

# Tehnologije i materijali za skladištenje vodonika: napredak, izazovi i putevi ka održivoj vodoničnoj ekonomiji

KRISTINA N. RADINOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,  
Fakultet za fizičku hemiju, Beograd  
ORCID: 0000-0003-3404-5760

Pregledni rad  
UDC: 620.118:661.96  
DOI: 10.5937/tehnika2603221R

PEDRO BRANCO, Univerzitet u Lisabonu  
Viši tehnički institut, Lisabon Portugalija  
NEVENA M. MILUTINOVIĆ MEHRI, Institut za opštu i  
fizičku hemiju, Beograd  
ORCID: 0009-0003-7225-8588

DAVID M. TOMIĆ, Univerzitet u Beogradu,  
Fakultet za fizičku hemiju, Beograd  
ORCID: 0009-0008-7046-9652

DUŠAN D. MLADENović, Univerzitet u Beogradu,  
Fakultet za fizičku hemiju, Beograd  
ORCID: 0000-0003-4362-7324

JADRANKA N. MILIKIĆ, Univerzitet u Beogradu  
Fakultet za fizičku hemiju, Beograd  
ORCID: 0000-0003-2266-6738

BILJANA R. ŠLJUKIĆ, Univerzitet u Beogradu,  
Fakultet za fizičku hemiju, Beograd  
ORCID: 0000-0003-0203-4012

*Vodonik, sa svojom visokom gravimetrijskom gustom energije ( $\approx 120 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) i bez emisije ugljen dioksida pri sagorevanju ili elektrohemijskoj oksidaciji, predstavlja ključni element za dekarbonizaciju i integraciju obnovljivih izvora energije. Međutim, njegova niska volumetrijska gustina pri ambijentalnim uslovima ( $0,0899 \text{ kg m}^{-3}$ ) zahteva efikasna, bezbedna i ekonomski prihvatljiva rešenja za skladištenje. Ovaj pregledni rad obuhvata najnovija dostignuća u metodama za fizičko skladištenje, skladištenje u čvrstom stanju i geološkom skladištenju vodonika, oslanjajući se na razvoj nauke o materijalima i tehno-ekonomske procene. Poseban akcenat stavljen je na kompromise između gravimetrijskih/volumetrijskih gustina, efikasnosti, nivoa tehnološke razvijenosti i mogućnosti primene u velikim razmerama, kako bi se usmerio izbor tehnologije za primene u transportu, industriji i mrežnim sistemima.*

**Ključne reči:** skladištenje vodonika, fizičke metode za skladištenje vodonika; napredni materijali; geološko skladištenje vodonika

## 1. UVOD

Skladištenje vodonika, tj. čuvanje vodonika u stanju u kom se može dalje koristiti, predstavlja jedan

od ključnih koraka u integraciji sistema obnovljivih izvora energije. Skladištenje vodonika omogućava odvajanje proizvodnje električne energije od perioda korišćenja, smanjujući potrebu za odbacivanjem solarne i energije vetra i eliminišući potrebu za rezervnim sistemima zasnovanim na fosilnim gorivima [1, 2]. Kombinacija proizvodnje zelenog vodonika zasnovane na elektrolizi sa rešenjima za skladištenje dovodi do indirektnog smanjenja emisije ugljen dioksida, prvenstveno u transportu i industriji, kao i u primenama

---

Adresa autora: Kristina Radinović, Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, Beograd, Studentski trg 12-16

e-mail: kristina.radinovic@ffh.bg.ac.rs

Rad primljen: 09.06.2026.

Rad prihvaćen: 12.06.2026.

balansiranja mreže [3]. Geološki sistemi za skladištenje omogućavaju sezonsko balansiranje energije uz minimalan uticaj na integraciju sistema sa visokim udelom obnovljivih izvora. Operativne emisije sistema za skladištenje vodonika, uključujući metalne hidride i slane pećine, ostaju niske, a njihovi zahtevi za zemljištem su minimalni u poređenju sa pumpnim hidro-sistemima i velikim baterijskim skladištima [4].

## 2. METODE SKLADIŠTENJA VODONIKA

Metode skladištenja vodonika uključuju fizičke metode skladištenja, skladištenje u čvrstom stanju i geološko skladištenje.



Slika 1 - Pregled metoda za skladištenje vodonika

### 2.1 Fizičke metode skladištenja vodonika

Fizičke metode skladištenja vodonika podrazumevaju kompresiju vodonika ili njegovo prevođenje u tečno stanje, ili kombinaciju ova dva procesa [5].

Skladištenje vodonika u vidu komprimovanog gasa (eng. Compressed Hydrogen Gas, CGH<sub>2</sub>) predstavlja najrazvijeniju tehnologiju za primene u transportu i decentralizovanim sistemima. Vodonik se skladišti u kompozitnim posudama tipa I - IV ojačanim ugljeničnim vlaknima pod pritiscima od 350 (za primenu u industriji) do 700 bar (za primenu u transportu). Posude tipa IV karakteriše dobar odnos jačine i mase. CGH<sub>2</sub> metoda omogućava brzo punjenje (< 3–5 min, slično brzini punjenja benzina), niske energetske gubitke pri pražnjenju (7–12%) i konkurentne investicione troškove (500 - 1.000 € kg<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>, videti u nastavku). Volumetrijska gustina dostiže ≈40 g L<sup>-1</sup> na 700 bar, iako energija kompresije troši 10–18% donje toplotne vrednosti vodonika. Ograničenja uključuju masu posuda, zahteve za bezbednošću pri visokom pritisku i umerene vrednosti gravimetrijskog kapaciteta skladištenja vodonika [1].

Skladištenje vodonika u vidu tečnog vodonika na kriogenim temperaturama (eng. Liquefield Cryogenic Hydrogen, LH<sub>2</sub>) je ustaljeno u svemirskim tehnologijama i u teškom transportu (vozila za prenos kabaste i teške robe). LH<sub>2</sub> se skladišti na temperaturama nižim

od 20 K (-253°C) i ima veću gustinu energije od 8,5 MJ L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub> i veću volumetrijsku gustinu (≈70,8 g L<sup>-1</sup>). Međutim, proces prevođenja vodonika u tečno stanje troši 30–40% energije uskladištenog vodonika, što dovodi do visokih operativnih troškova, značajnih gubitaka usled isparavanja vodonika (1–3% dnevno bez napredne izolacije) i složene infrastrukture za održavanje kriogenih uslova [3].

Skladištenje vodonika u vidu kriokomprimovanog vodonika se još uvek nalazi u predkomercijalnoj fazi. Ovaj metod kombinuje umerene pritiske (≈350 bar) sa kriogenim temperaturama (20–70 K), postižući gustine do 80 g L<sup>-1</sup> uz smanjene gubitke isparavanja u odnosu na LH<sub>2</sub>. Ovaj hibridni pristup povećava period mirovanja i efikasnost sistema, ali zahteva napredne materijale i termičko upravljanje [6].

### 2.2 Skladištenje vodonika u čvrstom stanju

Skladištenje vodonika u čvrstom stanju podrazumeva njegovu hemijsku ili fizičku adsorpciju na nosaču i njegovo oslobađanje (desorpciju) po potrebi. Materijali koji se koriste kao nosači uključuju hidride metala, jedinjenja na bazi amonijaka, metalorganske mreže, ugljenične materijale, kovalentne organske mreže, itd. (slika 2).

Metalni hidridi - Metali poput magnezijuma i legure poput lantan-nikla grade hidride putem adsorpcije vodonika pri pritiscima i temperaturama bliskim ambijentalnim uslovima, čime se povećava bezbednost. Ovaj proces građenja hidrida i skladištenja vodonika je reverzibilan. Uz to, obezbeđuje visoke volumetrijske gustine (npr. do 110 g L<sup>-1</sup> u slučaju FeTiH<sub>2</sub>) i gravimetrijski kapacitet od 1–7 težinskih % (više kod kompleksnih hidrida poput NaAlH<sub>4</sub>), uz umerenu stabilnost cikliranja. Izazovi uključuju termičko upravljanje (adsorpcija predstavlja egzotermni proces, dok desorpcija predstavlja endotermni proces), sporu kinetiku i srednji nivo tehnološke razvijenosti, što ih ograničava uglavnom na stacionarne ili specijalizovane prenosive primene [7].

Hemijski hidridi poput natrijum borhidrida i amonijum borana mogu da oslobađaju vodonik u kontrolisanim ireverzibilnim hemijskim procesima, obično hidrolizom ili termolizom. Imaju visok sadržaj vodonika do najviše 10–11 težinski % i idealni su za gusto skladištenje vodonika u transportne i prenosive svrhe [8]. Ipak, njihova praktična primena je ograničena ireverzibilnošću reakcija i komplikovanom regeneracijom/reciklažom borhidrida iz nastalih borata ili drugih inertnih ostataka. Naime, regeneracija borhidrida obično zahteva visoku temperaturu, primenu jakih redukcionih sredstava i visok utrošak energije, što povećava troškove životnog ciklusa, a efikasnost sistema je niska [9]. Štaviše, bezbedno rukovanje prekursorima hidrida i nusproizvodima predstavlja ekološka i ope-

rativna pitanja, posebno u decentralizovanim ili potrošačkim primenama. Iako su studije o katalitičkoj regeneraciji i hidridnim sistemima zatvorene petlje u toku, trenutne implementacije su ograničene na specijalizovane ili pilot primene.

Tečni organski nosači vodonika (eng. Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOHC), kao što su dibenziltoluen ili metilcikloheksan, omogućavaju adsorpciju/desorpciju vodonika kroz reverzibilne katalitičke reakcije hidrogenacije/dehidrogenacije. Karakteriše ih srednja gustina od oko 6–7 wt% H<sub>2</sub>, ili 47–56 g L<sup>-1</sup>. U tečnom stanju su pri ambijentalnim uslovima, te su kompatibilni sa postojećom infrastrukturom za tečna fosilna goriva. Međutim, efikasnost ciklusa je niska (obično < 40%) usled ≈ 50% energetskih gubitaka, uglavnom usled endotermne dehidrogenacije na

250–300°C, a troškovi - predstavljaju prepreku. LOHC su posebno perspektivni za transport vodonika na veće distance (usled spomenute kompatibilnosti za već postojećom infrastrukturom za fosilna goriva) i sezonsko skladištenje [1, 10].

Porozni adsorbenti (metalorganske mreže, eng. metal organic frameworks, MOF), aktivni ugalj, kovalentne organske mreže (eng. covalent organic frameworks, COF) koriste fizisorpciju, postizujući značajne kapacitete na 77 K (do 7–10 wt% kod naprednih MOF), ali trpe značajan pad performansi na sobnoj temperaturi zbog slabih van der Valsovih interakcija [11]. Aktuelna istraživanja se fokusiraju na mehanizme preliivanja (eng. spillover), dopiranje metalima i formiranje nanostrukture radi poboljšanja performansi na ambijentalnoj temperaturi [12].



Slika 2 - Pregled materijala za skladištenje vodonika u čvrstom stanju

Elektrohemijsko skladištenje vodonika, iako nije primarni fokus ovde, nudi blage uslove preko reverzibilnog formiranja hidrida u legurama, ugljenicima i mešovitim metalnim oksidima, sa potencijalom za integrisane „Power-to-Hydrogen“ sisteme; međutim, kapaciteti i trajnost ciklusa još uvek zahtevaju značajna poboljšanja da bi se dostigli DOE ciljevi.

### 2.3 Geološko skladištenje vodonika

Podzemno (visokokapacitetno) skladištenje vodonika u slanim pećinama, iscrpljenim ležištima ili presušanim vodotokovima pruža najveće kapacitete i najniže troškove za sezonsko/mrežno balansiranje. Slane pećine se odlikuju veoma visokim gustinama skladištenja vodonika, gubicima energije manjim od

5%, veoma niskim operativnim troškovima i punom razvijenošću, sa investicionim troškovima od 10-30 € kg<sup>-1</sup> H<sub>2</sub> na velikoj skali. Izazovi uključuju specifičnost geoloških lokacija i održavanje čistoće vodonika u poroznim medijima [13].

### 3. KOMPARATIVNA ANALIZA TEHNOLOGIJA SKLADIŠTENJA VODONIKA

Tehnologije skladištenja vodonika pokazuju jasne kompromise u gravimetrijskim i volumetrijskim gustinama, energetskoj efikasnosti, tehnološkoj razvijenosti i pogodnosti primene. Skladištenje komprimovanog gasa, iako tehnološki usavršeno i široko primenjeno u transportu i industriji, karakteriše se niskom gravimetrijskom gustinom uprkos veoma visokoj volumetrijskoj gustini i efikasnosti. Tečni vodonik nudi urav-

notežene srednje gravimetrijske i volumetrijske gustine sa umerenom efikasnošću, što podržava njegovu ustaljenu upotrebu u svemirskim tehnologijama i teškom transportu. Metalni hidridi postižu visoke gravimetrijske gustine (do 10 težinskih %) i visoke volumetrijske gustine, iako sa umerenom efikasnošću i samo srednjim nivoom razvijenosti, što ih čini prvenstveno pogodnim za stacionarno skladištenje. Tečni organski nosači vodonika pružaju srednje gustine, ali odlikuju se niskom efikasnošću te su i dalje u fazi razvoja, što ih pozicionira za buduće primene u transportu i mrežama za snabdevanje. Nasuprot tome, geološko skladištenje se ističe veoma visokim gravimetrijskim i volumetrijskim gustinama, visokom efikasnošću i visokim stepenom razvijenosti, što ga čini posebno pogodnim za sezonsko skladištenje energije velikih razmera i na nivou mreže [1, 4, 14].

Ekonomska isplativost značajno zavisi od izabrane tehnologije i primene, tj. od razmere: komprimovani gas će se koristiti za distributivne mreže, geološko za masovno skladištenje, itd. Finalnoj ceni skladištenja vodonika doprinose investicioni troškovi (eng. Capital Expenses, CapEx) i operativni troškovi (Operating Expenses, OpEx). Prva kategorija troškova obuhvata ulaganja u, npr. posude pod pritiskom, kompresore, kriogene sisteme, izolaciju, ili podzemnu infrastrukturu. Druga kategorija troškova obuhvata gubitke energije (npr. za kompresiju vodonika ili prevođenje vodonika u tečno stanje), održavanje, bezbednosne sisteme ili troškove usled degradacije materijala. Nivelisani troškovi skladištenja vodonika (eng. Levelized Cost of Hydrogen Storage, LCOHS) predstavljaju ukupne troškove po jedinici skladištenog vodonika tokom operativnog perioda sistema i zavise od investicionih troškova, životnog veka i kapaciteta skladištenja vodonika datog sistema, kao i gubitaka energije. LCOHS su najniži u slučaju slanih pećina ( $0,2 - 1,0 \text{ € kg}^{-1} \text{ H}_2$ ) u poređenju sa npr. Komprimovanim gasom ( $3,5 - 6,0 \text{ € kg}^{-1} \text{ H}_2$ ) i LOHC ( $5,0 - 8,0 \text{ € kg}^{-1} \text{ H}_2$ ) [4,14,15].

Skladištenje komprimovanog gasa na 700 bar pokazuje najkonkurentnije investicione troškove ( $500 - 1.000 \text{ € kg}^{-1} \text{ H}_2$ ), u kombinaciji sa niskim operativnim troškovima i relativno malim gubicima energije (7–12%), što ga čini atraktivnim za decentralizovane i primene u transportu. Nasuprot tome, tečni vodonik zahteva znatno više investicija ( $1.200 - 2.000 \text{ € kg}^{-1} \text{ H}_2$ ) i podrazumeva visoke operativne troškove, zajedno sa značajnim gubicima energije (30–40%), prvenstveno zbog energetske potreba procesa prevođenja vodonika u tečno stanje. Tečni organski nosači vodonika i metalni hidridi pokazuju veće raspone investicionih troškova ( $1.000 - 2.500$  i  $1.500 - 3.000 \text{ € kg}^{-1} \text{ H}_2$ , redom) sa srednjim operativnim troškovima, dok gubici energije ostaju značajni ( $\approx 50\%$  za LOHC i

$15 - 20\%$  za metalne hidride). Geološko skladištenje u slanim pećinama ističe se kao najisplativija opcija velikih razmera, sa izuzetno niskim investicionim troškovima ( $10 - 30 \text{ € kg}^{-1} \text{ H}_2$ ), veoma niskim operativnim troškovima i minimalnim gubicima energije ( $<5\%$ ), što ga pozicionira kao preferirano rešenje za sezonsko i mrežno skladištenje vodonika [1, 13, 14, 15].

Sve navedene razlike naglašavaju potrebu za izborom tehnologije i materijala za skladištenje vodonika na osnovu specifičnih zahteva krajnje upotrebe, pri čemu se aktuelna istraživanja fokusiraju na prevazilaženje problema efikasnosti i mogućnosti šire primene.

#### 4. PRIMENE I INTEGRACIJA U ENERGETSKE SISTEME

Skladištenje vodonika omogućava proizvodnju gasa iz električne energije („Power-to-Gas“), sektorsko spajanje i stabilizaciju obnovljivih izvora. Integracija sa elektrolizerima i gorivnim ćelijama povećava fleksibilnost i otpornost celog sistema. U transportu, u vozilima sa gorivnim ćelijama se koriste CGH<sub>2</sub> i LOHC; industrija koristi podzemne rezervoare velikih razmera; mreže koriste geološko skladištenje i LOHC za sezonsko balansiranje [16, 17].

#### 5. ZAKLJUČAK

Tehnologije skladištenja vodonika značajno se razlikuju u pogledu kapaciteta skladištenja, energetske efikasnosti, troškova i tehnološke razvijenosti. – vodonik trenutno predstavlja najefikasnije rešenje za transportne i decentralizovane primene, dok tečni vodonik omogućava veće volumetrijske gustine skladištenja uz veće energetske gubitke i troškove.

Skladištenje u čvrstom stanju pruža mogućnost postizanja visokih kapaciteta skladištenja i povećane bezbednosti, ali još uvek zahteva dalji razvoj materijala i procesa. Geološko skladištenje se izdvaja kao najpogodnije rešenje za skladištenje velikih količina vodonika zbog visokog kapaciteta, niskih troškova i male potrošnje energije. Izbor odgovarajuće tehnologije zavisi od zahteva konkretne primene, pri čemu će skladištenje vodonika imati važnu ulogu u integraciji obnovljivih izvora energije i razvoju održivih energetske sistema.

#### 6. ZAHVALNICA

Autori bi želeli da zahvale Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije za finansijsku podršku (Ugovor br. 451-03-33/2026-03/200051, 451-03-33/2026-03/200146 i 451-03-34/2026-03/200146).

## LITERATURA

- [1] IEA – International Energy Agency. The future of hydrogen: Seizing today's opportunities, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, 2019
- [2] Crabtree GW, Dresselhaus MS. The Hydrogen Fuel Alternative, *Physics Today*, Vol. 57, No. 12, pp. 39–44, <https://doi.org/10.1063/1.1830049>, 2004.
- [3] Staffell I, Scamman D, Velazquez Abad A, Balcombe P, Dodds PE, Ekins P, Shah N, Ward KR. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system, *Energy & Environmental Science*, Vol. 12, No. 2, pp. 463–491, <https://doi.org/10.1039/C8-EE01157E>, 2019
- [4] European Environment Agency (EEA). Hydrogen storage and the energy system, <https://www.eea.europa.eu>, 2023.
- [5] Barthelémy H, Weber M, Barbarin J. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 11, pp. 7254–7262, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.147>, 2017
- [6] Yürüm Y, et al. Hydrogen storage technology and its challenges: A review, *Catalysts*, Vol. 13, No. 3, 260, <https://www.mdpi.com/2073-4343/13/3/260>, 2023
- [7] Züttel A. Materials for Hydrogen Storage, *Materials Today*, Vol. 6, No. 9, pp. 24–33, [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(03\)00922-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(03)00922-2), 2003.
- [8] Eberle U, Felderhoff M, Schüth F. Chemical and Physical Solutions for Hydrogen Storage, *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 48, No. 36, pp. 6608–6630, <https://doi.org/10.1002/anie.200806293>, 2009
- [9] Schlapbach L, Züttel A. Hydrogen-storage materials for mobile applications, *Nature*, Vol. 414, No. 6861, pp. 353–358, <https://doi.org/10.1038/35104634>, 2001.
- [10] Preuster P, Papp C, Wasserscheid P. Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs): Toward a Hydrogen-free Hydrogen Economy, *Accounts of Chemical Research*, Vol. 50, No. 1, pp. 74–85, <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00474>, 2017.
- [11] Zelenák V, Saldan I. Factors Affecting Hydrogen Adsorption in Metal–Organic Frameworks: A Short Review, *Nanomaterials*, Vol. 11, No. 7, 1638, <https://doi.org/10.3390/nano11071638>, 2021.
- [12] Broom DP, Webb CJ, Hurst KE, Parilla PA, Gennett T, Brown CM, Zacharia R, Tylianakis E, Klontzas E, Froudakis GE, Steriotis TA, Trikalitis PN, Anton DL, Hardy B, Tamburello D, Corgnale C, van Hassel B, Cossement D, Chahine R, Hirscher M. Outlook and challenges for hydrogen storage in nanoporous materials, *Applied Physics A*, Vol. 122, 151, <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9651-4>, 2016
- [13] Caglayan D. G, Weber N, Heinrichs H. U, Linßen J, Robinius M, Kukla PA, Stolten D. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 11, pp. 6793–6805, 2020.
- [14] Heinrichs H, Linßen J, Caglayan DG, Robinius M, Stolten D. Hydrogen Storage for Mobility and Energy Systems: Review and Outlook, *Energy Technology*, Vol. 9, 2100628, <https://doi.org/10.1002/ente.202100628>, 2021.
- [15] Ozarslan A. Large-scale hydrogen energy storage in salt caverns, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 19, pp. 14265–14277, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.111>, 2012.
- [16] Buttler A, Spliethoff H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 2440–2454, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>, 2018
- [17] Loschan C, Schwabeneder D, Maldet M, Lettner G, Auer H. Hydrogen as Short-Term Flexibility and Seasonal Storage in a Sector-Coupled Electricity Market, *Energies*, Vol. 16, No. 14, 5333, 2023.

## SUMMARY

### HYDROGEN STORAGE TECHNOLOGIES AND MATERIALS: PROGRESS, CHALLENGES, AND PATHS TOWARDS A SUSTAINABLE HYDROGEN ECONOMY

*Hydrogen, with its high gravimetric energy density ( $\approx 120 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) and no carbon dioxide emissions from combustion or electrochemical oxidation, is a key element for decarbonization and the integration of renewable energy sources. However, its low volumetric density at ambient conditions ( $0.0899 \text{ kg m}^{-3}$ ) requires efficient, safe, and economically acceptable storage solutions. This review paper synthesizes the latest methods for physical, solid-state, and geological hydrogen storage, drawing on advances in materials science and techno-economic assessment. Special emphasis is placed on the trade-offs among gravimetric/volumetric densities, efficiency, technology maturity, and scalability to guide technology selection for applications in transport, industry, and grid systems.*

**Key Words:** *hydrogen storage, physical methods for hydrogen storage; advanced materials; geological hydrogen storage*