



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
Zavod za mjerenja i automatsko vođenje procesa

LJUDI I PROCESI
Energija – dostupna, jeftina
i barem zelenkasta?

Proizvodnja zelenog vodika, izazovi, strategije vođenja i industrijska perspektiva

Doc. dr. sc. Srečko Herceg



25. rujna 2026.

Zeleni vodik

- Dostupan, jeftin, zelen?



<https://goenergylink.com/blog/what-is-hydrogen/> (pristup 22.9.2026.)



Appolinary Kalashnikova

Vodikov narativ i inženjerska stvarnost

- Bez emisija CO₂; čisto gorivo; energetska tranzicija
- Zeleni vodik se često predstavlja kao rješenje, međutim, inženjeri ne rade s rješenjima, njih zanimaju ograničenja
- Pitanje nije da li je vodik dobro rješenje, već pod kojim uvjetima može biti tehnički i ekonomski prihvatljiv



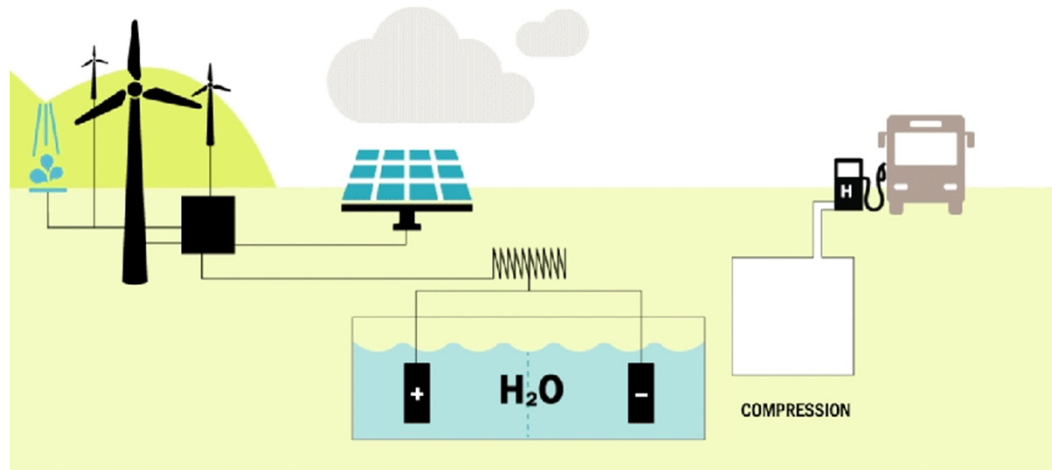
Trenutno stanje

- Globalna proizvodnja vodika obuhvaća otprilike 97 do 100 milijuna tona godišnje (2023–2024)
- Dominantno (oko 95 %) fosilnog porijekla (SMR)
- Glavni korisnici: rafinerije, kemijska industrija, metalurgija

DEKARBONIZACIJA → ? →



Tehnologija proizvodnje



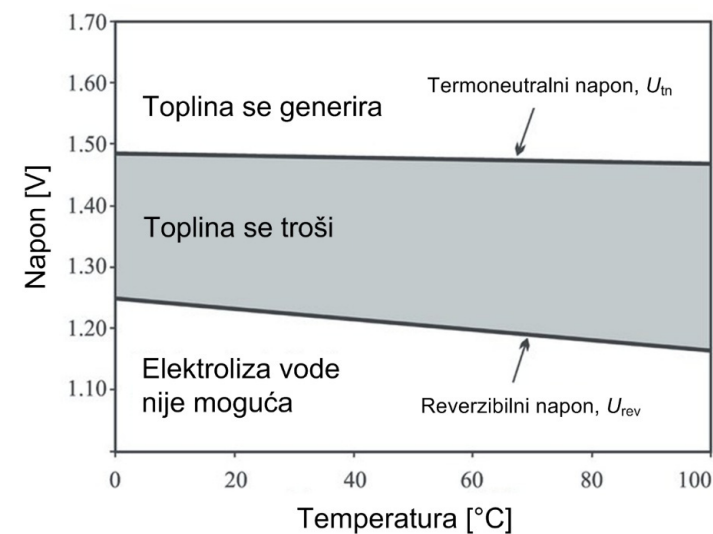
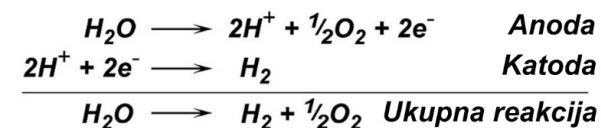
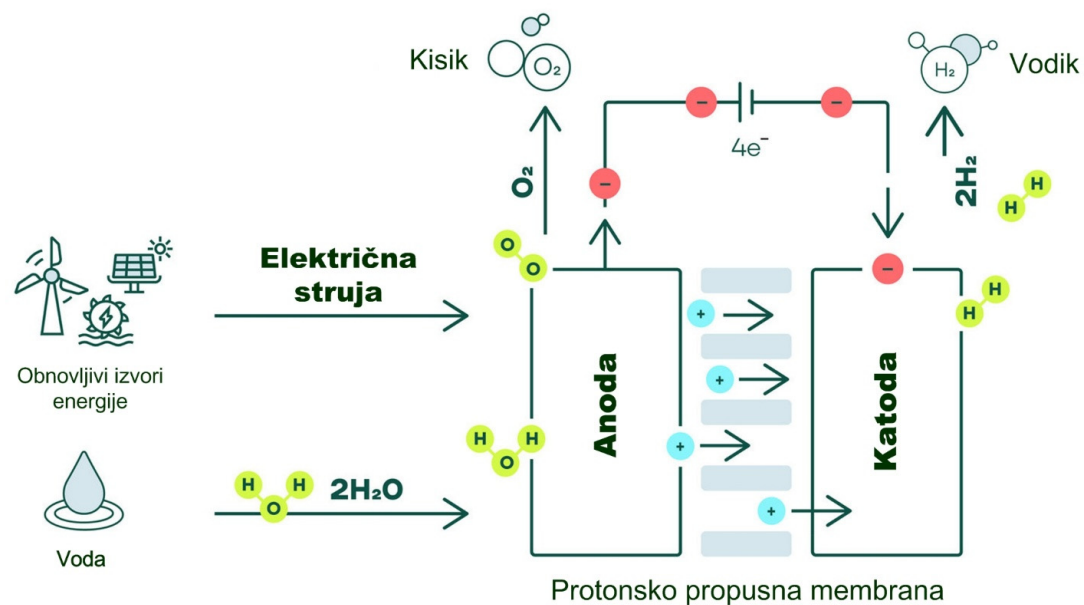
- Proizvodi se bez izravnog ugljičnog otiska
- Najčešće postupkom elektrolize vode ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$)

Elektroliza – tehnološka usporedba

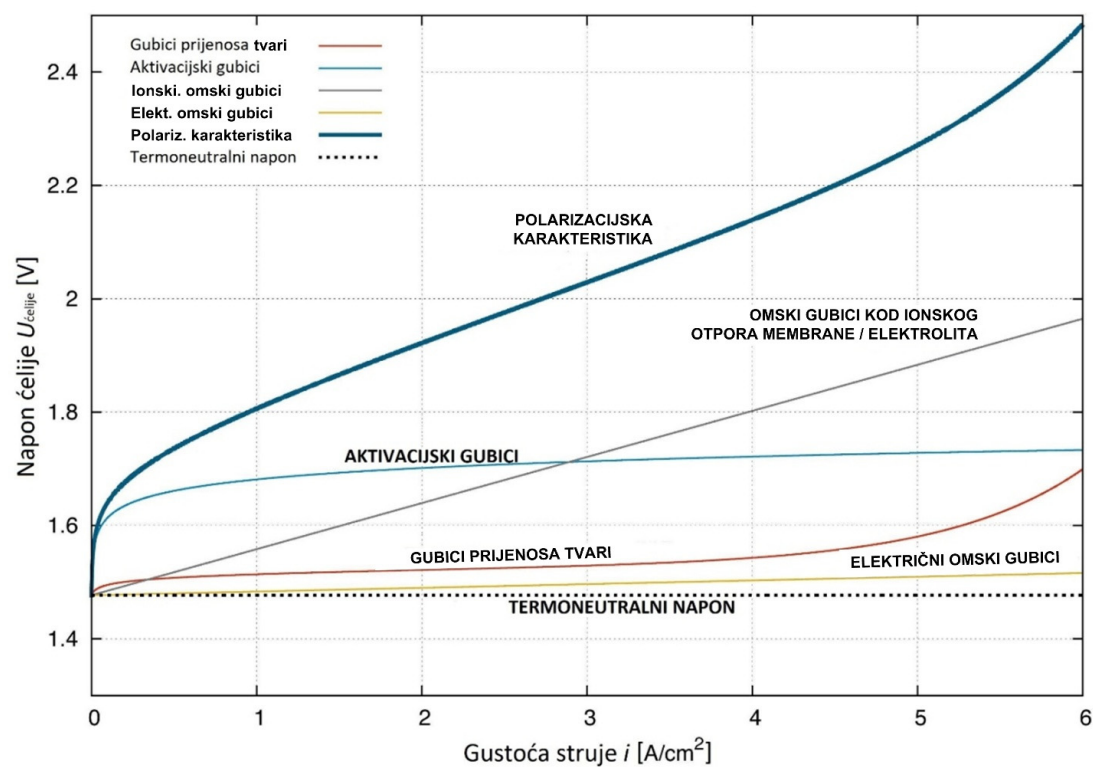
Tehnologija	Temperatura	Tehnološka zrelost	Učinkovitost	Status komercijalne primjene
Alkalna	60–90 °C	vrlo visoka	~60–70 %	široko primijenjena
PEM	50–80 °C	visoka	~70–80 %	ubrzano širenje
AEM	40–60 °C	umjerena / rana faza primjene	potencijalno 65–75 %	pretežno na pilot skali
SOE	700–850 °C	umjerena	potencijalno 80–90 %	pretežno na demonstracijskoj skali

- Ne postoji najbolja već prikladnija za određenu namjenu

Princip rada



Stvarni napon ćelije



$$U_{\text{ćelije}} = E_{\text{rev}} + \eta_{\text{act}} + \eta_{\text{dif}} + \eta_{\text{ohm}}$$

$U_{\text{ćelije}}$ – napon ćelije

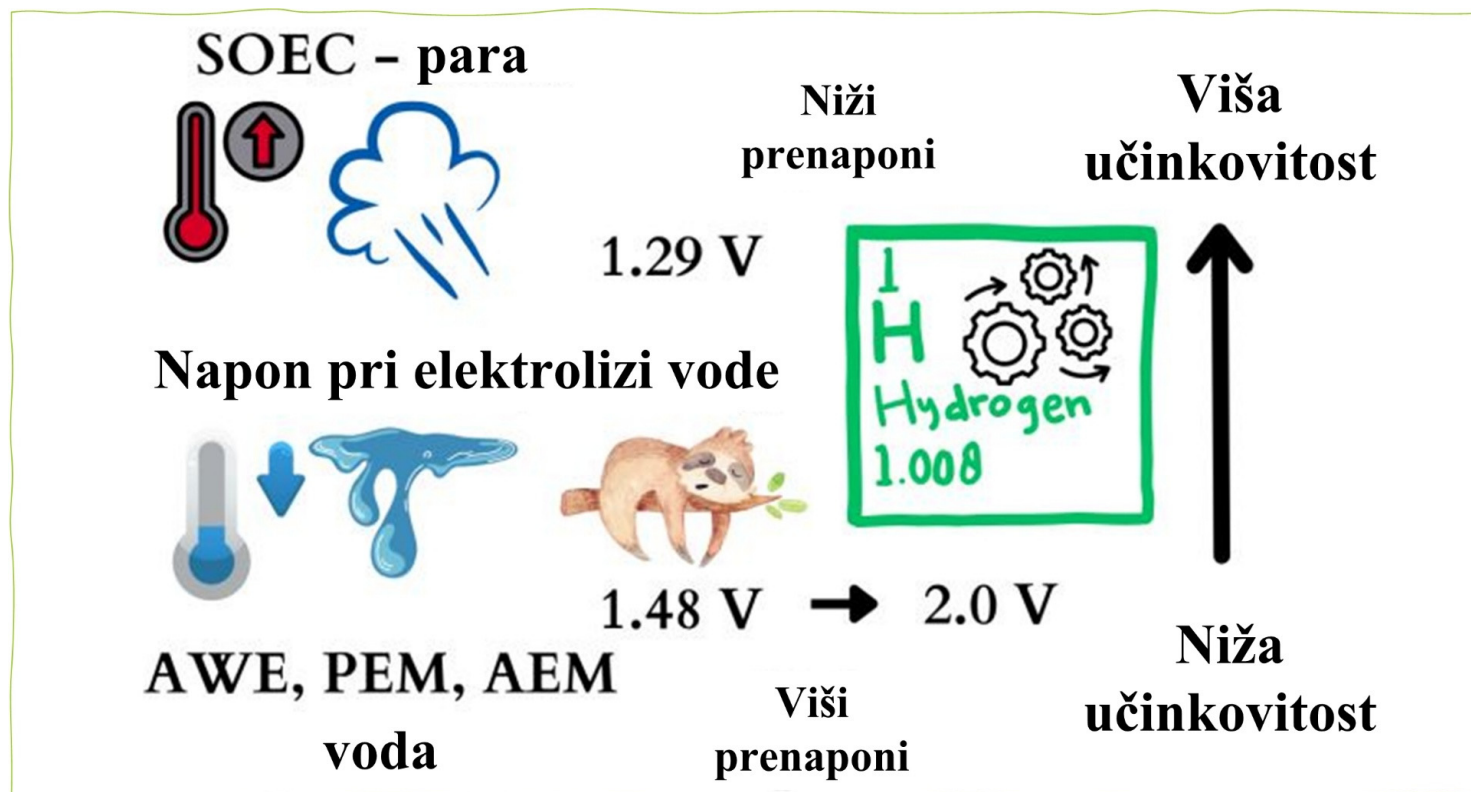
E_{rev} – reverzibilni napon

η_{act} – aktivacijski gubici

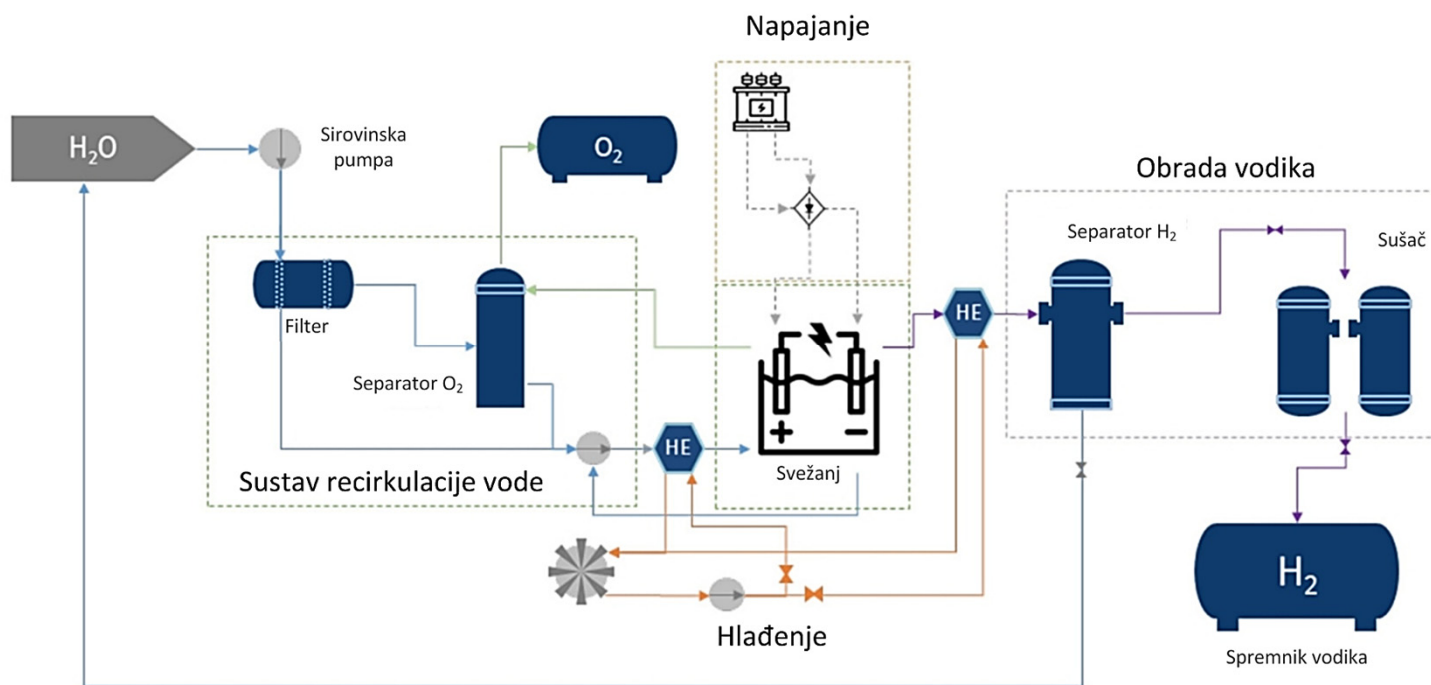
η_{dif} – gubici uslijed prijenosa tvari

η_{ohm} – omski gubici

Učinkovitost

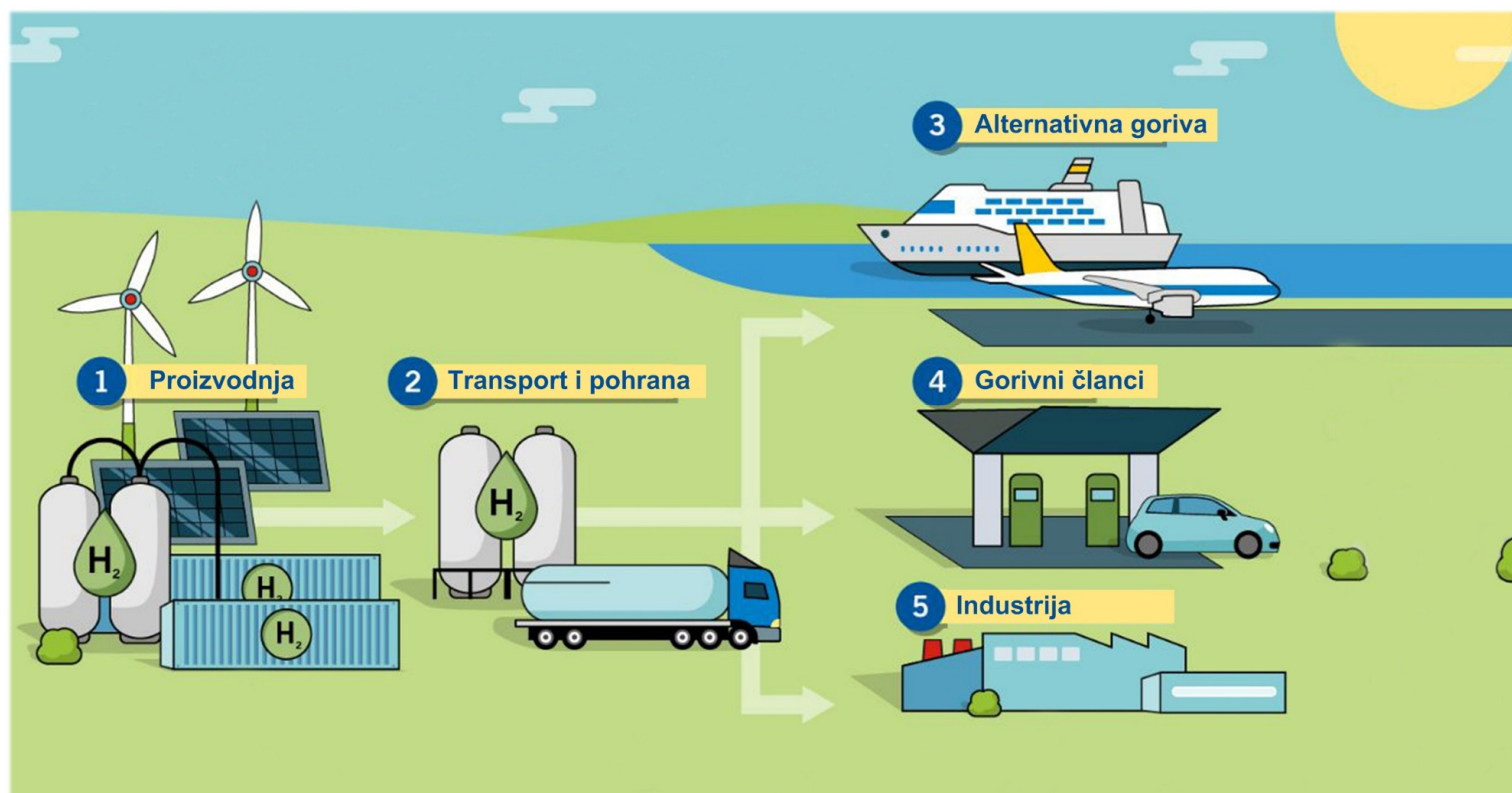


Od ćelije do postrojenja



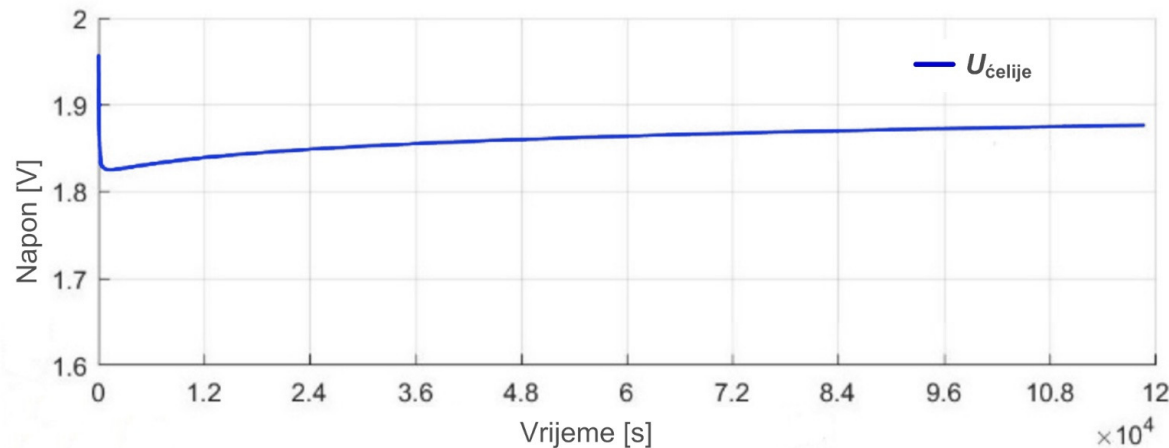
Balance of Plant (BoP)

Vodikov ekosustav



Strategije vođenja

- Kako stabilno voditi sustav u uvjetima stalne promjenjivosti?



$$Q_{H_2} \sim P_{ćelije}$$

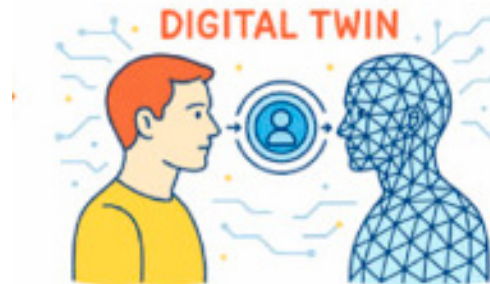
$$P_{ćelije} = U_{ćelije} \cdot I$$

prenaponi $\uparrow \Rightarrow U_{ćelije} \uparrow \Rightarrow \eta_{ćelije} \downarrow$

za istu proizvodnju vodika

Napredne strategije vođenja

- **MPC** $\Rightarrow$ optimalan rad pri promjenjivom opterećenju
- **Softverski senzori** $\Rightarrow$ procjena teško ili nemjerljivih procesnih veličina
- **Praćenje stanja i dijagnostika** $\Rightarrow$ prepoznavanje degradacije komponenti
- **Digitalni blizanci** $\Rightarrow$ povezivanje mjerenja, modela i optimiranja u stvarnom vremenu

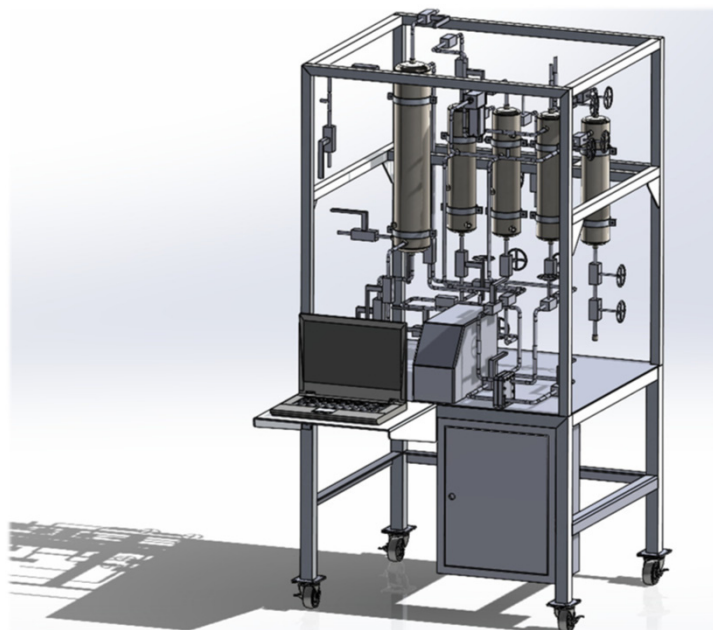


Sigurnost i regulativa

- Širok raspon zapaljivosti vodika (već od 4 % vol. u zraku)
- Curenje
- Vodikova krtost
- Korištenje opreme u protueksplozijskoj zaštiti (ATEX)
- Potrebni detektori, ventilacija
- Postrojenja se obično projektiraju prema važećim EU i ASME standardima s dodatkom posebnih propisa karakterističnih za svaki projekt
- Certifikacija proizvodnje je vrlo bitna

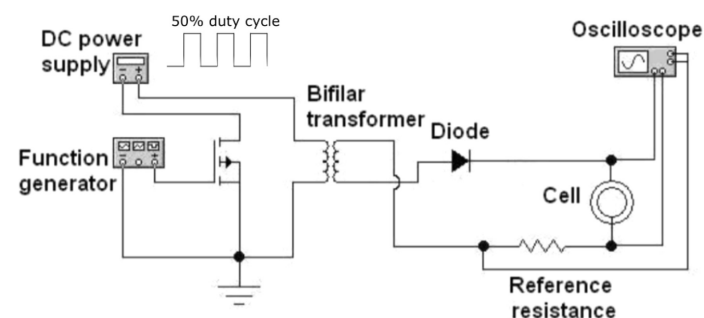
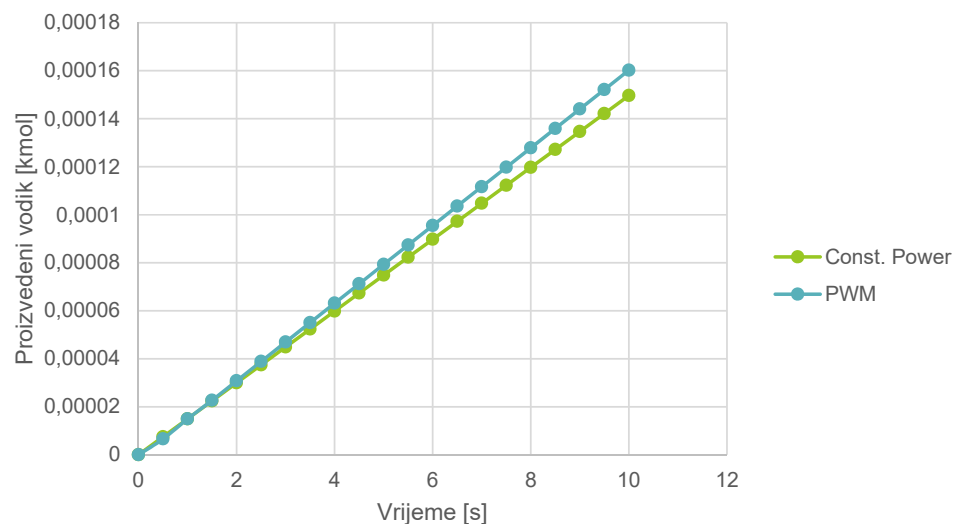


Lab. postrojenje za proizvodnju zelenog vodika temeljeno na AEM elektrolizi na Zavodu za mjerenja i automatsko vođenje procesa (UniZg FKIT)



Cilj istraživanja i rezultati

- Povećanje efikasnosti AEM elektrolize korištenjem tehnike modulacije širine pulsa (PWM)



@ 15 W; 1 bar; 20°C; 0,2 kHz; 50 %

Proizvedeni vodik [kmol]

	1 h	24 h	1 tjedan	1 mjesec	1 godina
sa PWM	0,0574	0,6889	4,822	19,29	231,5
bez PWM	0,0538	0,6464	4,525	18,10	217,2

➡ 7 % veća proizvodnja sa PWM-om

Što se događa u industriji?

- Od laboratorija prema stotinama megavata
- Polako se gasi „hype” $\Rightarrow$ industrija traži konkretna postrojenja velikih kapaciteta

1 MW $\Rightarrow$ 20 MW $\Rightarrow$ 100 MW $\Rightarrow$ 300 MW $\Rightarrow$ GW

- INA industrija nafte d.d. gradi postrojenje za proizvodnju zelenog vodika od **10 MW** (oko 1500 tona vodika godišnje)

Što se događa u industriji?

- RAG Austrija gradi postrojenje za proizvodnju zelenog vodika snage **12,5 MW**; puštanje se očekuje do kraja 2026.
- Španjolski Repsol gradi **100 MW** postrojenje unutar rafinerije Petronor; puštanje tijekom 2029.
- Austrijski OMV gradi postrojenje snage **140 MW** za proizvodnju zelenog vodika (dekarbonizacija rafinerije Schwechat); puštanje s krajem 2027.



<https://www.hydronews.it/en/rag-austria-and-andritz-are-starting-construction-of-a-125-mw-electrolysis-plant-in-gampern/?amp=1> (pristup 21.9.2026.)

<https://hydrogeneurope.eu/repsol-to-add-100-mw-green-h2-electrolyser-at-basque-country-refinery/> (pristup 21.9.2026.)

<https://fuelcellsworld.com/2026/07/13/news/omv-receives-eur-450-mn-loan-from-the-european-investment-bank-for-its-140-mw-green-hydrogen-production-facility> (pristup 20.9.2026.)

Što se događa u industriji?

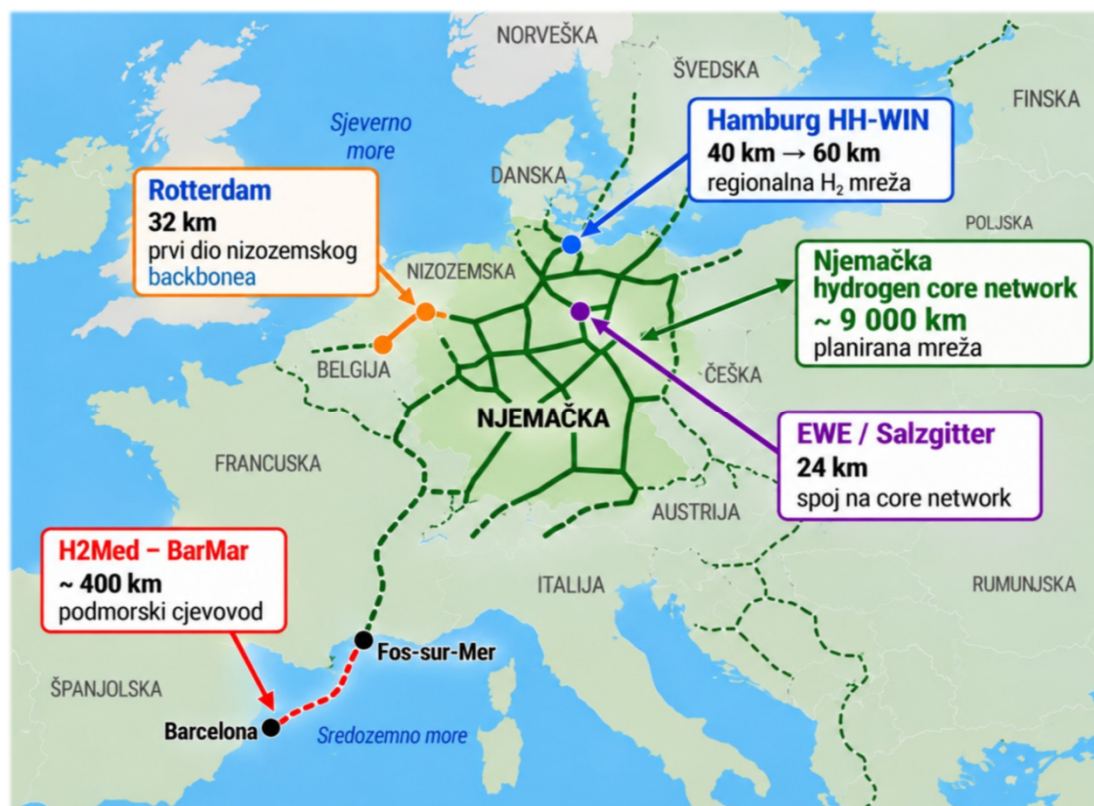
- Njemački RWE najavio je do početka 2027. isporuku zelenog vodika iz postrojenja snage **300 MW** za Evonikov kemijski kompleks u Marlu
- Danski Topsoe izabran kao licencor tehnologije za proizvodnju amonijaka u sklopu čega se gradi postrojenje za proizvodnju zelenog vodika od čak **4,4 GW** u Saudijskoj Arabiji

<https://www.hydrogeninsight.com/production/rwe-delivers-first-hydrogen-from-flagship-german-green-h-plant/2-1-2024412> (pristup 21.9.2026.)

<https://www.hydrogeninsight.com/production/acwa-s-second-multi-gigawatt-green-hydrogen-project-in-saudi-arabia-will-be-built-in-three-phases/2-1-1999437> (pristup 22.9.2026.)



Od proizvodnje preko transporta do skladištenja



Postojeća i planirana H₂ infrastruktura (odabrani projekti)

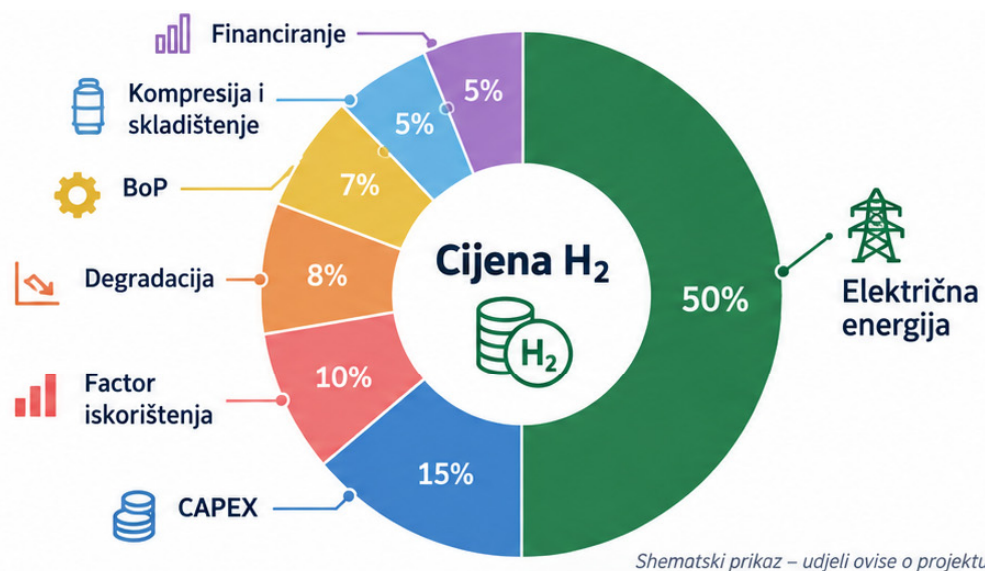
- Njemačka hydrogen core network (planirano, ~ 9 000 km)
- Nizozemski backbone (prvi dio, 32 km)
- HH-WIN Hamburg (40 km → 60 km)
- - - H2Med – BarMar (podmorski cjevovod, ~ 400 km)
- EWE H₂CoastLink 1 (24 km)
- - - Ostali planirani H₂ cjevovodi (EU)

<https://hydrogeneurope.eu/german-dutch-gas-operators-agree-framework-for-cross-border-hydrogen-pipelines/> (pristup 23.9.2026.)

<https://www.hydrogeninsight.com/production/rwe-delivers-first-hydrogen-from-flagship-german-green-h-plant/2-1-2024412> (pristup 21.9.2026.)

<https://www.gasworld.com/story/consultations-for-400km-france-spain-subsea-hydrogen-pipeline-launched/2248929.article/> (pristup 23.9.2026.)

Ekonomija i industrijska realnost



- Električna energija često dominira OPEX-om, ali konačnu cijenu određuje cijeli sustav

$$\text{Cijena H}_2 = \text{električna energija} + \text{CAPEX} + \text{factor iskorištenja} + \text{degradacija} + \text{BoP} + \text{kompresija/skladištenje} + \text{financiranje}$$

Kako do tržišne konkurentnosti?

- Još uvijek je za mnoge projekte potrebna javna potpora s ciljem cijene H₂ prihvatljive na tržištu (od oko **10 eur/kg** i manje)
- Europska banka vodika u okviru EK odobrila je početkom ove godine potpore vrijedne **1,09** milijardi eura za više projekata
- EK samo Njemačkoj odobrila **1,3** milijarde eura potpore tijekom ove godine
- Italija priprema program državnih potpora od po **400** mil. eura godišnje
- Europska investicijska banka dodijelila je aust. OMV-u kredit od **450** mil. eura za projekt postrojenja zelenog vodika snage 140 MW

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_26_1004 (pristup 21.9.2026.)

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_26_1096 (pristup 21.9.2026.)

<https://fuelcellsworks.com/2026/08/11/green-investment/italy-to-launch-400-million-a-year-green-and-bio-hydrogen-auctions> (pristup 21.9.2026.)

<https://fuelcellsworks.com/2026/07/13/news/omv-receives-eur-450-mn-loan-from-the-european-investment-bank-for-its-140-mw-green-hydrogen-production-facility> (pristup 21.9.2026.)

Što zapravo određuje uspjeh zelenog vodika?



Zaključak

- Zeleni vodik je obećavajuća komponenta energetske tranzicije, ali nije univerzalno rješenje
- Elektroliza je tehnološki zrela, ali implementacija zahtijeva cijeli procesni sustav
- Fleksibilan rad s obnovljivim izvorima čini modeliranje i vođenje procesa sve važnijima
- Uspjeh neće odrediti samo učinkovitija tehnologija nego siguran, pouzdan i ekonomski održiv cijeli lanac
- Kemijski inženjeri imaju središnju ulogu u prijenosu vodikovih tehnologija iz laboratorija u industriju

Hvala na pozornosti