nutné zvážit, jaké množství vodíku je potřeba vyrobit za jeden rok, aby se zužitkoval. Nesmí se zapomenout, že při výrobě vodíku jinými technologiemi v petrochemickém průmyslu dochází k předcházení vzniku odpadu a k energetickému využití tohoto odpadu v dalších chemických procesech.

8 Diskuse

Výroba vodíku z obnovitelných zdrojů energie je v současnosti jedním z klíčových témat energetiky. Hraje zásadní roli v dekarbonizaci průmyslu, dopravy a energetiky. Zároveň je zde mnoho ekonomických, technologických i politických výzev. V budoucnu bude pravděpodobně šedý vodík zatížen emisními poplatky nebo zcela nahrazen zeleným vodíkem.

Chemický průmysl má už dnes přebytky vodíku, plánuje tedy vyrábět vodík i pro použití v dopravě. Poptávkou po vodíku a alternativních pohonech klesne poptávka po některých rafinérských a petrochemických produktech získaných z fosilních zdrojů.

Problémem výroby zeleného vodíku je nedostatek obnovitelných zdrojů. Naše republika je umístěná ve středu Evropy, kde je velmi omezené proudění, na rozdíl od přímořských států. V našem mírném podnebí není ani dostatek slunečního světla. Při výrobě vodíku elektrolýzou vody by bylo nutné významnou část spotřeby přijímat z jiného zdroje, než jsou ropné látky nebo zemní plyn. Adekvátním zdrojem je jaderná energie.

Plánované projekty na výrobu zeleného vodíku v ČR v rámci Vodíkové strategie jsou již zahájeny. Ač se plánuje v roce 2030 spotřeba okolo 100 tisíc tun nízkoemisního vodíku a v roce 2050 dokonce až 1,5 milionu tun, tyto projekty pokryjí jen zlomek této spotřeby.

Jedním z plánovaných projektů se měl nacházet v rámci projektu Green Mine skupiny Sev.en miliardáře Pavla Tykače v bývalém areálu dolu Hlubina. Žádost o dotaci měla být poskytnuta z fondu na transformaci uhelných regionů. Tento projekt však firma odložila. Důvodem vyjmutí této části projektu je, že se nepodařilo najít způsob, jak dosáhnout pokrytí nákladů na výrobu komodity při dostatečném cash-flow projektu, a to i přes roky trvající snahu zajistit odbyt zeleného vodíku, ať již jednáními s relevantními dodavateli nebo jinými způsoby. Nepodařilo se najít odběratele, který by vodík odebíral za předem dohodnutých podmínek v požadovaném čase a množství. Zelený vodík měl být využíván v chemických provozech, jako skladovací médium pro výrobu elektřiny nebo k pohánění dopravních prostředků.

Vyráběný vodík z obnovitelných zdrojů energie není zdrojem znečišťování ovzduší. Nevztahují se tedy na něj povinnosti ze zákona 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. Zákon o ochraně ovzduší se vztahuje na zdroje znečištění, tedy zařízení, která produkují emise do ovzduší. V případě zeleného vodíku se přímé emise do ovzduší nevyskytují, proto tato

technologie není považována za významný zdroj znečištění. Přesto musí být výroba vodíku, co nejefektivnější, aby nedocházelo ke zbytečným energetickým ztrátám, jelikož i toto může ovlivňovat uhlíkovou stopu. Přestože elektrolyzéry na výrobu vodíku z OZE nejsou zdrojem emisí, mohou podléhat integrovanému povolení (IPPC), pokud jsou součástí průmyslových celků, např. v rafinérii. Naopak pokud je vodík vyráběn z fosilních paliv, podléhá přísné regulaci emisí CO_2, včetně emisních povolenek EU ETS.

Záměr výstavby nové fotolvoltaické elektrárny a elektrolyzéru podléhá posuzování vlivu na životní prostředí EIA. Projekt společnosti ORLEN Unipetrol má již vydané rozhodnutí zjišťovacího řízení podle zákona 100/2001 Sb., o posuzování vlivu na životní prostředí, jehož závěr říká, že záměr nemůže mít významný vliv na životní prostředí a nebude dále posuzován podle tohoto zákona.

V porovnání spotřeby paliva u vodíkových automobilů s automobily jezdící na fosilní paliva je zřejmé, že provoz vodíkových automobilů je nákladnější. Když se ke všemu připojí provozní náklady, není zde z ekonomického pohledu důvod vodíkové automobily využívat. Výhodou je stále hledisko environmentální, kdy uhlíková stopa je u vodíkových automobilů výrazně nižší. Diskutabilní však je, že elektroautomobily jsou efektivnější a vodík zde tedy nedává ekonomický smysl. Vodík bude klíčový spíše pro těžký průmysl a veřejnou dopravu.

Celý proces výroby vodíku od zdroje energie až po zpětnou přeměnu na elektrickou energii snižuje energetickou účinnost. Energetický cyklus elektřina → vodík → elektřina má výrazně nižší účinnost než přímé využití elektřiny. Výhoda tohoto cyklu je především možnost skladování vodíku.

Do roku 2030 by mohlo dojít k poklesu ceny zeleného vodíku díky levnější elektřině. Realizují se postupně velké vodíkové projekty v průmyslu. Do roku 2050 se počítá s tím, že zelený vodík bude dominantní. To ovlivní také cena energií z obnovitelných zdrojů a cena technologie. Zvyšováním emisních poplatků by mohlo docházet k postupnému přechodu ze šedého vodíku na zelený. Zda se investice vyplatí, ukáže teprve dlouhodobější časový horizont.

9 Závěr

Závěrem se dá zhodnotit, že výroba vodíku i jeho využití jsou zatím v počátku. Z výsledků je patrné, že petrochemický průmysl stále prioritně vyrábí vodík z fosilních paliv. Z environmentálního pohledu tak stále dochází k produkci oxidu uhličitého (CO_2) do ovzduší. Většina těchto emisí vzniká dodávaným zdrojem energie nebo životním cyklem celého technologického procesu. V porovnání všech technologií na výrobu vodíku z environmentálního hlediska není zanedbatelná výroba vodíku pyrolýzou biomasy, kdy se produkce emisí může dostat až do záporných hodnot. Nejekologičtější předpoklad je dle výsledků u výroby zeleného vodíku z vodní nebo jaderné energie. Výhodou výroby zeleného vodíku je, že není zdrojem znečišťování a nevztahují se tak na něj povinnosti ze zákona 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší.

Z ekonomického hlediska je výroba vodíku komplikovanější. Při porovnání stávajících technologií s navrhovanými technologiemi pro výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů energie je výroba vodíku nejvíce nákladná u zeleného vodíku. Technologie výroby vodíku z obnovitelných zdrojů energie je v současné době ve fázi příprav a bude se do ní teprve investovat. Tyto záměry jsou velice nákladné. Na jejich celkové způsobilé výdaje tak žádají o dotace z fondů Evropské unie (EU). Podpora není zanedbatelná, ale při žádosti o ní je do budoucna nutné plnit stanovené parametry. Vlivem těchto pravidel může docházet k odstoupení od plánovaných záměrů, protože není v silách společnosti tato pravidla splnit. Nejčastějším problémem je nedostatečná poptávka a velmi vysoké náklady, ať na výstavbu nebo provoz. Investiční náklady spolu s provozními náklady mnohonásobně zvýší prodejní cenu. Pro úplnost byla porovnána současná prodejní cena vodíku pro automobily s fosilními palivy. Rozdíl byl znatelný, cena za jeden ujetý kilometr je u natankovaného vodíku dvojnásobně vyšší než u dieselu a benzínu.

Hypotézy:

- ✓ V definovaných podmínkách je výroba a zpracování šedého vodíku ekonomicky nejpřijatelnější v rafinérské praxi.

Ano, hypotéza potvrzena. Ekonomicky je přijatelnější výroba a zpracování šedého vodíku, jelikož technologie je již v provozu a v rámci rafinérie se ostatní suroviny spojené s výrobou zpracovávají v ostatních provozech společnosti a stejně tak výstupní suroviny jako je například oxid uhličitý. To má zároveň významný vliv na oběhové hospodářství, kdy se veškeré vstupní i výstupní suroviny v petrochemickém průmyslu zpracovávají a nevzniká

tak odpad, který by bylo nutné dále likvidovat. V rafinérské praxi není žádná jiná technologie, která by mohla šedý vodík v současné době ekonomicky nahradit. Důvodem jsou nízké výrobní náklady, efektivní integrace do rafinérských procesů, synergie se stávajícími technologiemi a žádné velké investice. Výroba zeleného vodíku je v současné době ekonomicky méně přijatelná varianta z důvodu vysokých investičních nákladů na plánovaný záměr, ale i provozních nákladů zahrnujících poplatky za elektrickou energii od případných dodavatelů. Předpoklad do budoucna je, že ceny vodíku vyrobeného z obnovitelných zdrojů energie budou klesat s rostoucí poptávkou.

- ✓ Nejvyšších úspor emisí lze dosáhnout při využití směsných topných plynů z různých zdrojů.

Ano, hypotéza potvrzena. Ze získaných dat je zřejmé, že emise vyprodukované při výrobě vodíku z obnovitelných zdrojů energie dosáhnou nulových hodnot, a tudíž není potřeba cílit na další snižování (úspory). Využití směsných topných plynů při výrobě vodíku z různých zdrojů sice nedosáhne nulových emisních hodnot, ale pokud se jedná o nejvyšší možné úspory emisí, tedy nejvyšší možné snížení, pak se dá vycházet z předpokladu, že kombinace různých topných plynů umožňuje optimalizaci spalovacího procesu, snížení spotřeby primárních fosilních paliv a efektivní využití vedlejších plynů vznikajících v průmyslových procesech. V petrochemickém průmyslu se zbytky ropy neskladují ani nelikvidují, ale nadále se zpracovávají pro další energetické využití v rámci chemických procesů. Tímto zpracováním nevzniká odpad a z toho vyplývá předcházení vzniku odpadu. Toto se nazývá synergický efekt. Celkový synergický efekt znamená nižší výrobní náklady díky efektivnímu využití surovin i odpadního tepla. Zároveň je vodík spotřebováván v interních procesech, kde je možné kombinovat více metod výroby vodíku a využité odpadní teplo snižuje potřebu externích zdrojů energie. Namísto spalování přebytečných plynů na polních hořácích lze tyto plyny recyklovat a využít jako palivo. Pokud směs obsahuje více vodíku, snižuje tím emise CO_2. Přidání vodíku nebo syntézního plynu z biomasy do fosilních plynů zvýší účinnost spalování a tím sníží nespálené uhlovodíky. Využití topných směsných plynů snižuje celkovou spotřebu fosilních paliv. Výsledkem je, že pokud dojde k maximálnímu využití vedlejších průmyslových plynů, které by jinak byly spáleny bez dalšího užitku, a směs bude optimalizována pro účinné spalování s nízkými emisemi, může dojít k nejvyšším úsporám emisí.

Závěry diplomové práce se budou v horizontu několika let měnit především z hlediska ekonomického a environmentálního. Data a informace jsou především hypotetické a zahrnuté do rozvojových strategií společností. Velký vliv na plnění cílů bude mít také vývoj cen elektrické energie a poptávka po vyrobeném vodíku. Výhodou petrochemického průmyslu je interní využití vodíku pro vlastní výrobní procesy v rafinérii. Regulaci CO_2 emisí může zvýšit tlak na přechod k čistému vodíku. V krátkodobém horizontu však zůstane šedý vodík dominantní.

10 Seznam použitých zdrojů

10.1 Odborné články a publikace

SINGH S.K., TIWARI A.K., 2024. Solar-powered hydrogen production: Advancements, challenges and the path to net-zero emissions, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 84, P 549-579.

WIJAYANTA A. T., et al., 2019. Liquid hydrogen, methylcyclohexane and ammonia as potential hydrogen storage: Comparison review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44.29: 15026-15044.

RIAZ A., et al., 2023. Significance of ortho-para hydrogen conversion in the performance of hydrogen liquefaction process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48.68, 26568-26582.

CALANDRA D., WANG T. D., CANE M., a ALFIERO S., 2023. Management of hydrogen mobility challenges: A systematic literature review. Journal of Cleaner Production, 137305.

IEA (International Energy Agency), 2022. *Global Hydrogen Review*, 2022.

GUILLOT J.D., 2023. Obnovitelný vodík: Jaké výhody přinese na cestě ke klimaticky neutrální Evropě? 20210512STO04004.

IEA (International Energy Agency, 2023. Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database, 2023.

STUCHLÍK J., 2022. GrantThornton News: *Česká republika a vodík – jsme připraveni?,* 2022.

ZÁRUBA I., 2024. České noviny: *Česku ujíždí vodíkový vlak*, 2481289.

FISCHEDICK M., et al, 2014. Industry. *Climate change*. P 739.

LOUW A., 2017. Clean Energy Investment Trends. P 17.

WESSELING J.H., VAN DER VOOREN A., 2017. Lock-in of mature innovation systems: 863 the transformation toward clean concrete in the Netherlands. *Journal of cleaner production*. P 114-124.

PAPADIS E., TSATSARONIS G., 2020. Challenges in the decarbonization of the energy sector. *Energy*. 205: 118025.

SMITH A., et al., 2023. Inclusive innovation in just transitions: the case of smart local energy systems in the UK. *Environmental Innovation and Societal Transitions.* 47: 100719.

HAL H., et al., 2024. Studying long term relationship between carbon Emissions, Soil, and climate Change: *Insights from a global Earth modeling Framework.* Volume 130, P 3.

SALMAN M. et al., 2019. The impact of institutional quality on economic growth and 876 carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*. P 241.

GAO Y. et al., 2017. The global temperature target and the evolution of the long-term goal 873 of addressing climate change – from the United Nations Framework convention on climate 874 change to the Paris agreement. *Engineering*. P 272-278.

FROUZ J., MOLDAN B., 2015. Příležitosti a výzvy environmentálního výzkumu. S 252.

BALEVA S. et al., 2021. SET plan progress report 2021*: Contributing to the EU Green Deal and the path forward to a green recovery, Publications Office*. 10.2760:804820.

EU COMMISSION, et al., 2019. Annex to the Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. *The European Green Deal*. 2019.

SIDDI M., 2020. The European Green Deal: Assessing its current state and future implementation. P 6. ISSN 2242-0444.

DI FRANCIA G., CUPO P., 2023. A cost–benefit analysis for utility-scale agrivoltaic implementation in Italy. *Energies*. 16.7: 2991.

TSATSARONIS G., 2024. Some inconvenient truths about decarbonization, the hydrogen economy, and power-to-X technologies, *Journal of Environmental Management*, Volume 360. 121127, ISSN 0301-4797.

INCER-VALVERDE J., et al., 2023. "Colors" of hydrogen: Definitions and carbon intensity. Energy conversion and management, 291, 117294.

KLINGL F., et al., 2024. Renewable Hydrogen Project Risks. Deutsche Energie-Agentur, Berlin. 2024.

MEZŘICKÝ V., 2005. Environmentální politika a udržitelný rozvoj. S 38-39, 109.

SZAŁEK A., PIELECHA I., CIESLIK W., 2021. Fuel cell electric vehicle (FCEV) energy flow analysis in real driving conditions (RDC). *Energies*. 14.16: 5018.

WANG H., GAILLARD A., HISSEL D., 2019. A review of DC/DC converter-based electrochemical impedance spectroscopy for fuel cell electric vehicles. *Renewable Energy*. 141: 124-138.

IEA, 2012. Hybrid. Electric Vehicles-The Electric Drive Captures. The Imagination, IA-HEV. 2012.

ZHAO X. et al., 2023. Optimization and analysis of an integrated energy system based on wind power utilization and on-site hydrogen refueling station, *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 48, Issue 57, P 21531-21543.

COEURDEROY R., 2020. The new global road map: Enduring strategies in turbulent times: *Pankaj Ghemawat Harvard Business School Press*, P 272. ISBN: 978-1633694040.

EDWARDS P. P., KUZNETSOV V. L. & DAVID W. I., 2007. Hydrogen energy. Philosophical Transactions of the Royal Society A: *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1853), 1043-1056.

LAHRICHI A., EL ISSMAELI Y., KALANUR S. S., SHANKARA S., BRUNO G. & POLLET B. G. 2024. Advancements, strategies, and prospects of solid oxide electrolysis cells (SOECs): Towards enhanced performance and large-scale sustainable hydrogen production. *Journal of Energy Chemistry*, Volume 94, P 688-715.

RAND D. A. J., R.M. DELL R. M., 2005. The hydrogen economy: a threat or an opportunity for lead–acid batteries?, *Journal of Power Sources*, Volume 144, Issue 2, P 568-578.

WANG G., XIAO L., ZHUANG L., 2024. General definition of hydrogen energy and related electrochemical technologies, *Chinese Journal of Catalysis*, Volume 56, P 1-8, ISSN 1872-2067.

Rand D. A. J., & DELL R. M., 2007. Hydrogen energy: challenges and prospects. P 36-37.

ČAGALA L., PASKOVÁ I., GALÍK T., SOCHOR J., 2024. Biometan a vodík pro mladé. S 3-4.

SOCHOR J., 2023. Podpora vodíku v rámci Inovačního fondu v letech 2023-2024. 2023

Ministerstvo pro místní rozvoj (MMR ČR), 2022. Abeceda fondů EU 2021 – 2027. ISBN: 978-80-7538-420-1.

10.2 Legislativa

Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší

EUR-LEX © 2024: Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/2001 ze dne 11. prosince 2018 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů (online) [cit. 2024.09.02] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001

EUR-LEX © 2024: Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2023/1184 ze dne 10. února 2023, kterým se doplňuje směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/2001 stanovením unijní metodiky, v níž jsou vymezena podrobná pravidla pro výrobu kapalných a plynných paliv z obnovitelných zdrojů nebiologického původu používaných v odvětví dopravy (online) [cit. 2024.09.02] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1704969010792&uri=CELEX%3A32023R1184#ntr1-L_2023157CS.01001101-E0001

EUR-LEX © 2024: Sdělení komise Evropskému parlamentu, radě, Evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru a výboru regionů: Vodíková strategie pro klimaticky neutrální Evropu (online) [cit. 2024.09.25] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=CS

10.3 Ostatní zdroje

ER a Rada EU © 2024: Evropská rada a Rada Evropské unie, *REPowerEU: energetická politika jakou součást plánů zemí EU pro oživení a odolnost* (online) [cit. 2024.07.20] https://www.consilium.europa.eu/cs/policies/eu-recovery-plan/repowereu/

SPČR © 2024: Svaz průmyslu a obchodu, *Připravenost České republiky na vodíkové hospodářství - studie* (online) [cit. 2024.07.21] https://www.spcr.cz/images/media/2024_vodik_v_CR_studie_long.pdf

EI © 2024: EnergetikaInfo, *Orlen Unipetrol chystá u Litvínova stavbu fotovoltaické elektrárny* (online) [cit. 2024.08.01] https://www.energetikainfo.cz/33/orlen-unipetrol-chysta-u-litvinova-stavbu-velke-fotovoltaicke-elektrarny-uniqueidgOkE4NvrWuMF1Z1s5yTC1YgZHz5ailjPrsZzcKklGxc/

SPČR © 2024: Svaz průmyslu a dopravy ČR: *Připravenost České republiky na vodíkové hospodářství – tisková konference* (online) [cit. 2024.07.21] https://www.spcr.cz/images/media/2024_vodik_v_CR_studie_short.pdf

MŽP © 2024: Rámcová úmluva OSN o změně klimatu (online) [cit. 2024.07.25] https://www.mzp.cz/cz/ramcova_umluva_osn_zmena_klimatu

Fakta o klimatu © 2024: Mezinárodní klimatické dohody (online) [cit. 2024.08.03] https://faktaoklimatu.cz/infografiky/svetove-dohody

MŽP © 2024: Pařížská dohoda (online) [cit. 2024.07.25] https://www.mzp.cz/cz/parizska_dohoda

EI © 2024: EnergetikaInfo, *Energetický zákon v roce 2024* (online) [cit. 2024.08.05] https://www.energetikainfo.cz/33/energeticky-zakon-v-roce-2024-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqWeX-UDwEJOdlsmGzvNcUo/?query=energetick%FD%20z%E1kon&serp=1

MPO © 2024: Vodíková strategie České republiky, *aktualizace 2024* (online) [cit. 2024.08.10] https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/prumysl/strategicke-projekty/2024/7/Vodikova-strategie-CR-aktualizace-2024.pdf

EUR-LEX © 2024: Sdělení Evropské komise, *Zelená dohoda pro Evropu* (online) [cit. 2024.08.15] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640&qid=1728469478232

EC © 2024: European Commission – IPCEI Hy2Tech - Remarks by Executive Vice-President Vestager on Important Project of Common European Interest in the hydrogen technology value chain (online) [cit. 2024.08.20] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/cs/SPEECH_22_4549

MŽP © 2024: Zdroje znečišťování ovzduší (online) [cit. 2024.08.15] https://www.mzp.cz/cz/zdroje_znecistovani_ovzdusi

NPO © 2024: Nový pilíř posílí energetickou bezpečnost České republiky (online) [cit. 2024.08.15] https://www.planobnovycr.cz/repowereu-2

NPO © 2024: Národní akční plán čisté mobility (online) [cit. 2024.08.15] https://www.planobnovycr.cz/06-09-2024-narodni-akcni-plan-ciste-mobility

MPO © 2024: Čistá a udržitelná doprava. Vláda schválila aktualizaci Národního akčního plánu čisté mobility (online) [cit. 2024.08.15] https://www.mpo.gov.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/cista-a-udrzitelna-doprava--vlada-schvalila-aktualizaci-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility---282792/

EC © 2024: European Commission. Climate. *Systém EU pro obchodování s emisemi (EU ETS)* (online) [cit. 2024.09.20] https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en

European Council and Council of the Eropean Union © 2024: Fit for 55: Cutting methane emissions in fossil fuels (online) [cit. 2024.09.20] https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-cutting-methane-emissions-in-fossil-fuels/

SFŽP © 2024: Inovační fond (online) [cit. 2024.09.25] https://www.sfzp.cz/dotace-a-pujcky/inovacni-fond/

MŽP © 2024: Modernizační fond (online) [cit. 2024.09.25] https://www.mzp.cz/cz/modernizacni_fond

SFŽP © 2024: Programy podpory (online) [cit. 2024.09.25] https://www.sfzp.cz/dotace-a-pujcky/modernizacni-fond/programy/

ORLEN Unipetrol © 2021: Budoucnost vodíku. Wiatrak Tomasz (online) [cit. 2024.11.22] https://www.orlenunipetrol.cz/cs/Media/RozhovoryAProjevy/Stranky/Elektromobilita2021-%20Tomasz_Wiatrak-CZ.aspx

DOTAC EU © 2025: Informace o fondech (online) [cit. 2024.11.09] https://www.dotaceeu.cz/cs/evropske-fondy-v-cr/informace-o-fondech

11 Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratek

11.1 Seznam obrázků

Obr. 1 – Kvalifikace vodíku do barvy (zdroj: ORLEN Unipetrol, 2024)

Obr. 2 – Produkce vodíku v České republice (zdroj: GrantThorton News, 2022)

Obr. 3 – Předpokládaná spotřeba vodíku v roce 2023 v [kt] (zdroj: PwC, Svaz průmyslu a dopravy ČR, 2024)

Obr. 4 – Znečišťující látky unikající do ovzduší (zdroj: Zpravodajství Evropského parlamentu, 2024)

Obr. 5 – Zelená dohoda pro Evropu (zdroj: eur-lex.europa.cz, 2024)

Obr. 6 – Emise skleníkových plynů v EU (v milionech kg CO2 ekv.), údaje za rok 2020 (zdroj: Evropská agentura pro životní prostředí, 2024)

Obr. 7 – Rozdělení finančních prostředků mezi hlavní komponenty pilíře REPowerUE (zdroj: Národní plán obnovy, 2024)

Obr. 8 – Cykly elektrochemické přeměny vodíku (zdroj: Wang et al., General definition of hydrogen energy and related electrochemical technologies, 2024)

Obr. 9 – Výroba vodíku elektrolýzou s účinností 70 % (zdroj: Evropský účetní dvůr, 2024)

Obr. 10 – Podíl získávání vodíku v rámci petrochemického závodu Orlen Unipetrol (zdroj: Unipetrol, 2024)

Obr. 11 – Zásobník palivových článků (zdroj: ORLEN Unipetrol, 2024)

Obr. 12 – Schéma jednotky CCR (zdroj: ORLEN Unipetrol, 2024)

Obr. 13 – Výroba vodíku ve světě podle zdroje energií od roku 2019 až do plánované výroby v roce 2030 (zdroj: vlastní)

Obr. 14 – Využití vodíku podle regionu (zdroj: vlastní)

Obr. 15 – Produkce přímých emisí při výrobě vodíku z různých druhů technologií (zdroj: vlastní)

Obr. 16 – Energetická účinnost u konkrétních typů technologií (zdroj: vlastní)

Obr. 17 – Odhadované provozní nálady na výrobu vodíku u jednotlivých typů technologií (zdroj: vlastní)

Obr. 18 – Vývoj prodejní ceny zeleného a šedého vodíku do roku 2050 (zdroj: vlastní)

Obr. 19 – Prodejní ceny vodíku na plnících stanicích v Evropě (zdroj: vlastní)

Obr. 20 – Porovnání cen vodíku a fosilních paliv pro osobní automobily za jeden ujetý kilometr (zdroj: vlastní)

Obr. 21 – Celková uhlíková stopa vodíku z OZE a fosilních zdrojů (zdroj: vlastní)

Obr. 22 – Investiční náklady na pořízení elektrolyzéru o výkonu 3 MW podle trhu (zdroj: vlastní)

Obr. 23 – Investiční náklady pro celý systém výroby vodíku z OZE s různou výší dotace (zdroj: vlastní)

Obr. 24 – Porovnání návratnosti investice při různém výkonu FVE a nákupem elektrické energie z jiných zdrojů (zdroj: vlastní)

11.2 Seznam tabulek

Tab. 1 – Cíl pro podíl energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie v roce 2020 (tabulka: vlastní, zdroj: Směrnice evropského parlamentu a Rady EU 2018/2001, příloha I, část A)

Tab. 2 – Rozdíly ve fyzikálně chemických vlastnostech zemního plynu a vodíku (zdroj: Galík T., 2024: Biometan a vodík pro mladé)

Tab. 3 – Norma ISO 14 987-2 stanovující čistotu vodíku pro FCVE (Fuel Cell Electric Vehicle – elektrický automobil s palivovými články) (tabulka vlastní, zdroj: ORLEN Unipetrol)

Tab. 4 – Chemické složení zemního plynu (tabulka: vlastní, zdroj: ORLEN Unipetrol)

Tab. 5 – Fyzikálně – chemické vlastnosti plynu (tabulka: vlastní, zdroj: ORLEN Unipetrol)

Tab. 6 – Charakteristika ropných zbytků (tabulka: vlastní, zdroj: ORLEN Unipetrol)

Tab. 7 – Obecné charakteristiky kapalných paliv (tabulka: vlastní, zdroj: BREF – Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách BAT pro velká spalovací zařízení)

Tab. 8 – Výstupní suroviny vyrobené na jednotce CCR (zdroj: vlastní)

Tab. 9 – Srovnání emisí různých metod výroby vodíku (tabulka: vlastní, zdroj: Hytep)

Tab. 10 – Porovnání energetické účinnosti výroby vodíku z OZE s ostatními technologiemi (tabulka: vlastní, zdroj: International Journal of Hydrogen Energy)

Tab. 11 – Prodejní ceny vodíku na plnících stanicích v evropských státech (tabulka: vlastní, zdroj: H2.live)

Tab. 12 – Účinnost a cena jednotlivých typů elektrolyzérů (zdroj: vlastní)

Tab. 13 – Porovnání provozu AEL elektrolyzéru a PEM elektrolyzéru (zdroj: vlastní)

Tab. 14 – Ekonomické porovnání metod ukládání a distribuce vodíku (zdroj: vlastní zpracování na základě dostupné literatury – IEA, DOE, International Journal of Hydrogen energy)

Tab. 15 – Vstupní parametry výpočtu (zdroj: vlastní výpočty a syntéza informací)

Tab. 16 – Celkové investiční náklady na 3000 kW elektrolyzér (tabulka: vlastní, zdroj: IEA, Hydrogen COuncil, DOE, IRENA)

Tab. 17 – Tabulka vypočítaných bodů zvratů z různých scénářů (zdroj: vlastní výpočty)

Tab. 18 – Vstupní parametry pro porovnání návratnosti investice pro různé výkony FVE (zdroj: vlastní výpočty a syntéza informací)

Tab. 19 – Výpočet bodu zvratu pro celý navrhovaný systém bez dotace a s dotací 50 % při využití chybějícího zdroje energie nákupem elektrické energie z OZE (zdroj: vlastní výpočty)

Tab. 20 - Výpočet bodu zvratu pro celý navrhovaný systém bez dotace a s dotací 50 % při využití chybějícího zdroje energie nákupem elektrické energie z fosilních paliv (zdroj: vlastní výpočty)

Tab. 21 – Celková uhlíková stopa vodíku z OZE v porovnání s fosilními zdroji (tabulka vlastní: zdroj: AVČR)

Tab. 22 - Investiční (kapitální) náklady pro stanovené cíle EU (tabulka: vlastní, zdroj: SPČR)

11.3 Seznam použitých zkratek

a.s. – akciová společnost

AVČR – Akademie věd České republiky

CCR – Continuous Catalytic Reforming – jednotka reformingu s kontinuální regenerací katalyzátoru

CCS – Carbon Capture and Storage – zachytávání a ukládání uhlíku

CCU – Carbon Capture and Use – zachytávání a využití uhlíku

CCUS – carbon capture utilization and storage – proces zachytávání a ukládání uhlíku společně s jeho využitím

CH4 – metan

CO – oxid uhelnatý

CO_2 – oxid uhličitý

ČR – Česká republika

DOE – U.S. Department of Energy -

EK – Evropská komise

EU – Evropská unie

EUR – euro

EU ETS – EU Emissions Trading Systém – systém EU pro obchodování s emisemi

FCEV – Fuel cell electric vehicle – elektrický automobil s palivovými články

FVE – fotovoltaické elektrárna

g/mol – jednotka molekulové hmostnosti

GW – gigawatt

H_2 – elementární vodík

H_2O – voda, chemická sloučenina vodíku a kyslíku

HCVD – hydrokrakovaný vakuový destilát

HDP – hrubý domácí produkt

CHF – švýcarský frank

IEA – International Energy Agency – Mezinárodní agentura pro energii

IPCEI – významné projekty společného evropského zájmu

IPPC – Integrated Pollution Prevention and Control – Integrovaná prevence a omezování znečištění

IRENA – International Renewable Energy Agency – Mezinárodní agentura pro obnovitelnou energii

KaDP – komprese a distribuce plynu

Kč – koruna česká

kW – kilowatt

LPG – Liquified Petroleum Gas – zkapalněný ropný plyn

m_3 – metr krychlový

MW – megawatt

MJ – megajoule

MMR – Ministerstvo pro místní rozvoj

Mpa – megapascal

MPO – Ministerstvo průmyslu a obchodu

MŽP – Ministerstvo životního prostředí

O_2 – kyslík

OPST – Operační program Spravedlivá transformace

OZE – obnovitelné zdroje energie

POX – parciální oxidace

N_2O – oxid dusný

NPO – Národní plán obnovy

OSN – Organizace spojených národů

PEM – polymerická elektrolytická membrána

PFC – perlfluoruhlovodíky

PPA – Power Purchase Agreement – smlouva o dodávce obnovitelné energie

RFNBO – Renewable fuels of non-biological origin – kapalná a plynná paliva nebiologického původu

TEN-T – Transevropské dopravní sítě

SFŽP – Státní fond životního prostředí

SPČR – Svaz průmyslu a dopravy ČR

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change – Rámcová úmluva OSN o změně klimatu

USD – americký dolar

°C – stupeň Celsia