

CHEMICKÝ PRŮMYSL

NÁKLADOVÁ CENA VODÍKU Z ELEKTROLÝZY S VYUŽITÍM OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE

ANNA TOCHÁČKOVÁ^a, ALEŠ LACIOK^b
a MARTIN ŠILHAN^a

^a Centrum Výzkumu Řež s.r.o., Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež, ^b ČEZ, a. s., Duhová 2/1444, 140 53 Praha
martin.silhan@cvrez.cz

Došlo 3.3.21, přijato 12.8.21.

Klíčová slova: vodík, cena, technologie, palivový článek, elektrolýza

Obsah

1. Úvod
2. Cena vodíku vyrobeného různými technologiemi
3. Metodika výpočtů
4. Výsledky
 - 4.1. Výroba vodíku
 - 4.2. Úprava vody
 - 4.3. Komprese vodíku
 - 4.4. Skladování vodíku
 - 4.5. Využití vodíku
5. Diskuse a závěry

1. Úvod

Výroba vodíku elektrolýzou je v současné době poměrně marginální, do budoucna se však obecně očekává zvýšení objemů produkce, především kvůli nízkým měrným emisím CO₂ z elektrolýzy s využitím obnovitelných zdrojů energie (OZE). Aktuální nákladová cena produkce není obvykle uváděna, často je zmiňována důležitost různých forem státních podpor nebo očekávání snížení cen klíčových komponent. Hydrogen Economy Outlook¹ uvádí klíčový odhad ceny vodíku z elektrolýzy využívající OZE pro různé části světa v rozmezí 1,3–2,3 EUR/kg v roce 2030 a ve většině světa pak 0,6–1,5 EUR/kg vodíku v roce

2050. Autoři zároveň tato čísla podmiňují pokračováním poklesu ceny elektrolýzérů v důsledku výstavby velkokapacitních výrobníků. Především výrobci PEM elektrolýzérů zmiňují plány na výstavbu velkokapacitních výrobníků a s tím související nižší budoucí kontraktační ceny dané očekávanými objednávkami elektrolýzérů v různých oborech (energetika, chemický, popřípadě další zpracovatelský průmysl). Již dnes jsou elektrolýzéry vyrobené v Číně výrazně levnější než elektrolýzéry tradičních výrobníků.

Cílem příspěvku je ověření nákladové ceny vodíku při využití aktuálních tržních cen zařízení pro výrobu a zpracování vodíku při využití obnovitelného zdroje energie. Dále je uvedena návratnost vodíku při různých způsobech jeho využití. Autoři nemohou zveřejnit přesné cenové nabídky konkrétních dodavatelů, snaží se však uvádět typická čísla.

V podmínkách České republiky představuje elektrolýtická výroba vodíku přirozený doplněk a prostředek pro omezení výkonových špiček OZE. Cena vodíku na plnicích stanicích v Německu je obvykle 9,5 EUR/kg vodíku (v České republice prakticky neexistuje trh s vodíkem pro dopravu). Podle autorů v cit.² lze v roce 2050 očekávat stabilizaci ceny vodíku na plnicí stanici v rozmezí 4 až 8 EUR/kg vodíku.

2. Cena vodíku vyrobeného různými technologiemi

Výrobní náklady pro některé využívané technologie výroby vodíku jsou shrnuty v tab. I a tab. II. Náklady v tab. I mají široké rozpětí, neboť v různých částech světa jsou velice odlišné přírodní podmínky i ceny lidské práce. Je patrné, že výroba z obnovitelných zdrojů má v některých oblastech výrazně vyšší výrobní náklady než jiné technologie.

Tab. III zobrazuje ceny výroby vodíku se započtením investičních výdajů aktuální k dubnu 2020 podle agentury Platts⁵. Z tab. III lze pozorovat možnou cenovou přijatelnost nízkoemisní varianty výroby, ale i určité výhody výroby vodíku způsobem SMR. SMR je totiž zavedený, vyspělý a relativně levný způsob výroby. Za určitých podmínek je možné dosáhnout touto výrobou ceny pod 0,93 EUR/kg vodíku. Další výhodou je možnost využití separace uhlíku, čímž je možné snížit měrné emise oxidu uhličitého.

Tabulka I

Náklady na výrobu vodíku podle zdroje výroby v EUR/kg (cit.³)

Způsob výroby	SMR	SMR se separací	Zplyňování uhlí	Obnovitelné zdroje
Náklady, EUR/kg	0,8–3,0	1,5–2,7	1,1–2,0	2,8–6,9

Tabulka II

Cena vodíku podle výroby ze září 2019 podle International Renewable Energy Agency⁴

Parametr	Fotovoltaická elektrárna	Větrná elektrárna
Pořizovací cena, EUR/MWh	16,2–78,7	21–51
Náklady na výrobu vodíku, EUR/kg	3,1–6,4	2,6–4,0
	SMR ZP se separací CO ₂	Zplyňování uhlí se separací CO ₂
Pořizovací cena, EUR/GJ	2,8–7,4	1,4–3,5
Náklady na výrobu vodíku, EUR/kg	1,4–2,2	1,7–1,9

Tabulka III

Aktuální ceny vodíku včetně investičních nákladů z 1. 4. 2020 v EUR/kg (cit.⁵)

	Původní cena	Aktuální cena
Japonsko – parní reformování methanu (SMR)	1,96	1,92
Kalifornie – elektrolýza vody	1,76	1,84
Nizozemí – parní reformování ZP se zachytáváním CO ₂	0,94	0,96

Ke snížení ceny vodíku dochází také z důvodů snížení nákladů na pořízení alkalických elektrolyzérů. V Evropě a Severní Americe klesly náklady na elektrolyzér od roku 2014 o 40 % a v Číně dokonce o 80 %. BNEF (Bloomberg New Energy Finance) na základě těchto dat předpokládá pokles ceny obnovitelného vodíku na 0,7–1,5 EUR/kg do roku 2050 (cit.¹). Při naplnění tohoto předpokladu bude vodík konkurenceschopný k zemnímu plynu a obnovitelný vodík bude levnější než vodík vyrobený parním reformováním či zplyňováním uhlí.

Autoři se domnívají, že při rozsáhlém využití vodíku bude aplikovaná další dodatečná podmínka, a sice, aby byl vodík vyroben pomocí bezemisního, ideálně obnovitelného zdroje energie. Očekáváme, že pro budoucí nákladovou cenu vodíku bude relevantní spojení OZE (popřípadě jaderného zdroje) a elektrolýzy. Neočekáváme masivní budoucí výrobu vodíku z přírodního zemního plynu, ani elektrolýzou, spojenou s elektrickou energií z energetického mixu.

3. Metodika výpočtů

Uvažovaný vodíkový výrobní řetězec se sestává z elektrolýzy vody s využitím elektřiny z OZE a uložení vodíku v zásobnících, ve variantě vysokotlakého skladování vodíku a také bez komprese vodíku. Byly uvažovány tři možnosti využití vodíku: přeměna v palivových člancích a prodej elektrické a tepelné energie, na plnicí stanici vodíkových vozidel a spoluspalováním neupraveného vodíku spolu se ZP v paroplynové elektrárně. Při výpočtech jsme používali předpoklady uvedené v tab. IV.

Při výpočtech jsme uvažovali elektrolyzér s kapacitou produkce vodíku 20 kg/h, což odpovídá příkonu 1 MW_{el}. Při využití 5000 hodin ročně při nominálním výkonu to znamená roční produkci 100 000 kg vodíku, což odpovídá

3300 MWh. Uvažovali jsme 50% investiční dotaci na veškerá zařízení související s vodíkem. Životnosti elektrolyzérů a palivového článku byly převzaty od výrobce, životnosti pomocných zařízení (kompresory, tlakové zásobníky, úprava vody, sušení vodíku) jsme předpokládali 10 let.

Tabulka IV

Předpoklady využití při výpočtech

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Výhřevnost vodíku	29,8·10 ⁻⁴	MWh/Nm ³
	330·10 ⁻⁴	MWh/kg
Výhřevnost ZP	9,72	kWh/Nm ³
Emisní faktor ZP ^a	0,2	t _{CO2} /MWh výhřevnosti ZP
Kurz EUR-CZK	27	Kč/EUR
Kurz USD-CZK	25	Kč/USD
Cena ZP	200	Kč/MWh
Cena povolenky CO ₂	40	EUR/t _{CO2}
Cena vyrobené elektřiny	60	EUR/MWh
Cena vyrobeného tepla	15	EUR/MWh
Cena vodíku na plnicí stanici	9,5	EUR/kg _{H2}
Roční využití vodíkového zařízení ^b	5000	h
Investiční dotace	50	%

^a Emisní faktor ZP, vyhl. 425/2004; ^b tento parametr závisí na poměru špičkového výkonu OZE a příkonu elektrolyzérů, je důležitý při posuzování návratnosti investice

Byly uvažovány lineární odpisy. Časovou hodnotu peněz jsme neuvažovali, mj. vzhledem k možné aplikaci vodíkových technologií v různých průmyslových oborech s odlišnými předpoklady o návratnosti investovaného kapitálu.

Byly uvažovány čtyři ceny elektrické energie z OZE v rozmezí 27–59,2 EUR/MWh (cit. ^{6–8}).

4. Výsledky

4.1. Výroba vodíku

Vypočítané náklady na produkci vodíku jsou seřazeny v tab. V. Pro porovnání ukazuje tab. VI náklady na produkci vodíku s uvažováním nulových investičních dotací. Rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami se snižuje s rostoucí cenou elektřiny z OZE, což odpovídá poznatkům z literatury o tom, že velkou část nákladů na produkci vodíku pomocí elektrolýzy tvoří náklady na elektřinu. Dodávané elektrolýzéry obsahují jednotku čištění vodíku, u PEM elektrolýzérů jde prakticky jen o sušení obvykle na bázi molekulových sít, u alkalických elektrolýzérů se kromě sušení také provádí snížení obsahu kyslíku ve vodíku.

4.2. Úprava vody

Některé elektrolýzéry mají zabudovaná zařízení na čištění vody, někteří výrobci tvrdí, že lze použít neupravenou pitnou vodu. Průmyslová jednotka pro reverzní osmó-

zu s kapacitou 500 l/h (elektrolýzéry s výkonem 1 MW_e mají spotřebu vody 200–400 l/h) je dodávána za cca 4,4 tis. EUR. Náklady na čištění vody pomocí reverzní osmózy jsou v rozmezí 0,11–0,15 EUR/MWh, tj. zanedbatelné oproti ostatním nákladům.

4.3. Kompresce vodíku

Kompresce vodíku je relevantní pouze při uvažování varianty vysokotlakého skladování vodíku. Ke kompresi vodíku lze použít například pístový kompresor v bezolejové úpravě. Existují i další typy vodíkových kompresorů (elektrochemický, s iontovou kapalinou aj.). Mechanické kompresory jsou vhodné pro kompresi na vysoké tlaky (3 MPa a vyšší)⁹. Ve většině realizovaných pilotních projektů byly také využívány pístové kompresory. Náklady na kompresi vodíku v takovém kompresoru jsou v rozmezí 1,7–2,4 EUR/MWh.

4.4. Skladování vodíku

V našich výpočtech jsme zásobníky rozdělili podle pracovního tlaku na nízkotlaké (do 4 MPa) a vysokotlaké (20–34,5 MPa).

Byla provedena parametrická analýza pro uložené množství vodíku: 100, 300, 700 kg. Její výsledky ukazuje tab. VII (zásobník č. 1 je nízkotlaký, ostatní zásobníky jsou vysokotlaké). Ekonomicky nejvýhodnější je uskladnění v nízkotlakých zásobnicích. To je dáno především nižšími investičními náklady, nízkotlaké zásobníky jsou zpravi-

Tabulka V
Náklady na produkci vodíku v závislosti na ceně elektřiny z OZE

	Cena elektřiny z OZE [EUR/MWh]			
	27 ^a	36,6 ^b	42,3 ^b	59,2 ^c
Elektrolýzér	Náklady na produkci vodíku [Kč/MWh]			
AEL	1152–1356	1513–1720	1718–1934	2335–2577
PEM	1501–1745	1911–2230	2152–2515	2877–3373
SOEC	2040	2368	2561	3140

^a cit. ⁶, ^b cit. ⁷, ^c cit. ⁸

Tabulka VI
Náklady na produkci vodíku v závislosti na ceně elektřiny z OZE s uvažováním nulové investiční dotace

	Cena elektřiny z OZE [EUR/MWh]			
	27 ^a	36,6 ^b	42,3 ^b	59,2 ^c
Elektrolýzér	Náklady na produkci vodíku [Kč/MWh]			
AEL	1199–1688	1592–2052	1825–2268	2515–2909
PEM	1848–2124	2259–2610	2502–2898	3225–3753
SOEC	3160	3487	3682	4259

^a cit. ⁶, ^b cit. ⁷, ^c cit. ⁸

Tabulka VII
Náklady na uskladnění vodíku

č.	Množství uskladněného vodíku [kg]		
	100	300	700
1 ^a	0,40	1,21	2,82
2 ^b	0,50	1,51	3,53
3 ^c	–	1,41	–
4 ^d	–	–	2,85
5 ^e	0,60	1,80	4,20
6 ^f	1,00	2,96	6,93

^a 40 bar, 99,3 kg, ocel, ^b 200 bar, 19 kg, ocel, ^c 300 bar, 341 kg, kompozit (uhlíková vlákna a plast), ^d 300 bar, 767 kg, kompozit (uhlíková vlákna a plast), ^e 300 bar, 19 kg, ocel, ^f 345 bar, 6,2 kg, hliník a kompozit (uhlíková vlákna a epoxidová pryskyřice)

dla vyrobeny z oceli. V tomto případě lze také vynechat náklady na kompresi. Nevýhodou nízkotlakých zásobníků je vyšší objem oproti vysokotlakým zásobníkům.

4.5. Využití vodíku

4.5.1. Palivové články

Vodík lze v palivovém článku přeměnit zpět na elektřinu, jako vedlejší produkt vzniká teplo. V nejpříznivějším případě vychází prostá míra návratnosti investice do palivového článku 4, resp. 6 let pro PEMFC, resp. PAFC (50% investiční dotace), bez investiční dotace vychází prosté doby návratnosti 12 resp. 17 let pro PEMFC resp. PAFC. Pro SOFC vychází prostá doba návratnosti 45 let, což nenaplnuje komerční úvahy o návratnosti kapitálu a pravděpodobně přesahuje fyzickou životnost SOFC.

4.5.2. Plnicí stanice

Jako příklad byla vybrána plnicí stanice IC90 s plnicím tlakem vodíku 70 MPa, její pořizovací cena a technické parametry jsou uvedeny v tab. VIII. Na základě těchto parametrů byly vypočteny roční náklady na zpracování vodíku, které spolu s tržbami ukazuje tab. IX. Podle zprávy ICCT (cit.¹⁰), který se zabývá rozvojem infrastruktury vodíkových plnicích stanic, se cena vodíkové plnicí stanice v roce 2017 pohybovala okolo 1,92–2,8 mil. EUR. Autoři zprávy očekávají pokles této hodnoty na 0,93 mil. EUR do roku 2030. Zároveň však očekáváme snížení ceny vodíku na plnicích stanicích, a to ještě výraznější než autoři v cit.².

4.5.3. Paroplynová elektrárna

Při spalování vodíku v paroplynové elektrárně spolu se zemním plynem je jako zisk uvažována vyrobená energie a úspory na povolenkách CO₂. Cena vodíku vyro-

beného elektrolýzou jako paliva je cca 6× vyšší než cena zemního plynu (uvažujeme cenu elektřiny 27 EUR/MWh a alkalický elektrolýzér). Zisk ze spalování vodíku v paroplynové elektrárně dorovná náklady na produkci vodíku (*ceteris paribus*) při ceně povolenky CO₂ 180 EUR/t.

5. Diskuse a závěry

V souladu s literární rešerší vychází, že nejlevnější je produkce vodíku pomocí alkalické elektrolýzy. Očekáváme však, že do budoucna budou PEM elektrolýzéry levnější než alkalické, především díky lepším schopnostem změny výkonu a lepší schopnosti modulárního uspořádání, což umožňuje snadnou přepravu a instalaci v kontejnerech. Námí vypočítané ceny se pohybují v rozmezí 1,4–3,1 EUR/kg vodíku (cit.²), kde spodní hranice odpovídá AEL při ceně elektřiny 27 EUR/MWh a horní hranice odpovídá SOEC při ceně elektřiny 59,2 EUR/MWh. Tato hodnota je mírně vyšší než ceny odhadované ve zprávě Hydrogen Economy Outlook¹⁰, je však třeba vzít v potaz, že se jedná o předpovědi pro rok 2030 a 2050. Obecně se výsledky studií nákladovosti výroby vodíku liší především na základě použité technologie, její ceny a životnosti, ročního využití výrobní kapacity a přírodních a legislativních podmínek^{11–13}.

Při skladování vodíku jsou i bez započítání nákladů na kompresi nízkotlaké zásobníky levnější na provoz než vysokotlaké. Toto je nejspíše dáno nízkými investičními náklady nízkotlakých zásobníků (obvykle jsou vyrobeny z oceli) i tím, že kompozitní vysokotlaké zásobníky jsou zpravidla vyráběny na skladování menších množství vodíku. U varianty nízkotlakého skladování vodíku odpadá pořizování kompresoru, který představuje technologicky složitá a potenciálně poruchová zařízení.

Při prodeji elektřiny a tepla vznikajících v palivovém článku je situace poměrně příznivá, PEMFC i PAFC vykazují poměrně atraktivní prosté doby návratnosti.

Významnou část ceny elektrolytický vyrobeného vodíku tvoří odpisy elektrolýzéro a cena vstupní energie. Snížení odpisů elektrolýzéro je možné dosáhnout napří-

Tabulka VIII
Parametry a investiční náklady na plnicí stanici IC90 od firmy Linde

Investiční náklady [mil. EUR]	Příkon [kW]	Průtok vodíku [kg/h]
1,2	105	30

Tabulka IX
Roční náklady na zpracování vodíku v plnicí stanici IC90 a tržby za vodík

Náklady na zpracování vodíku [EUR/MWh]	Tržby za vodík [EUR/MWh]
23,6	287,9

klad zlevněním elektrolyzérů – očekáváme, že klesat bude především cena PEM elektrolyzérů. Druhou možností je zvýšení roční výroby elektrolyzérů, čehož je možné docílit dalším technologickým rozvojem, například zajištěním možnosti efektivního a bezpečného provozu elektrolyzérů při nízkých výkonech, nebo zlepšením dynamických vlastností elektrolyzérů.

Cena vstupní elektrické energie z intermitentních zdrojů může být významně ovlivněna budoucí povinností provozovatelů snižovat výkon v době okamžitých přebytků elektrické energie.

Další faktor, který má vliv na konkurenceschopnost vodíku oproti fosilním palivům (především zemní plyn) je cena povolenky CO₂ a spotřební daň – vodík z obnovitelných zdrojů energie nevstupuje do systému obchodování s povolenkami a vodík také není zatížený spotřební dani.

Seznam zkratk

AEL	alkalická elektrolýza
HDPE	polyethylen s vysokou hustotou
OZE	obnovitelný zdroj energie
PAFC	palivový článek s kyselinou fosforečnou
PEM	polymerní membránový elektrolyt
PEMFC	palivový článek s polymerním membránovým elektrolytem
SMR	parní reformování
SOEC	vysokoteplotní elektrolýza na bázi pevných oxidů
SOFC	palivový článek na bázi pevných oxidů
ZP	zemní plyn

LITERATURA

1. <https://assets.bhub.io/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>, staženo 5. 4. 2020.
2. Apostolou D., Xydís G.: *Renewable Sustainable Energy Rev.* 113, 109292 (2019).
3. *The Future of Hydrogen, Technology report*. International Energy Agency, France 2019, https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf, staženo 15. 7. 2021.
4. McDonald, J., Robinson, J.: <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/natural-gas/040120-platts-expands-hydrogen->

assessments, staženo 8. 5. 2020.

5. Gielen D., Taibi E., Miranda R.: *Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi 2019, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf, staženo 15. 7. 2021.
6. Henze V.: <https://about.bnef.com/blog/scale-up-of-solar-and-wind-puts-existing-coal-gas-at-risk/>, staženo 8. 5. 2020.
7. <https://www.lazard.com/perspective/lcoe2019/>, staženo 8. 5. 2020.
8. <https://irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>, staženo 8. 5. 2020.
9. Sdanghi, G., Maranzana, G., Celzard, A., Fierro, V.: *Renewable Sustainable Energy Rev.* 102, 150 (2019).
10. Aaron I., Lutsey N.: *Briefing*. International Council on Clean Transportation, 2017. <https://theicct.org/publications/developing-hydrogen-fueling-infrastructure-fuel-cell-vehicles-status-update>, staženo 15. 7. 2021.
11. Sorgulu F., Dincer I.: *Int. J. Hydrog. Energy* 43, 10522 (2018).
12. Khzouz M., Gkanas E. I., Shao J., Sher F., Beherskyi D., El-Kharouf A., Al Qubeissi, M.: *Energies* 13, 3783 (2020).
13. Dispenza G., Sergi F., Napoli G., Antonucci V., Andaloro L.: *J. Energy Storage* 24, 100757 (2019).

A. Tocháčková^a, A. Laciok^b, and M. Šilhan^a
^aResearch Centre Řež, ^bČEZ, a. s., Praha): **Production Cost of Hydrogen from Electrolysis Driven by Renewable Energy Sources**

The aim of this work is to estimate the real cost of hydrogen produced by electrolysis using renewable sources of energy. The calculated price of hydrogen depends mainly on the investment costs, energy prices, service life and utilization rate of the equipment, the latter being predetermined by natural conditions for renewable energy sources, for example, by the intensity and time distribution of sunlight. Furthermore, different ways to utilise the hydrogen are assessed in view of economic viability and compared.

Keywords: hydrogen, costs, technology, fuel cell, electrolysis