

Vodik – novi nosilec energije

Anton Gradišek, 6. marec 2026

- Jules Verne je pisal o vodiku leta 1874 v romanu *Skrivnostni otok*

Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir. Un jour, les soutes des steamers et les tenders des locomotives, au lieu de charbon, seront chargés de ces deux gaz comprimés, qui brûleront dans les foyers avec une énorme puissance calorifique.

Jules Verne, *L'Île mystérieuse*, 1874

Viri energije

- Ogenj – pred več kot 100 000 leti
- Delo, živali, veter, jadranje, transport po rekah - dovolj do 18. stoletja
- Industrijska revolucija: **premog**
- 20. stoletje: **nafta, zemeljski plin**, jedrska energija
- Fuzija?
- Obnovljivi viri energije:
 - Sončna
 - Vetrna
 - Hidro
 - Geotermalna
 - Biomasa
 - Plima
 - ...

V bistvu je uporaba sončne
energije že uporaba fuzije!

Shranjevanje energije

- Črpalna hidro
- Baterije
- Vodik

Stacionarne baterije

- Jardelund, Germany – 50 MWh baterijski sistem, ki moderira sončne in vetrne elektrarne (Eneco & Mitsubishi)
- 800 000 € za MWh moči
- Moderne elektrarne bodo potrebujejo baterijske sisteme za moderacijo moči omrežja

Vodikova ekonomija

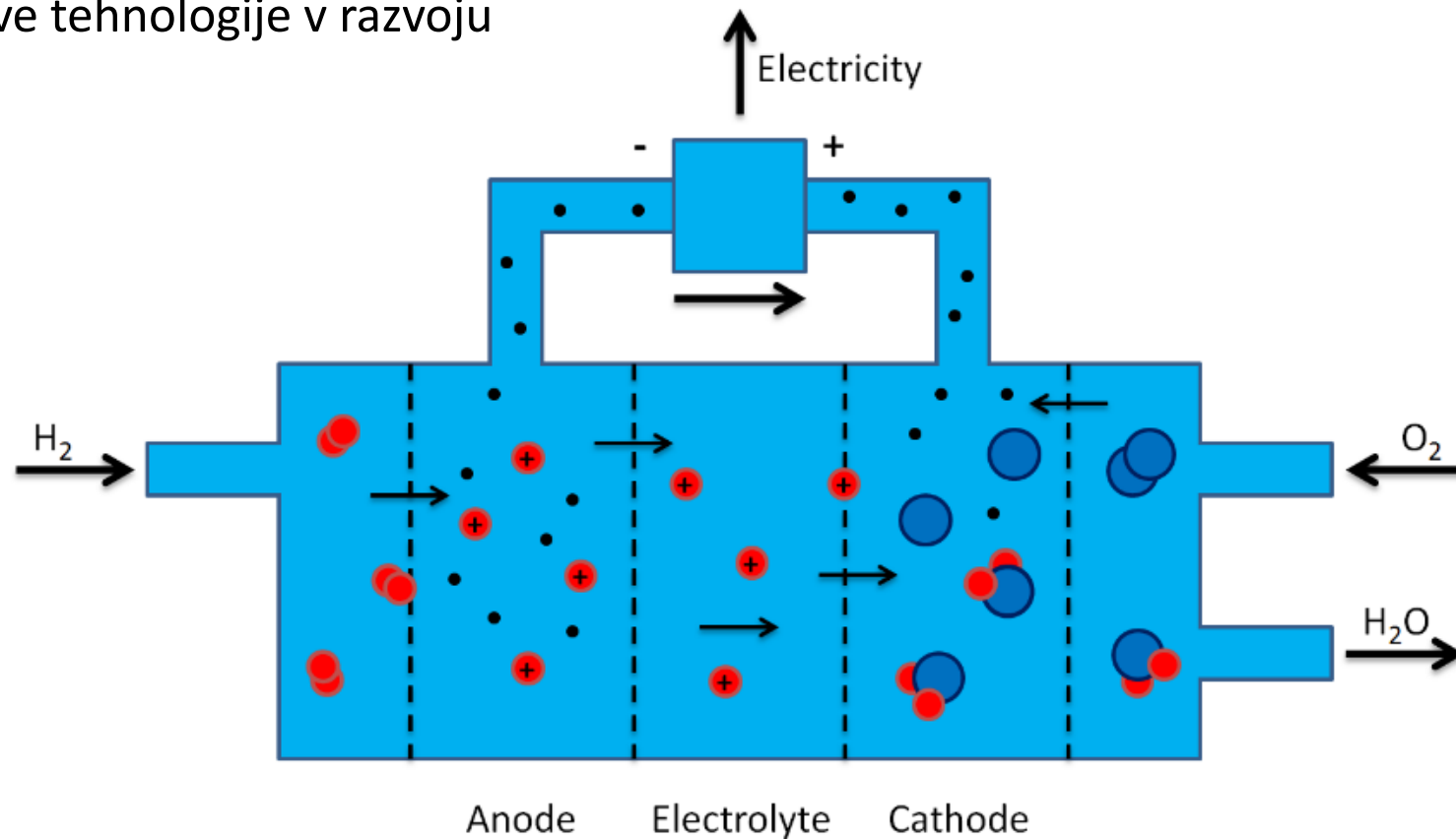
- Proizvodnja
- Shranjevanje vodika
- Gorivne celice
- Prilagoditev infrastrukture
- Politična podpora!

Zakaj vodik?

- Zelo visoka energijska gostota (veliko boljše od bencina)
- Lahko ga pridobivamo povsod
- Omogoča shranjevanje presežkov energije
- Gorivne celice so učinkovite
- Ob gorenju nastane voda → „carbon free“

Gorivna celica

- PEM (proton exchange membrane) (<100 °C)
- Solid oxide fuel cell (SOFC)
- Nove tehnologije v razvoju



THE HYDROGEN RAINBOW

COLOURS OF HYDROGEN BY CARBON FOOTPRINT

PRODUCTION METHOD	HYDROGEN COLOUR	TECHNOLOGY	POWER SOURCE	CO2 FOOTPRINT*	EQUIVALENCE**
 ELECTRICITY	GREEN	ELECTROLYSIS	 WIND, SOLAR, HYDRO, TIDAL, GEOTHERMAL	NO CO2 EMISSIONS	0 GALLONS OF GASOLINE CONSUMED
	PINK		 NUCLEAR		
	YELLOW		 MIXED-ORIGIN GRID ENERGY	4 – 10 KGS OF CO2 EMISSIONS PER 1KG OF HYDROGEN PRODUCED	1.1 GALLONS OF GASOLINE CONSUMED
 FOSSIL FUEL	BLUE	NATURAL GAS REFORMING, CCUS ***GASIFICATION, CCUS	 NATURAL GAS, COAL	2 – 4 KGS OF CO2 EMISSIONS PER 1KG OF HYDROGEN PRODUCED	0.45 GALLONS OF GASOLINE CONSUMED
	TURQUOISE	PYROLYSIS	 NATURAL GAS	3 – 8 KGS OF CO2 EMISSIONS PER 1KG OF HYDROGEN PRODUCED	0.9 GALLONS OF GASOLINE CONSUMED
	GRAY	NATURAL GAS REFORMING	 NATURAL GAS	9 – 12 KGS OF CO2 EMISSIONS PER 1KG OF HYDROGEN PRODUCED	1.4 GALLONS OF GASOLINE CONSUMED
	BROWN	GASIFICATION	 BROWN COAL	20 – 27 KGS OF CO2 EMISSIONS PER 1KG OF HYDROGEN PRODUCED	3 GALLONS OF GASOLINE CONSUMED
	BLACK		 BLACK COAL		

*CO2 (Carbon dioxide) footprint compiled from various scientific estimates as a general guide, but each category can be higher in some use-cases

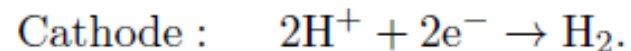
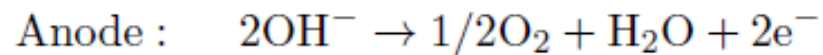
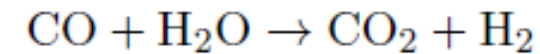
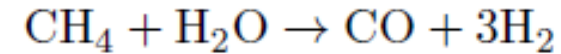
**Amount of CO2 emissions visualised in equivalence to gallons of gasoline consumed

***CCUS: Carbon capture, utilization, and storage

<https://www.energywatch.com.my/wp-content/uploads/2023/07/REVISED-Hydrogen-Rainbow-Visual-2-scaled.jpg>

Proizvodnja vodika

- Fosilna goriva
 - Iz naravnega plina (modri in sivi)
 - Iz težkih frakcij nafte, iz premoga (črni, rjavi)
- Elektroliza - kjer imamo poceni elektriko (zeleni, rumeni, rožnati)



Vodik & elektroliza

- PEM elektroliza – hitra, primerna za nihajoče vire (OVE)
- Alkalna elektroliza – zrela, cenovno ugodna tehnologija
- SOEC – visoko-temperaturna, visoka učinkovitost (v razvoju)

- Oranžni vodik (iz biomase)
- Beli vodik (geološke formacije)
- Kreativni pristopi – genetsko spremenjene bakterije, ki proizvajajo vodik? (še zelo v raziskovalni fazi)

Zajem in shranjevanje CO₂

- Shranjevanje v
 - jamah
 - opuščenih rudnikih, naftnih vrtinah
 - mineralizacija – CaCO₃, MgCO₃
 - v oceanih (slaba ideja!)
- To je načeloma samo kratkoročna rešitev...
- ... lahko pa uporabimo CO₂ in vodik za proizvodnjo sintetičnih goriv

Zajem CO₂ iz zraka?

- Primer: Climeworks, Switzerland (pilot)
- CO₂ se kemično veže na aminske filtre
- CO₂ uporabimo v rastlinjakih
- 400 \$ na tono zajetega CO₂

Sintetična in bio-goriva

- Metanol in etanol direktno iz CO_2 in vode
- Uporabimo prenosni reaktor, kjer dobimo vodik iz alkohola ... ali
- uporabimo alkohol kot gorivo kar direktno
- Kemijo razumemo, tehnološko pa proces še ni primeren za širšo uporabo
- Biogoriva so etično sporna!

Industrijske zahteve za shranjevanje v avtomobilu

US DOE, 2006

- 4.5 masnih odstotkov
- Gostota 36 kg/m³
- Cena 200 \$ na kg vodika
- Temperaturno območje -20 - +50 °C
- Zdrži vsaj 500 ciklov
- Polnjenje v 10 minutah
- Izgube pod 1g vodika na uro
- Ustreza dolgemu seznamu varnostnih standardov

- Tekoči vodik
- Jeklenke pod pritiskom
- Fizisorbcija
- Kovinski hidridi
- Kompleksni hidridi

Tekoči vodik

- Vodik se utekočini pri 21 K pri zunanjem tlaku
- Potrebujemo energijo
- Vodik odpareva
- BMW Hydrogen 7
 - 2005-2007
 - Ima rezervoar za tekoči vodik
 - Motor z notranjim izgorevanjem (slab izkoristek)

Vodik v jeklenkah

- Visok pritisk – 700 barov in več
- Veliko energije za stiskanje
- Varnost, kaj menijo uporabniki?

National Fuel Cell Electric Vehicle targets

	2020	2023	2025	2028	2030
US	13 000	40 000			
Japan	40 000		200 000		800 000
France		5 000		20 000-50 000	
China	5 000		50 000		1 000 000
Netherlands	2 000				
Korea	10 000		100 000		630 000

National hydrogen fuelling station targets

	2020	2023	2025	2028	2030
US	80	100			
Japan	160		320		
France		100		400-1 000	
China	100		300		500
Germany	100		400		1 000
Korea	100		210		520

Toyota Mirai (2026)

- Tip: FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)
- Doseg: približno 402 milj EPA (≈ 647 km)
- Polnjenje: ~ 5 minut
- Cena (ZDA): od 51.795 USD (informativno)

Hyundai Nexo

- Tip: FCEV SUV
- Doseg: do 826 km (WLTP) pri novi generaciji
- Moč: 190 kW skupne sistemske moči
- Polnjenje: ~5 minut
- Cena (ZDA): od 57.000 USD (informativno)

Calendar year	South Korea ^[30]	U.S. ^[31]	Europe ^[32]	Global ^[33]
2018	727	8	92	949
2019	4,194	267	362	4,987
2020	5,786	208	468	6,781
2021	8,502	421	214	9,602
2022	10,164	408	572	10,527
2023	4,328	241	—	4,552
2024	2,751	93	11	2,774

Drugi avtomobili na vodik

- BMW iX5 Hydrogen
- Toyota Hilux Hydrogen
- Hyundai N Vision 74 (baterija in gorivna celica)
- Hyperion XP-1 (super športnik, omejena linija)
- Honda Clarity FCV (opuščena linija)

Table 6. Tank capacity, range, fuel consumption, and charging time of FCEVs [72].

Fuel Cell Electric Vehicle	Hydrogen Tank Capacity (kg)	Range (km)	Fuel Consumption (kg/km)	Charging Time at 70 MPa H ₂ Fueling Station (h)
Hyundai Nexo	6.33	756	0.0084	0.0833
Toyota Mirai	5.6	650	0.0076	0.0833

Table 10. CO₂ emissions for FCEVs considering fuel consumption.

FCEV	Biomass Gasification (gCO ₂ /km)	Gasification of Coal (gCO ₂ /km)	Grid-Powered Electrolysis (gCO ₂ /km)	Hydro-Powered Electrolysis (gCO ₂ /km)	Nuclear-Powered Electrolysis (gCO ₂ /km)	Solar-Powered Electrolysis (gCO ₂ /km)	Wind-Powered Electrolysis (gCO ₂ /km)	Steam Reforming of Natural Gas (gCO ₂ /km)
Hyundai Nexo	42	159.60	117.60	2.52	5.04	15.11	5.88	75.59
Toyota Mirai	38	144.40	106.40	2.28	4.56	13.68	5.32	68.40

Težka vozila

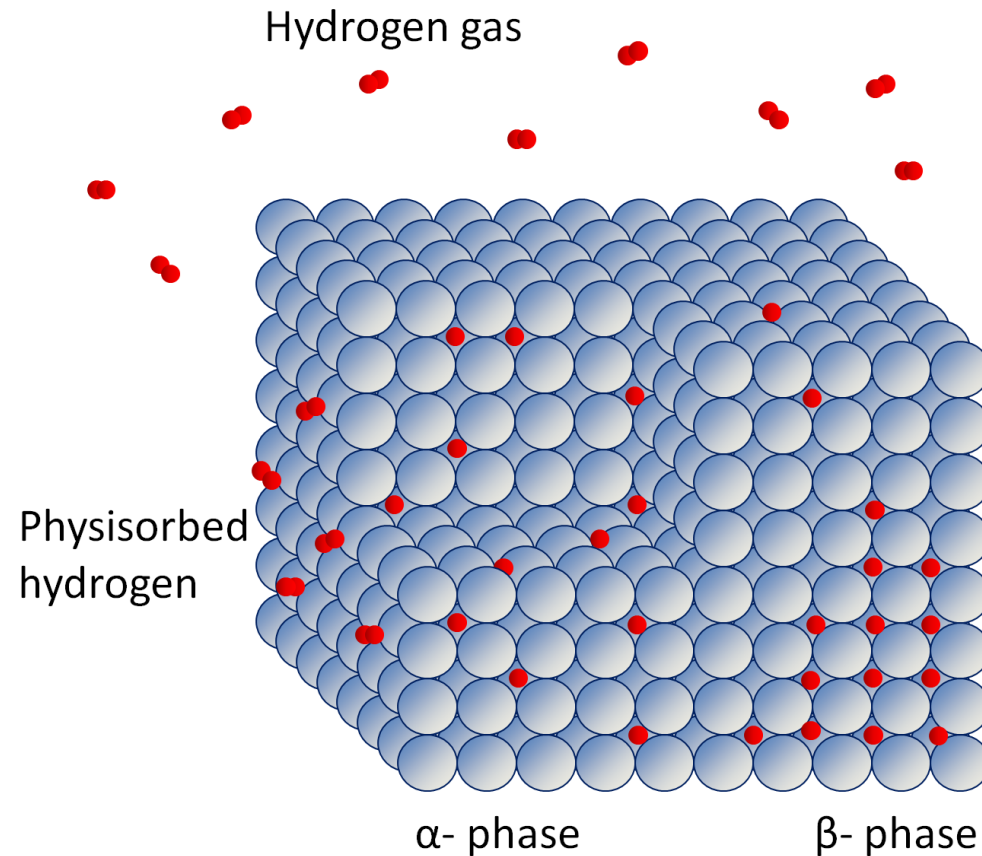
- Hyundai Xcient
- Viličarji
- Avtobusi (Mercedes Citaro)

Fizisorpcija

- Vodik se veže na stene poroznega materiala
- Ogljikove nanocевke, zeoliti, MOF
- Deluje dobro pri nizkih temperaturah, pri sobni pa ne

Kovinski hidridi

- Kovine “posrkajo” vodik
- Varno!
- Sprošča se čisti vodik
- Problemi:
 - Kovine so težke
(3-4 wt. % vodika)
 - Mehanske poškodbe materiala
- Izziv: sistem, ki bo absorbiral dovolj vodika in bo mehansko odporen, polnjenje in praznjenje pa bosta hitra



Kompleksni hidridi

- Vodik kemijsko vezan z lahkimi elementi, kot so Li, B, Al, Na
- LiBH_4 ima kar 20 wt. % vodika
- Vodik se sprošča prek kemijske reakcije

Izkoristek vodikovega cikla

1) Elektroliza (pretvorba elektrike v vodik)

- Izkoristek: **65–75 %**
- Izgube nastanejo zaradi toplote in omejene učinkovitosti elektrolizatorjev.

2) Stiskanje ali utekočinjanje vodika

- Stiskanje na 700 bar: **~10 % izgube**
- Utekočinjanje: **~30 % izgube**
- To je ena največjih slabosti vodika, saj je shranjevanje energetske drago.

3) Transport in skladiščenje

- Izkoristek: **90–95 %**
- Izgube zaradi uhajanja, prečrpavanja in ponovnega stiskanja.

4) Pretvorba nazaj v elektriko (gorivna celica)

- Izkoristek: **50–60 %**
- Gorivne celice so učinkovitejše od motorjev z notranjim izgorevanjem, a še vedno daleč pod baterijami.
- Ko se vse faze seštejejo, dobimo:
- **30–50 %** celotnega izkoristka vodikovega cikla (to potrjujejo analize učinkovitosti vodikovega energetskega cikla).
- To pomeni, da se **polovica do dve tretjini energije izgubi**.

Zakaj je to pomembno?

- Baterijski sistemi imajo tipično 80–90 % round-trip izkoristek, zato so za shranjevanje energije bistveno učinkovitejši.
- Vodik pa ima prednosti tam, kjer masa in doseg prevladujeta nad učinkovitostjo (tovorni promet, ladje, industrija).

Izzivi in omejitve

- Visoki začetni stroški elektrolizerjev in infrastrukture
- Potreba po velikih količinah obnovljive elektrike
- Nizka trenutna učinkovitost celotne verige (elektrika → vodik → uporaba)
- Potrebna je nadgradnja omrežja in skladiščnih kapacitet

Primeri uporabe zelenega vodika

- Industrija: proizvodnja jekla brez ogljika, amoniak, rafinerije
- Promet: težka vozila, avtobusi, ladje, letalstvo (v razvoju)
- Energetika: hranilnik energije, stabilizacija omrežja, sezonsko shranjevanje
- Gospodarstva: daljinsko ogrevanje, mešanje v plinovodna omrežja (omejeno)

Danska – Ørsted in projekt H2RES (2021)

- Proizvodnja zelenega vodika iz vetrnih elektrarn v Kopenhagenu.
- Elektrolizer 2 MW, integriran z obalnim vetrom.
- Vodik se uporablja za avtobuse in tovornjake v mestu.
- Primer učinkovite povezave OVE + mobilnost.

Vodikove doline

- Regije, kjer so povezani proizvodnja, distribucija in uporaba vodika
- Industrija (jeklarstvo, kemija) prehaja na zeleni vodik
- Velika vlaganja v infrastrukturo in standardizacijo
- Primer systemskega pristopa na (inter)nacionalni ravni

Vodikova dolina Severnega Jadrana (2023)

- Skupni projekt Slovenije, Hrvaške in Furlanije-Juljske krajine
- Uvajanje vodikovih avtobusov, tovornjakov in industrijskih aplikacij
- Razvoj proizvodnje in polnilne infrastrukture

Rotterdam *Hydrogen Hub*

- Največje evropsko pristanišče za uvoz in distribucijo vodika
- Povezava z industrijo, logistiko in energetiko
- Primer strateške infrastrukture za prihodnji trg vodika

HyDeal Ambition (Španija, 2020)

- Cilj: najveći evropski ekosistem zelenega vodika
- Proizvodnja iz sončne energije v južni Španiji
- Dolgoročne pogodbe z industrijo (jeklarne, kemija)
- Primer ekonomije obsega in stabilnih PPA pogodb

H2 Green Steel (Švedska)

- Prva jeklarna, ki uporablja izključno zeleni vodik
- Do 95 % manj emisij CO₂ v primerjavi s klasično proizvodnjo
- Primer preboja v sektorju, ki ga je težko razogljčiti

Odprta debata