

Hidridi

Galeković, Petra

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:779849>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
Kemijски odsjek

Petra Galeković

Studentica 3. godine Preddiplomskog sveučilišnog studija KEMIJA

HIDRIDI

Završni rad

Rad je izrađen u Zavodu za opću i anorgansku kemiju

Mentor rada: prof. dr. sc. Željka Soldin

Zagreb, 2023.

Datum predaje prve verzije Završnog rada:

14. srpnja 2023.

Datum ocjenjivanja Završnog rada i polaganja Završnog ispita:

22. rujna 2023.

Mentor rada: prof. dr. sc. Željka Soldin

Potpis:

Sadržaj

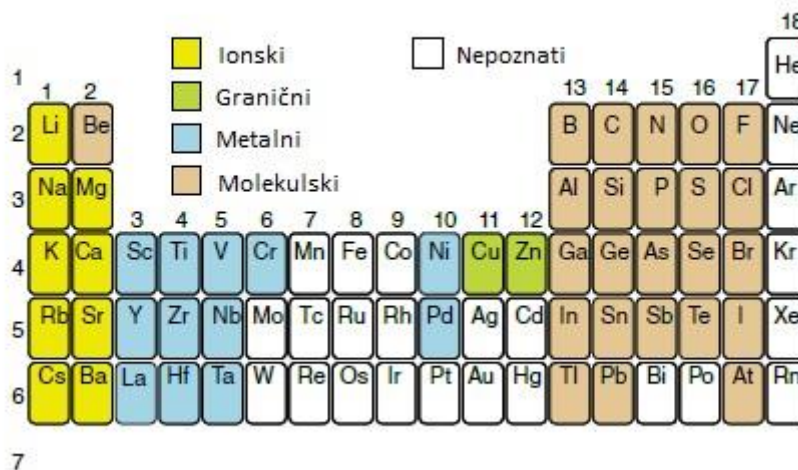
§ SAŽETAK.....	IV
§ 1. UVOD.....	1
§ 2. PRIKAZ ODABRANE TEME	3
2.1. Metalni hidridi	3
2.2 Ionski (solni) hidridi	4
2.3. Molekulski hidridi.....	6
2.4. Kovalentni hidridi s proširenom strukturom.....	7
2.5. Upotreba hidrida.....	8
2.5.1. Upotreba metalnih hidrida u gorivnoj ćeliji.....	8
2.5.2. Nikal / metal hidridne baterije.....	9
2.5.3. Metalni hidridi u solarnim panelima	11
§ 3. LITERATURNI IZVORI.....	XIV

§ Sažetak

U najširoj definiciji hidridima se smatraju spojevi kemijskih elemenata s vodikom. Prema pojedinim teorijama hidridima se nazivaju isključivo spojevi u kojima vodik dolazi u svom anionskom obliku kao hidridni ion (H^-), unatoč činjenici da je ovaj anion pronađen u samo manjem broju spojeva s vodikom. Iz literature su poznate različite podjele spojeva s vodikom, no najčešće se hidridi dijele na metalne (intersticijske), ionske (solne), molekulske i kovalentne s proširenom strukturom. Vodik je kemijski element koji sadrži samo jedan elektron te stabilnu elektronsku konfiguraciju može postići ili primanjem ili otpuštanjem jednog elektrona. Iako se s obzirom na mogućnost postizanja stabilne elektronske konfiguracije može usporediti s elementima 1. skupine (alkalijski metali) i elementima 17. skupine (halogeni elementi) vodik karakterizira visoka ionizacijska energija i niski elektronski afinitet. Vodiku se u spojevima s elementima manje elektronegativnosti pripisuje oksidacijski broj $-I$, a u spojevima s elementima veće elektronegativnosti oksidacijski broj I . Kemija ovog vrlo jednostavnog elementa je izuzetno složena. U ovom radu opisana su svojstva, struktura i karakteristične reakcije odabranih hidrida. Iz literature je poznato da vodikovi spojevi imaju primjenu u različitim granama industrije. U radu je detaljnije opisana mogućnost korištenja hidrida kao materijala za pohranu vodika u gorivnim ćelijama i nikal/metal hidridnim baterijama te kao materijala za pohranu energije u solarnim panelima.

§ 1. UVOD

Atom vodika, elektronske konfiguracije $1s^1$, ima samo jedan elektron što bi moglo ukazivati na njegova ograničena kemijska svojstva, no kemija vodika je unatoč tome prilično složena. Jedinstvena kemijska svojstva vodika razlikuju ga od svih ostalih elemenata. U periodnom sustavu najčešće se smješta iznad alkalijskih metala zato jer ima samo jedan valentni elektron. No, ovaj položaj ne odražava jasno kemijska i fizikalna svojstva vodika. Ionizacijska energija vodika je puno viša od ionizacijske energije alkalijskih metala. U nekim verzijama periodnog sustava vodik se smješta iznad halogenih elemenata zbog činjenice da mu do popunjene valentne ljuske nedostaje jedan elektron. Unatoč ovoj činjenici, elektronski afinitet vodika je bitno niži od elektronskog afiniteta halogenih elemenata pa je diskretni hidridni anion (H^-) pronađen samo u manjem broju spojeva. Priroda kemijske veze u vodikovim spojevima usko je povezana s njegovom visokom ionizacijskom energijom (1310 kJ mol^{-1}) i niskim elektronskim afinitetom (77 kJ mol^{-1}). Primanjem elektrona nastaje jaka Lewisova baza – hidridni anion (H^-), a otpuštanjem elektrona jaka Lewisova kiselina – vodikov kation ili proton (H^+). Slobodni vodikov kation, H^+ karakterizira visoki omjer naboja i radijusa što ukazuje na njegovu jaku polarizacijsku moć, dok je veliki hidridni anion, H^- jako polarizabilan. Kao važnu karakteristiku ovog elementa svakako treba spomenuti mogućnost formiranja vodikove veze. Ova jaka međumolekulska interakcija nastaje kada vodik premošćuje dva elektronegativna atoma te možemo reći da predstavlja temelj života. Pa je tako zbog vodikove veze voda tekućina, a ne plin. Vodikova veza presudna je za formiranje trodimenzijske strukture nukleinskih kiselina. Vodik tvori spojeve s gotovo svim elementima periodnog sustava. Elektronegativnost vodika prema Paulingovoj skali iznosi 2,2 pa se vodik u spojevima s metalima (elementima manje elektronegativnosti) pripisuje oksidacijski broj $-I$, a u spojevima s nemetalima (elementi veće elektronegativnosti) oksidacijski broj I .¹ Binarni spojevi vodika s drugim elementima se najčešće nazivaju hidridima, a najčešće se dijele na metalne (intersticijske), ionske (solne), molekulske i kovalentne s proširenom strukturom.²



Slika 1. Podjela binarnih spojeva vodika. Slika je preuzeta iz literaturnog izvora¹ i prilagođena.

Na slici 1. može se vidjeti podjela i raspodjela različitih tipova hidrida po periodnom sustavu elemenata. Prema navedenoj podjeli hidridi se mogu podijeliti na ionske, metalne i molekulske. Navedena klasifikacija uključuje i granične (eng. *intermediate*) hidride koji po svojim karakteristikama ne spadaju strogo niti u jednu od navedenih kategorija. Označeni su i elementi poput molibdena, volframa, mangana... za koje još nisu poznati binarni hidridi.¹ U starijoj literaturi binarni se hidridi ponekad dijele na kovalentne, ionske i metalne.³

Neovisno o načinu njihove podjele možemo reći da metalne hidride čine metali d- i f-bloka, ionske elementi 1. i 2. skupine (elementi male elektronegativnosti), molekulske i kovalentne hidride uglavnom elementi p-bloka čija je elektronegativnost slična ili veća od elektronegativnosti vodika. Kao primjer kovalentnih polimernih hidrida možemo navesti polimerne hidride aluminijske i berilijevske, metalnih iona koje karakterizira velika polarizacijska moć. Osim binarnih hidrida poznat je i veliki broj kompleksnih spojeva metala d-bloka koji kao anion sadrže hidridni ion.¹⁻³

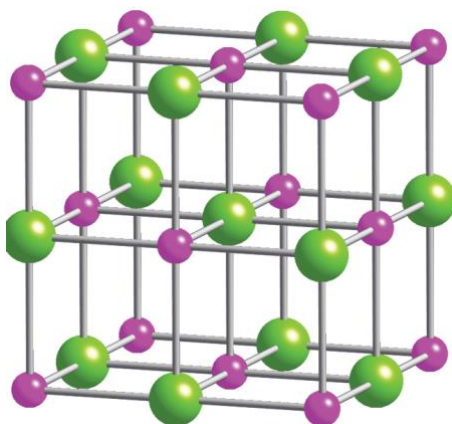
Izuzetno važno svojstvo metalnih hidrida je visoka mobilnost vodika unutar hidrida pri povišenim temperaturama. Ova činjenica uz varijabilni sastav ovih spojeva čini metalne hidride medijima pogodnim za pohranu i skladištenje vodika.¹ Jedinstveno svojstvo reverzibilne apsorpcije velikih količina vodika pokazuje paladij. Metal može pri sobnoj temperaturi apsorbirati 900 puta veći volumen vodika u odnosu na njegov vlastiti volumen. Neutronsom difrakcijom je ustanovljeno da se vodik smješta u oktaedarske šupljine kubne guste slagaline Pd. Pri sobnoj temperaturi su pronađene dvije faze PdH_x. α-PdH_x koja sadrži mali udio vodika (x≈0,01) i β-PdH_x s velikim udjelom vodika (x≈0,6). Različite duljine bridova jediničnih ćelija (389,0 pm za α-PdH_x i 401,8 za β-PdH_x) potvrđuju da s udjelom vodika dolazi do ekspanzije kristalne rešetke hidrida. Apsorbirani vodik je vrlo mobilan kroz kristalnu rešetku, što uz visoku selektivnost paladija prema vodikom omogućava odvajanje i pročišćavanje nečistog vodika.²

Osim hidrida, poznat je i veliki broj kompleksa metala d- i f- bloka s hidridnim anionima kao ligandima. Ovakvi su kompleksi obično amfoterni, te se ponašaju kao donori hidrida i kao Brønsted–Lowryjeve kiseline. Kiseliniska svojstva uvelike ovise o ligandu koji se nalazi uz hidridni ion. Eksperimentalno je ustanovljeno da ligandi koji stabiliziraju negativni naboj (olefini, karbonili, nitrozili, cianidi...) povećavaju kiselost kompleksnog hidrida. Neki od primjera hidridnih kompleksa su: Re(H)(CO)₅, [W(H)₂(CO)₂(Cp)(PMe₃)]⁺, [PdH(PR₃)₂(CO)]⁺. Ovakva istraživanja su izuzetno važna u razumijevanju mehanizama cijelog niza katalitičkih procesa kao što su primjerice hidrogeniranje ketona, aldehida, imina, karboksilnih kiselina, alkena i alkina.⁴

2.2. Ionski (solni) hidridi

Ionski hidridi nastaju reakcijom elemenata 1. i 2. skupine (osim Be) i vodika pri povišenoj temperaturi. Ovi hidridi su bezbojni te ih karakterizira visoko talište (*t*_t(LiH)=953 K, *t*_t(NaH)=1073 K). Hidridi 1.skupine kristaliziraju po strukturnom tipu NaCl (slika 3). Reaktivnost hidrida 1. skupine raste povećanjem atomskog broja *i* i radijusa metalnog iona. Ionski hidridi burno reagiraju s protičnim otapalima kao što su voda (1), etanol ili amonijak (2), što potvrđuje bazna svojstva iona H⁻.²





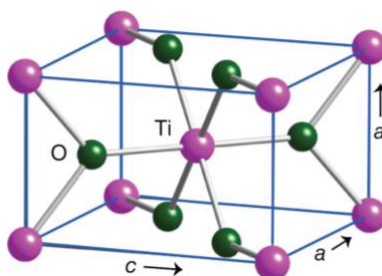
Slika 3. Prikaz jedinične ćelije NaCl. Slika je preuzeta iz literaturnog izvora.¹

Fino usitnjeni NaH može se čak i zapaliti ako ga se ostavi na vlažnome zraku. Takve je požare vrlo teško ugasiti jer se čak i ugljikov dioksid reducira u dodiru s vrućim metalnim hidridima. Hidridi su također korisni i kao nenukleofilne baze i reducensi.¹

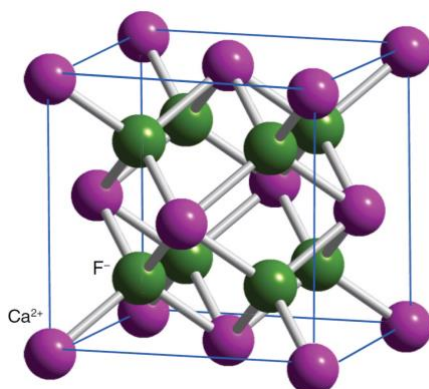
Elementi 2. skupine također dobro reagiraju s vodom (3). Reakcija je manje burna od one u kojoj sudjeluju elementi 1. skupine i time se mogu koristiti kao izvor vodika u gorivnim ćelijama.



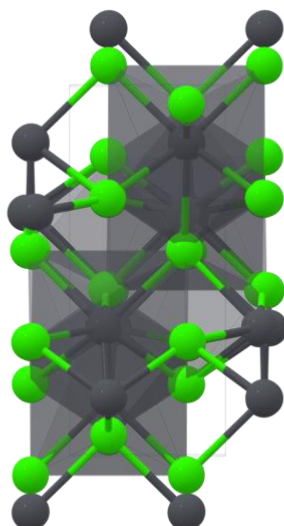
MgH₂ kristalizira prema strukturnom tipu rutila (slika 4), a CaH₂, SrH₂ i BaH₂ pri povišenim temperaturama imaju strukturu fluorita (slika 5), a pri niskoj temperaturi strukturu PbCl₂ (slika 6).¹



Slika 4. Prikaz jedinične ćelije rutila, TiO₂. Slika je preuzeta iz literaturnog izvora.¹



Slika 5. Prikaz jedinične ćelije fluorita, CaF_2 . Slika je preuzeta iz literaturnog izvora.¹



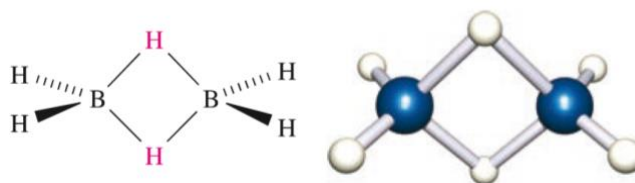
Slika 6. Prikaz strukture PbCl_2 . Slika je preuzeta iz literaturnog izvora⁵

2.3. Molekulski hidridi

U ovu skupinu spadaju kovalentni spojevi vodika i elemenata p-bloka, od 13. do 17. skupine, osim Al i Bi. BiH_3 je vrlo nestabilan i raspada se pri 198K.² Tališta i vrelišta molekulskih hidrida su niska, a zbog slabih Van der Waalsovih sila među molekulama, pri sobnoj temperaturi uglavnom dolaze u plinovitom ili tekućem stanju dok su oni koji dolaze u čvrstom agregacijskom stanju nestabilni.⁶ Hidridi halogenih elemenata, sumpora i dušika pripremaju se

reakcijom ovih elemenata s vodikom u odgovarajućim uvjetima (temperatura, tlak, katalizator...). Ostali se dobivaju reakcijom odgovarajuće metalne soli s vodom, vodenom otopinom kiseline, NH_4Br u tekućem amonijaku ili s $[\text{BH}_4]^-$ odnosno $[\text{AlH}_4]^-$.

Većina molekulskih hidrida je hlapljiva, a struktura im je jednostavna u skladu s VSEPR modelom. Boran, BH_3 je nestabilan i vrlo reaktivan hidrid bora koji momentalno dimerizira tvoreći diboran, B_2H_6 (slika 7).



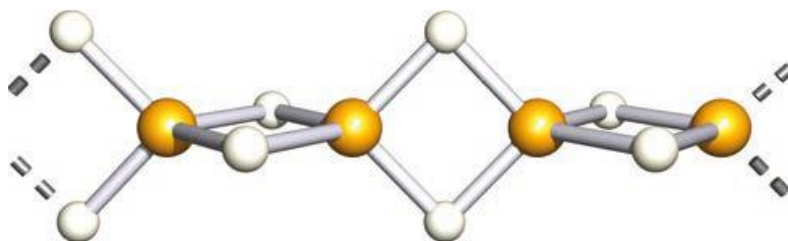
Slika 7. Prikaz strukture B_2H_6 . Slika je preuzeta iz literarnog izvora.²

U strukturi diborana su dva metalna centra bora premoštena s dva atoma vodika. Svaki premošćujući atom vodika tvori dvije trocentrične dvoelektronske veze (ukupni broj elektrona u dvije veze je 4), dok terminalni vodici tvore klasičnu jednostruku vezu.^{2,7}

U skupinu molekulskih hidrida svrstavaju se i spojevi koji sadrže kompleksni hidrido anion poput LiAlH_4 , NaAlH_4 i NaBH_4 . Ovi spojevi se koriste u kemijskim reakcijama kao redukcijska sredstva. Molekulske hidrido kompleksne ione daju i metali d-bloka (7-10 skupina periodnog sustava, izuzev mangana). Neki od ovakvih spojeva su: K_2ReH_9 , Li_4RuH_6 , Na_3RhH_6 , Mg_2RuH_4 , Na_3OsH_7 and Ba_2PtH_6 .²

2.4. Kovalentni hidridi s proširenom strukturom

Hidridi berilija i aluminija su bijele polimerne krutine. U kristalnoj strukturi berilijeva hidrida svaki je ion berilija tetraedarski koordiniran, a polimerna struktura se formira premošćujućim vezanjem vodikovih atoma (slika 8). U beskonačnoj kristalnoj strukturi aluminijeva hidrida svaki aluminijev(III) ion oktaedarski je koordiniran, a vodikovi atomi premošćuju aluminijeve centre. Za ove spojeve su karakteristične multicentrične veze slične onima u diboranu.²



Slika 8. Polimerna struktura $(\text{BeH}_2)_n$. Slika je preuzeta iz literaturnog izvora.²

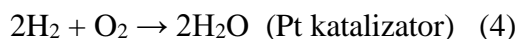
2.5. Upotreba hidrida

Iz literature je poznata široka primjena hidrida. Spojevi koji u svojoj strukturi sadrže kompleksne hidridne anione, LiAlH_4 i NaBH_4 se u organskoj i anorganskoj sintetskoj kemiji koriste kao izvor vodikovih iona, ali kao i redukcijaska sredstva. Poznata je i upotreba hidrida kao katalizatora u reakcijama hidrogenacije i dehidrogenacije u sintezi organskih spojeva te u petrokemijskoj industriji. Kalcijev hidrid, CaH_2 koristi se kao sredstvo za sušenje aaminskih otapala, uklanjanjem vode stvarajući $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i plinoviti vodik. Upravo se ova reakcija koristi kao izvor plinovitog vodika koji se potom koristi za punjenje meteoroloških balona i splavi za spašavanje.¹ Metalni hidridi poput magnezijeva hidrida, MgH_2 bitni su za skladištenje vodika u gorivnim ćelijama. Titanijev hidrid, TiH_2 koristi u solarnim termokemijskim ciklusima gdje apsorbira i skladišti, a potom po potrebi otpušta toplinsku energiju. Uloga hidrida je od izuzetne važnosti kod punjivih nikal/metal hidridnim baterijama. U nastavku će se detaljnije opisati primjena hidrida u gorivnim ćelijama, solarnim panelima te NiMH baterijama.

2.5.1. Upotreba metalnih hidrida u gorivnoj ćeliji

Kako bi se smanjila potrošnja ugljikovodičnih energenata tj. ulja, prirodnog plina i ugljena, potrebne su velike promjene u energetici. Okretanjem k ekološki prihvatljivim energentima pojačala bi se briga za okoliš. Na ovaj način uštedjela bi se energija te bi se proizvodnja električne energije odvijala bez potrošnje ugljikovodika koji svojim izgaranjem povećavaju emisiju stakleničkih plinova.⁸

Pojam gorivne ćelije je prvi put uveden 1889. godine kada je ustanovljeno da se kemijska energija dobivena reakcijom vodika i kisika uz Pt kao katalizator može efikasno prevesti u električnu energiju.



Izgaranjem vodika nastaje isključivo voda, što vodik čini ekološki čistim gorivom i prema tome idealnim za napajanje ogromnog broja vozila na cestama.²

Gorivna ćelija je elektrokemijski uređaj koji proizvodi električnu energiju direktno iz goriva (vodik, metan, alkoholi itd.) i oksidansa (najčešće kisik) u jednom koraku. Reakcije ovise o vrsti elektrolita i goriva koji se koriste. Odabrane gorivne ćelije koje koriste vodik kao gorivo, prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Odabrane gorivne ćelije koje koriste vodik kao gorivo i njihove glavne karakteristike

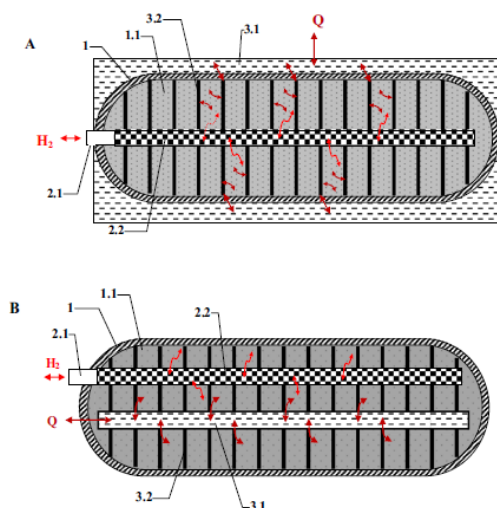
Elektrolit	Gorivo	Oksidans	Radna temperatura (°C)	Električna učinkovitost (%)	Raspon snage (kW)	Primjena
OH ⁻ (vodena otopina hidroksida alkalijskog metala)	H ₂	O ₂ ili zrak	65-220	45-60	1-100	svemirske letjelice, plovila
OH ⁻ (vodena otopina hidroksida alkalijskog metala)	NaBH ₄	O ₂ ili zrak ili H ₂ O ₂	20-85	30-40	10 ⁻³ -0,5	prijenosna
OH ⁻ (vodljiva polimerna membrana)						
Na ⁺ (vodljiva polimerna membrana)						
H ⁺ (vodljiva polimerna membrana)	H ₂	zrak	60-80	40-50	0,05-100	prijenosna vozila stacionarna
	H ₂	zrak	150-180	45-50	do 200	stacionarna
H ₃ PO ₄	H ₂	zrak	150-220	40-45	5-200	stacionarna
CO ₃ ²⁻ (vodljiv rastaljeni karbonat)	H ₂	zrak	600-700	45-55	100-2000	stacionarna
O ²⁻ (vodljiva keramika)	H ₂	zrak	600-1000	45-60	2,5-250	stacionarna

Tablica je preuzeta iz literaturnog izvora⁷ i prilagođena.

Mogućnost korištenja vodika kao ekološki prihvatljivog goriva predmetom je brojnih istraživanja kroz 20. i 21. stoljeće. Najveći izazov je pronaći što bolji način prijenosa i skladištenja vodika. Zbog vrlo male gustoće vodika nužna je njegova kompresija i čuvanje u

rezervoarima pod vrlo visokim tlakovima. Alternativni pristup skladištenju vodika pronađen je u materijalima, poput metalnih (intersticijskih) hidrida koji mogu apsorbirati vodik.² Metalni hidridi koriste se za sigurno, učinkovito i fleksibilno pohranjivanje vodika te se mogu široko primjeniti na razne stacionarne i prijenosne energetske primjene pružajući opskrbu plinovitim vodikovim gorivom za gorivne ćelije.

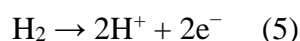
Kod gorivih ćelija, se vodik pohranjen u spremniku (Slika 9) oslobađa procesom desorpcije kako bi nastala električna energija.⁸



Slika 9. Tipični raspored MH spremnika s vanjskim (A) i unutarnjim (B) grijanjem / hlađenjem: 1 – plinootporni spremnik, 1.1 – MH materijal; 2 – ulaz/izlaz plina i distribucijski sustav, 2.1 – ulazni/izlazni cjevovod H₂, 2.2 – plinski filter; 3 – upravljanje toplinom sustav, 3.1 – sredstva za grijanje/hlađenje, 3.2 – sredstva za distribuciju toplote. Slika je preuzeta iz literaturnog izvora.⁸

Proces desorpcije vodika iz metalnih hidrida nastaje pod kontroliranim uvjetima, npr. povećanjem temperature ili smanjenjem tlaka. Unosom temperature u sustav dolazi do pucanja veze između metala i vodika, te dolazi do otpuštanja molekule H₂.

Oslobođeni vodik se prenosi do gorivne ćelije koja sadrži anodu i katodu. Na anodi dolazi do redukcije vodika (5).



Nastali protoni se provode do katode putem elektrolita. Istovremeno, na anodi dolazi do oksidacije kisika i nastanka vode. Nastali elektroni koji putuju od anode prema katodi proizvode električnu struju koja se za punjenje električnih uređaja ili baterija. Jedini konačni produkt cijele kemijske reakcije je voda te sam proces zbog toga je učinkovit i ekološki povoljan. Tijekom procesa dolazi do oslobađanja topline, koja se može iskoristiti u razne svrhe, npr. povećanje ukupne energetske učinkovitosti gorivnih ćelija.⁸

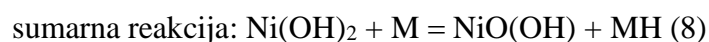
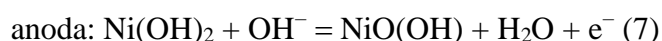
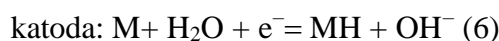
2.5.2. Nikal / metal hidridne baterije

Nikal/metal hidridne (NiMH) baterije vrsta su punjivih baterija koje koriste metalne hidride za pohranu vodika (slika 10). Puno su bolja i ekološki prihvatljivija zamjena za već dobro poznate nikal-kadmijeve (Ni-Cd) baterije samim time što se izbjegava prisutnost toksičnog kadmija u sastavu. Najbitnija komponenta ovih baterija je upravo metal-hidridna elektroda koja je ključna za pohranu vodika. Metalna legura uglavnom je građena od rijetkih i prijelaznih metala, a upravo ta legura omogućuje apsorpiranje i otpuštanje vodika.^{9,10}



Slika 10. Primjer punjivih NiMH baterija. Slika je preuzeta iz literaturnog izvora.¹⁰

U NiMH baterijama koriste se metalne legure poput primjerice LaNi_5 ili općenitije $\text{M}'\text{Ni}_5$ (M' =legura La, Ce, Nd ili Pr) koje mogu apsorbirati vodik i pohraniti ga u obliku hidrida kao što je recimo LaNi_5H_6 . Ni komponenta legure najčešće sadrži Co, Al i Mn aditive. Metalna legura je katoda u NiMH bateriji. Anoda je načinjena od $\text{Ni}(\text{OH})_2$, a elektrolit je 30%-tna vodena otopina KOH. Na elektrodama se odvijaju sljedeće reakcije:



Unaprednim reakcijama prikazano je punjenje, a unazadnim reakcijama pražnjenje baterije.

MH koji nastaje na katodi kod punjenja sadrži na površini apsorbirani vodik. Nakon apsorpcije dolazi do difuzije vodika u unutrašnjost metalne legure. Baterija reciklira vodik između katode i anode i može se puniti i prazniti oko 500 puta. Za vrijeme punjenja vodik se kreće od anode prema katodi te se pohranjuje u metalnoj leguri. Za vrijeme pražnjenja vodik se oslobađa iz legure i kreće se od katode prema anodi. Dizajn i karakteristike NiMH i NiCd baterija je vrlo sličan. U današnje vrijeme novije NiMH baterije zamjenjuju NiCd baterije zbog većeg električnog kapaciteta i činjenice da za razliku od NiCd baterija ne generiraju u okoliš toksični otpad.²

2.5.3. Metalni hidridi u solarnim panelima

TES (Thermal energy storage) je tehnologija za skladištenje toplinske energije u kojoj se višak toplinske energije pohranjuje kada ga ima dovoljno, a otpušta kada postoji potreba. Metalni hidridi služe za pohranu toplinske energije zbog svoje sposobnosti reverzibilnog apsorbaranja i otpuštanja vodika. Tijekom toplinskog punjenja hidridi apsorbiraju toplinu i dolazi do endotermnih reakcija, a tijekom pražnjenja se toplina otpušta i dolazi do egzotermnih reakcija.

Solarne elektrane koriste zrcala ili leće za usmjeravanje sunčeve svjetlosti na termalni prijemnik, što dovodi do povišenja temperature. Metalni hidridi u apsorpcijskim toplinskim pumpama čine reverzibilni sustav za pohranu toplinske energije.

Kada je potražnja za toplinom niska ili kada je dostupan višak iste tijekom sunčanih razdoblja, aktiviraju se toplinske pumpe, apsorbira se toplina koja generira otpuštanje vodika

iz metalnog hidrida. Vodik se pohranjuje te prema potrebi oslobađa i kemijskom reakcijom generira toplinu koja se tijekom razdoblja kada nema sunčeve svjetlosti koristi u svrhu zagrijavanja prostora, za provođenje nekih industrijskih procesa, ali i za pogon turbina za proizvodnju električne energije.

TES sustav se sastoji od dva povezana sloja metalnog hidrida: sloja visoke temperature (HT) koji radi na temperaturi ≥ 650 °C i sloja niske temperature (LT) koji radi pri temperaturi okoline na oko 40 °C. Pod utjecajem topline (sunčeve energije) visokotemperaturnom spremniku dolazi do oslobađanja vodika u endotermnoj reakciji. Vodik prelazi u niskotemperaturni spremnik i formira se hidrid pri sobnoj temperaturi i otpušta se oko 30 kJ/mol topline u okoliš. Povlačenjem topline iz spremnika, vodik se vraća u visokotemperaturni sloj hidrida i ulazi u reakciju koja oslobađa oko 150 kJ/mol energije. Odgovarajuća konstrukcija sustava dovodi do njegove visoke energetske učinkovitosti.

Neki od metalnih hidrida koji se mogu koristiti za ove svrhe su kalcijev hidrid, magnezijev hidrid te titanijev hidrid. Eksperimentom je ustanovljeno da je titanijev hidrid zbog svoje visoke energetske učinkovitosti i dugog vijeka trajanja posebno prikladan za korištenje u sustavima za pohranu solarne energije.¹¹

§ 3. LITERATURNI IZVORI

1. T. L. Overton, J. P. Rourke, M. T. Weller, and F. A. Armstrong, *Inorganic Chemistry*, 7th Ed., Oxford University Press, Oxford, 2018, str. 312–317, 322–333, 344, 365.
2. C. E. Housecroft and A. G. Sharpe, *Inorganic chemistry*, 4th Ed., Pearson, Harlow, 2012, str. 304, 305, 317–321, 380–383.
3. W. M. Mueller, J. P. Blackledge, G. G. Libowitz, *Metal Hydrides*, 1st Ed., Academic press, New York and London, 1968, str. 2,6.
4. R. H. Morris, *Chem.Rev.* **116** (2016) 8588–8654.
5. <https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-619071> (datum pristupa 27. srpnja 2023.)
6. J. Huot, u M. Hirscher (ur.), *Handbook of Hydrogen Storage*, Vol. 4, Wiley-VCH, Weinheim, 2010, str. 83.
7. R.B. King, *Encyclopedia of Inorganic Chemistry*, Wiley, Hoboken, 2006, str. 412–415.
8. M. V. Lototsky, I. Tolj, L. Pickering, C. Sita, F. Barbir, V. Yartys, *Prog. Nat. Sci.: Mater.* **27** (2017) 3–20.
9. S. Chang, K-H. Young, J. Nei, C. Fierro, *Batteries* **2** (2016), 10.
10. T. Ouchi, K-H. Young, D. Moghe, *Batteries* **2** (2016) 21.
11. E. C. E. Rönnebro, G. Whyatt, M. Powell, M. Westman, F. R. Zheng, Z. Z. Fang, *Energies* **8** (2015) 8406–8430.