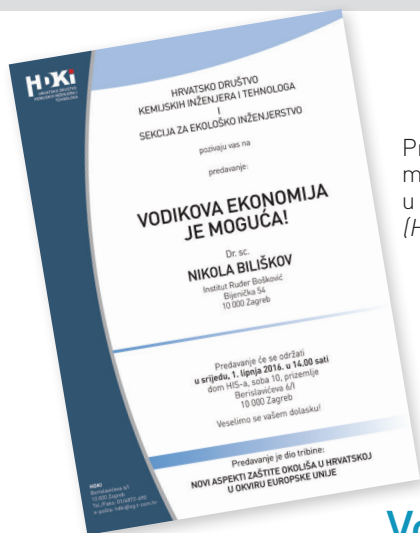


# ZAŠTITA OKOLIŠA



Uređuje: Vjeročka Vojvodić



Predstavljamo članak temeljen na predavanju dr. sc. *Nikole Biliškova* "Vodikova ekonomija je moguća!", održanom 1. lipnja 2016. u sklopu tribine "Novi aspekti zaštita okoliše u Hrvatskoj u okviru Europske unije", koju organiziraju *Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa (HDKI)* i *Sekcija za ekološko inženjerstvo*.

Vjeročka Vojvodić

*Nikola Biliškov\**

## Vodikova ekonomija je moguća!

### Sažetak

Konvencionalnom pohranom vodika u plinskoj i tekućoj fazi osigurava se samo vrlo ograničen sadržaj energije. Kroz niz zadnjih desetljeća razvija se koncept kemisorpcijske pohrane u čvrstom stanju kao najučinkovitiji način pohrane vodika. Poteškoće povezane s razvojem takvih sustava za pohranu vodika učinile su tu problematiku jednom od ključnih suvremenih znanstvenih i tehnoloških izazova pri realizaciji široke upotrebe vodika kao nosača energije u bezugličnoj "vodikovoj ekonomiji". Iako je taj problem uglavnom kemijske naravi, pronalazak učinkovitih sustava, koji zadovoljavaju sve zacrtane tehnološke potrebe, zahtijeva interdisciplinarni pristup. Ovdje donosimo pregled višegodišnjeg istraživačkog rada Laboratorija za kemiju čvrstog stanja i kompleksnih spojeva Instituta Ruđer Bošković na području materijala za pohranu vodika. Ta istraživanja dovodimo u korespondenciju s međunarodnim trendovima na tom polju te donosimo nekoliko recentnih primjera primjene tehnologija temeljenih na materijalima za pohranu vodika u čvrstom stanju.

### Uvod

Opskrba energijom u današnjem se svijetu u velikoj mjeri temelji na izgaranju ugljikovih spojeva, što rezultira štetnim emisijama enormnih količina CO<sub>2</sub> i, konzekventno, klimatskim promjenama. S obzirom na to da zahtjevi suvremene civilizacije za energijom stalno rastu, energetika je jedan od gorućih problema s kojima se suočava održivost čovječanstva. Prijelaz s fosilnih goriva na obnovljive izvore je, zajedno s drugim mjerama, prihvaćen kao najizgledniji način izbjegavanja nepopravljive štete po okoliš. Koncepti i pristupi zelene kemije danas su široko uključeni u rješavanje energetske potrebe kroz razvoj održivih tehnologija. Ipak, problematika pohrane energije i dalje je vrlo velik izazov, a jedno od najizglednijih rješenja uključuje proizvodnju i pohranu vodika.

### Vodik kao nosilac energije

S obzirom na to da je maseni udio elementarnog vodika na Zemlji tek 0,14 %, možemo reći da on praktički ne egzistira u elementarnom obliku u dostupnom nam okolišu. Kako bismo ga mogli upotrebljavati, moramo ga najprije dobiti iz dostupnih izvora, kao što je voda, zemni plin i sl. Zato vodik ne smatramo izvorom, nego nositeljem energije, u istom smislu kao i električnu energiju.

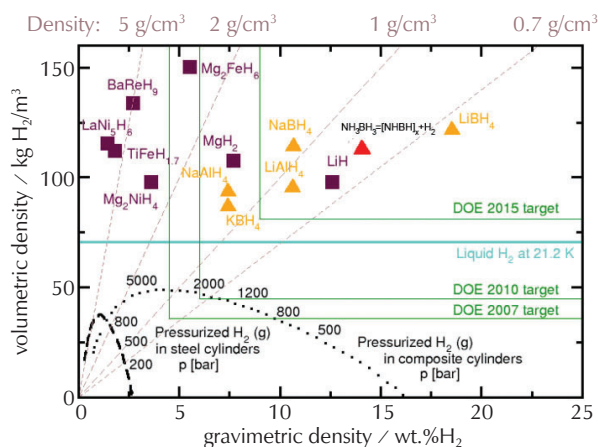
Kao najlakši element, vodik ima veliku masenu gustoću energije od 120 MJ kg<sup>-1</sup>, što je otprilike tri puta više nego u benzinima. Međutim, zbog vrlo male gustoće u plinovitom i tekućem stanju, volumna gustoća energije vrlo je mala (5,6 MJ dm<sup>-3</sup> pri 70 MPa). Zbog toga, konvencionalnom pohranom vodika u plinskoj i tekućoj fazi osigurava se samo vrlo ograničen sadržaj energije.

### Problem pohrane vodika

Kemisorpcijska pohrana u čvrstom stanju omogućuje najveću brojnu gustoću vodika.<sup>1</sup> Na slici 1 treba uočiti da u kemijskim spremnicima brojna gustoća vodika može biti i 2,5 – 3 puta veća nego u komprimiranom ili tekućem vodik. Zavod za energetiku SAD-a definirao je ciljeve kao smjernicu za razvoj sustava za pohranu vodika za mobilnu upotrebu (tablica 1).<sup>2</sup> Prema tim smjernicama, materijal za pohranu vodika treba zadovoljavati sljedeće kriterije: velik (i maseni i volumni) kapacitet vodika, brzu kinetiku otpuštanja i primanja vodika, laku aktivaciju, minimalno propadanje tijekom cikličke sorpcije, sigurnost i nisku cijenu.

Poteškoće povezane s razvojem takvih sustava za pohranu vodika učinile su tu problematiku jednom od ključnih suvremenih znanstvenih i tehnoloških izazova pri realizaciji široke upotrebe vodika kao nosača energije u bezugličnoj vodikovoj ekonomiji s nultim emisijama. Nešto se rjeđe spominje da bi i priprava samih materijala trebala zadovoljavati principe zelene kemije. Naime, čistoću bilo koje tehnologije određuje čistoća njezine najpriljavije karike. Iako je problem pripreme materijala uglavnom kemijske naravi, pronalazak učinkovitih sustava, koji zadovoljavaju sve zacrtane tehnološke potrebe, zahtijeva interdisciplinarni pristup. Sigurno je da bi takav proboj imao dalekosežan utjecaj na industriju, a posredno i na društvo u cjelini.

\* Dr. sc. Nikola Biliškov  
Institut Ruđer Bošković, Zavod za kemiju materijala, Laboratorij za kemiju čvrstog stanja i kompleksnih spojeva, Bijenička c. 54,  
10 000 Zagreb  
e-pošta: nbilis@irb.hr



Slika 1 – Kapaciteti vodika različitih sustava za pohranu vodika s ciljevima.<sup>2</sup> Slika reproducirana iz ref.<sup>19</sup>

Iz slike 1 evidentno je da je razvijen velik broj fizičkih i kemijskih sustava za pohranu vodika, ali ni jedan od njih ne zadovoljava sve zacrtane ciljeve.<sup>2</sup> Dugo su intersticijski metalni hidridi bili razmatrani kao najizglednije rješenje zbog njihove reverzibilnosti i velikog molarnog i volumnog kapaciteta vodika. Ipak, maseni udjel vodika u tim materijalima vrlo je mali, zbog čega je upotreba tih materijala svedena na baterije za male džepne uređaje te na napajanje stacionarnih trošila. Također, oni su već dostigli tehnološki plafon s obzirom na svojstva relevantna za pohranu vodika.<sup>1</sup>

Atraktivna alternativa su kompleksni hidridi, koji uključuju elemente prve i druge skupine, čiji atomski broj ne prelazi 20. Ti sustavi se odlikuju povoljnim gravimetrijskim i volumetrijskim kapacitetom vodika, ali općenito pate od relativno visokih kinetičkih barijera, što ih je godinama udaljivalo od fokusa istraživačkih napora. Tu situaciju je dramatično promijenio probni rad, u kojem je opaženo poboljšanje kinetike hidrogeniranja alanata (natrijev aluminijev hidrid) dopiranjem titanovim solima, što je dovelo i do visoke reverzibilnosti.<sup>3</sup> To je potaknulo znatnu istraživačku inicijativu za podešavanje svojstava alanata, borhidrida, amida i, nedavno, borazana (AB) i amidoborana (MAB), kako bi ih se učinilo praktičnima za pohranu vodika u prijevoznim sredstvima.

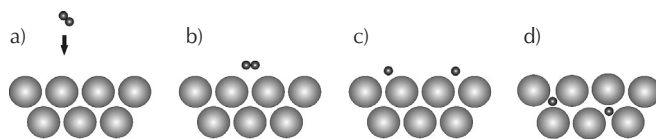
S druge strane, značajni proboji dogodili su se i na polju materijala za fizesorpcijsku pohranu vodika, kao što su porozni ugljik, silicij i neke druge tvari, grafen i srodni materijali te, u posljednje vrijeme organometalni kavezasti spojevi (MOF). Međutim, razmatranje tih sustava bi nas odvelo predaleko od kemisorpcijskih materijala na koje se ovdje želimo fokusirati.

## Intermetalni spojevi i njihovi hidridi

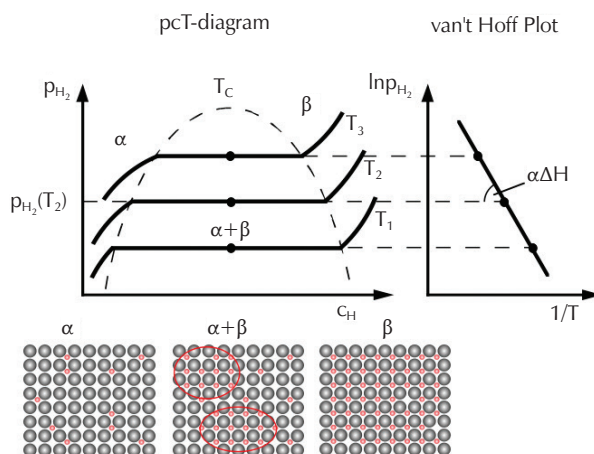
Interakcija metala s vodikom prvi je put, na primjeru paladija, opisana 1868. godine u radu Thomasa Grahama "On the Occlusion of Hydrogen Gas by Metals".<sup>4</sup> Ipak, sustavi metal – vodik, kao potencijalni spremnici vodika, postali su aktualni tek krajem sedamdesetih godina prošlog stoljeća.<sup>5</sup> Treba spomenuti da se tim trendovima vrlo brzo priključila grupa s Instituta Ruđer Bošković, okupljena oko dr. sc. Zelimira Blažine, a u tom je smislu bio posebno aktivan dr. sc. Antun Drašner, koji je inicirao prilagodbu Laboratorija za kemiju čvrstog stanja kroz izgradnju cijelog niza instrumenata. Dobar opis početne faze njihovih istraživanja na tom polju dan je kroz dva članka u ovom časopisu.<sup>6,7</sup>

U desetljećima koja su uslijedila sintetizirani su i detaljno karakterizirani brojni intermetalni spojevi tipa  $\text{LaNi}_5$  te Lavesove faze u smislu njihove interakcije s vodikom (vidi ref.<sup>8-11</sup> i referencije u tim radovima). Pokazalo se da su sustavi intermetalni spojevi – vodik iznimno uspješni kao kemijski spremnici vodika. Naime,

oni su reverzibilni bez znatnog gubitka kapaciteta prema vodiču kroz tisuće ciklusa hidrogeniranja i dehidrogeniranja, hidridi sadrže velik volumni udjel vodika, a termodinamička svojstva mogu se fino ugađati djelomičnom supstitucijom lantanida ili prijelaznog metala. To proizlazi izravno iz mehanizma interakcije intermetalnih spojeva s vodikom. Ukratko, da bi metalni sustav uopće mogao upijati vodik, na njegovoj se površini mora dogoditi disocijacija molekule  $\text{H}_2$  na individualne atome vodika, koji zatim difundiraju u unutrašnjost metala, na kraju se smještaju u adekvatne šupljine oktaedarske ili tetraedarske geometrije. Prvo nastaje  $\alpha$  faza ili razrijeđena čvrsta otopina vodikovih atoma (slika 2). Daljnjim popunjavanjem šupljina nastaju zasićena područja u metalnoj kristalnoj rešetci. To je područje smjese  $\alpha$  i  $\beta$  faze, koje je aplikativno najrelevantnije. Nakon nekog vremena popune se sve šupljine određenog tipa i time dobivamo  $\beta$  fazu. Dodatnim dodavanjem vodika, tj. pri višim tlakovima, mogu nastati i dodatne faze, tj.  $\gamma$ ,  $\delta$  itd., ali one su tehnološki irelevantne. Područje smjese  $\alpha$  i  $\beta$  faze karakterizirano je određenim tlakom vodika pri određenoj temperaturi i ono se može ugađati jednostavnim kemijskim supstituiranjem nekog od metala (slika 3).



Slika 2 – Mehaniizam interakcije metala s plinovitim vodikom. Molekula vodika prilazi površini metala (a) na koju se adsorbira (b), nakon čega dolazi do disocijacije  $\text{H}_2$  na atome H (c), koji zatim difundiraju u unutrašnjost metala (d) i zauzimaju pogodne intersticijske položaje.



Slika 3 – Tlačno-kompozicijske izoterme i veza s termodinamikom i strukturom intersticijskih hidrida

Kao nepremostiv problem u primjeni intermetalnih spojeva kao spremnika vodika ostao je vrlo mali maksimalni maseni udjel vodika u tim sustavima (oko 1,5 % u najboljim slučajevima). Zato su ti spojevi našli široku primjenu u stacionarnim sustavima, kao i u malim trošilima, koja zahtijevaju male baterije. Zaista, danas se takve tzv. NiMH baterije nalaze svuda oko nas, a na polju intermetalnih spojeva za pohranu vodika nije ostalo više mnogo prostora za značajniji napredak, osim na polju optimizacije materijala za neposrednu primjenu. Zato je za njih i izbljedio ozbiljniji znanstveni interes.

## Kompleksni i kemijski hidridi

U odnosu na izazove koje nameću stacionarna trošila, znatno je kompleksnije pitanje razvoja materijala za pohranu vodika u čvr-

stom stanju za prijevozna sredstva. Iz tog razloga *Department of Energy* Sjedinjenih Američkih Država redovito izdaje smjernice za razvoj tih materijala (tablica 1).<sup>2</sup> Već je spomenuto da intermetalni spojevi zadovoljavaju dugoročne zahtjeve volumnog udjela, ali problematičnim ostaje vrlo niski maseni udjel vodika.

Tablica 1 – Smjernice DOE-a za pohranu vodika<sup>2</sup>

Parametar	Jedinice	Ciljevi	
		2017.	krajnji
Gravimetrijski kapacitet	kWh/kg	1,8	2,5
Volumetrijski kapacitet	kWh/L	1,3	2,3
Cijena	USD/kWh	12	8
<i>Trajnost/operabilnost</i>			
Radna vanjska temperatura	°C	-40/60	-40/60
min/maks. dostavna temperatura	°C	-40/85	-40/85
broj operabilnih ciklusa	ciklusi	1500	1500
minimalni dostavni tlak	bar (aps)	5	3
maksimalni dostavni tlak	bar (aps)	12	12
radna učinkovitost	%	90	90
učinkovitost "od izvora do energane"	%	60	60
<i>Brzina punjenja i pražnjenja</i>			
vrijeme punjenja sustava (5 kg)	min	3,3	2,5
minimalni protok	(g/s)/kW	0,02	0,02
vrijeme starta do punog protoka pri 20 °C	s	5	5
vrijeme starta do punog protoka pri -20 °C	s	15	15
prijelazni odziv pri radnoj temperaturi 10 – 90 % i 90 – 0 %	s	0,75	0,75
kvaliteta H <sub>2</sub>	%	SAE J2719 i ISO/PDTS 14687-2 (99,97 % suha baza)	
<i>Okolišna prihvatljivost i sigurnost</i>			
prodiranje i istjecanje otrovnost	–	dostiže ili prelazi odgovarajući standard, npr. SAE J2579	
sigurnost	–		
gubitak korisnog H <sub>2</sub>	(g/h) / kg	0,05	0,05

Pogledamo li sliku 1, vidimo da je područje koje odgovara velikom volumnom i masenom udjelu vodika, napučeno hidridima elemenata niske atomske mase, uglavnom ispod  $A_r = 20$ . Radi se o hidridima u kojima je vodik vezan kovalentnim ili koordinacijskim vezama pa ih skupno zovemo kompleksnim hidridima. Uglavnom, radi se o materijalima koji zadovoljavaju mnoge zahtjeve DOE-a, ali ipak svi oni pate od mnogih nedostataka kemijske prirode (tablica 2), što ih čini kemičarima izazovnijima.

U posljednja dva desetljeća velik dio istraživačke zajednice koja se bavi materijalima za pohranu vodika prebacio je svoju fokusiranost upravo na takve sustave. Odlučujući proboj na tom polju

rad je *Bogdanovića* i *Schwickardija* iz 1997. godine, u kojem je pokazano da se kinetička barijera dekompozicije NaAlH<sub>4</sub> može sniziti dodatkom soli Ti<sup>2+</sup> te da na taj način materijal postaje reverzibilan u uvjetima koji su bliski tehnički prihvatljivima.<sup>3</sup> Nakon tog proboja intenzivno su se počeli istraživati kompleksni hidridi kao potencijalni kemijski spremnici vodika, što je lijepo opisano u tada aktualnom preglednom radu *Schlapbacha* i *Züttela*.<sup>12</sup> Taj trend traje i danas. Među tim materijalima posebno su se istaknule četiri skupine spojeva; metalni amidi, alanati, borhidridi te borazan i njegovi derivati amidoborani.

S obzirom na to da istraživanja kompleksnih hidrida koincidiraju sa sve većim interesom cjelokupne javnosti za obnovljive izvore energije, to područje se razgranalo u vrlo kompleksnu mrežu, tako da ovdje ne možemo dati čak ni sažeti pregled. Zainteresiranog čitatelja zato upućujemo na recentnu literaturu.<sup>1,13-15</sup> Ipak, ovdje treba spomenuti da se u Hrvatskoj na ovom polju ponovno istaknuo Laboratorij za kemiju čvrstog stanja i kompleksnih spojeva, gdje se istraživački fokus u posljednjih nekoliko godina radikalno pomiče s intermetalnih spojeva na kompleksne hidride, osobito borazan i amidoborane (slika 4).<sup>16,17</sup> Komparativna prednost te istraživačke grupe pred drugima je dobra pozadina iz molekularne spektroskopije, nesvakidašnja na području kemije materijala. Kombinacija tog iskustva i znanja s plodnom suradnjom sa skupinama u inozemstvu tu grupu ponovo stavlja rame uz rame s mnogo većim i jačim laboratorijima.<sup>18</sup>

## Zaključak – je li vodikova ekonomija moguća ili se radi o čistoj utopiji?

Kao što je rečeno u uvodnim razmatranjima, problem pohrane vodika općenito se smatra glavnom preprekom izgradnje tzv. vodikove ekonomije, Odgovor na pitanje je li vodikova ekonomija moguća zato nudimo u kontekstu razvoja materijala za pohranu vodika u čvrstom stanju.

Mnogi se materijali razmatraju kao potencijalni spremnici vodika, ali zasad ni jedan ne zadovoljava sve zahtjeve DOE-a. Intermetalni spojevi dosegli su svoj tehnološki plafon i na tom se polju ne očekuje nikakav značajan napredak. Iako kompleksni hidridi zasad uglavnom ne zadovoljavaju kriterij reverzibilnosti, oni omogućuju znatno veću slobodu kemijskih modifikacija. Prema tome, na tom se polju očekuju materijali koji bi zadovoljavali dugoročne kriterije tehnološke primjene u prijevoznim sredstvima.

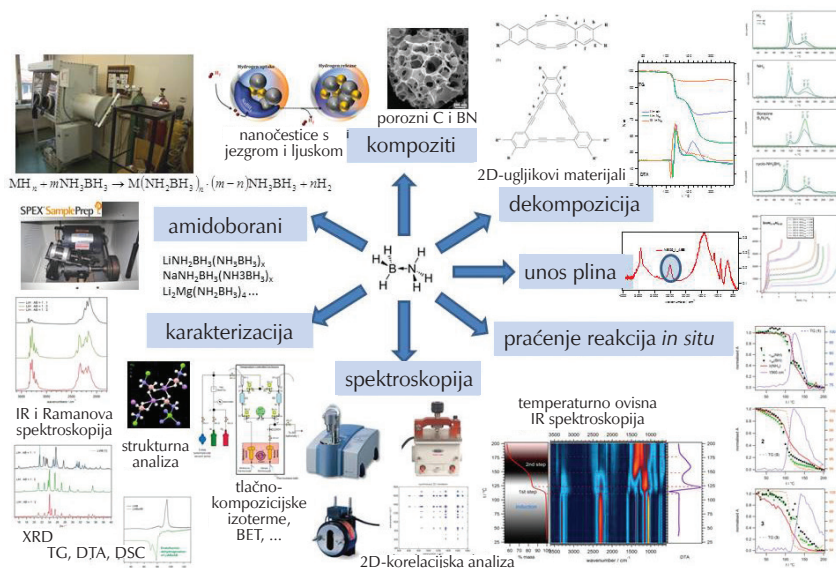
Vodikova ekonomija je, prema svemu navedenome, moguća. Međutim, taj cilj će biti postignut tek punom integracijom distribuiranih mreža obnovljivih izvora energije sa sustavima za proizvodnju i pohranu vodika te trošilima. Pritom treba imati na umu činjenicu da je stupanj ekološke prihvatljivosti bilo koje tehnologije određen najpriljivijim korakom. Prema tome, ključno je da svi procesi u ciklusu upotrebe vodika također budu "čisti", tj. s minimalnim utjecajem na okoliš.

No usporedno s razvojem vodikovih tehnologija svjedočimo i kontinuiranom tehničkom napretku različitih drugih alternativnih goriva i vozila, kao što su hibridna, *plug-in* hibridna i potpuno električna vozila, tekuća biogoriva itd. U tom smislu, vodik je jed-

Tablica 2 – Tehnološka spremnost materijala za kemijsku pohranu vodika u čvrstom stanju

Opći trendovi	Intersticijski hidridi	Kompleksni hidridi	Fizisorpcijski materijali	Kemijski hidridi
volumetrijski kapacitet	zadovoljavaju	zadovoljavaju	djelomično zadovoljavaju	zadovoljavaju
gravimetrijski kapacitet	ne zadovoljavaju	zadovoljavaju	zadovoljavaju	zadovoljavaju
reverzibilnost	zadovoljavaju	zadovoljavaju	zadovoljavaju	ne zadovoljavaju
termodinamika	zadovoljavaju	zadovoljavaju	ne zadovoljavaju	djelomično zadovoljavaju
kinetika	zadovoljavaju	ne zadovoljavaju	zadovoljavaju	djelomično zadovoljavaju
efikasnost	zadovoljavaju	zadovoljavaju	zadovoljavaju	ne zadovoljavaju
TRL	9–10	6–7	6–7	2–3





Slika 4 – Shematski prikaz istraživanja Laboratorija za kemiju čvrstog stanja i kompleksnih spojeva IRB-a na polju borazana i amidoborana

na od opcija koje nam stoje na raspolaganju u širokom napretku prema niskougljičnim energetskim sustavima. Vodikova ekonomija, prema tome, nije više nikakva utopija, vodikove tehnologije su zapravo već u ovom trenutku duboko prodrle u naš svakodnevni život. Sigurno je da vodik neće riješiti sve naše energetske i okolišne probleme, ali je isto tako sigurno da će u skoroj budućnosti (koja je, rekli bismo, već započela) igrati vrlo važnu ulogu u održivoj energetici, jednom od potpornih stupova budućnosti naše civilizacije.

## Literatura

1. L. Klebanoff, *Hydrogen Storage Technology*, Taylor & Francis, 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1201/b13685>.
2. US DOE, *Targets for Onboard Hydrogen Storage Systems for Light-Duty Vehicles*, U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy and The FreedomCAR and Fuel Partnership, 2009.
3. B. Bogdanović, M. Schwickardi, Ti-doped alkali metal aluminum hydrides as potential novel reversible hydrogen storage materials, *J. Alloys Compd.* **253-254** (1997) 1–9, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8388\(96\)03049-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8388(96)03049-6).
4. T. Graham, On the occlusion of hydrogen gas by metals, *Proc. R. Soc. Lond.* **16** (1867) 422–427, doi: <http://dx.doi.org/10.1098/rspl.1867.0090>.
5. A. Züttel, A. Borgschulte, L. Schlapbach (Eds.), *Hydrogen as a Future Energy Carrier* – Wiley, 2008. URL: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-3527308172.html> (5. 10. 2016.)
6. A. Drašner, Ž. Blažina, Metalni hidridi. Opća svojstva, *Kem. Ind.* **36** (1987) 395–402.
7. A. Drašner, Ž. Blažina, Hidriranje intermetalnog spoja  $ZrFe_{1.5}Cr_{0.5}$ , *Kem. Ind.* **38** (1989) 273–276.
8. N. Biliškov, G. I. Miletić, A. Drašner, Structural and hydrogen sorption properties of  $SmNi_{5-x}Ga_x$  system – an experimental and theoretical study, *Int. J. Hydrog. Energy* **38** (2013) 12213–12222, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.154>.
9. B. Šorgić, A. Drašner, Ž. Blažina, Structural and hydrogen sorption properties of  $RENi_{5-x}Al_x$  (RE=Gd, Tb, Dy, Ho, Er and Y) alloys, *J. Alloys Compd.* **356-357** (2003) 501–504, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)01248-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8388(02)01248-3).
10. B. Šorgić, Ž. Blažina, A. Drašner, The  $RENi_4Ga$  (RE = Dy, Ho, Er) intermetallic Compounds – Crystal Structure and Hydride Properties, *Croat. Chem. Acta* **72** (1999) 567–574.
11. Ž. Blažina, B. Šorgić, A. Drašner, Structural and hydrogen sorption properties of  $RENi_4Ga$  (RE = Gd, Y and Tb) alloys, *J. Mater. Sci. Lett.* **17** (1998) 1585–1587, doi: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1006515826888>.
12. L. Schlapbach, A. Züttel, Hydrogen-storage materials for mobile applications, *Nature* **414** (2001) 353–358, doi: <http://dx.doi.org/10.1038/35104634>.
13. S. Orimo, Y. Nakamori, J. R. Eliseo, A. Züttel, C. M. Jensen, Complex Hydrides for Hydrogen Storage, *Chem. Rev.* **107** (2007) 4111–4132, doi: <http://dx.doi.org/10.1021/cr0501846>.
14. M. B. Ley, L. H. Jepsen, Y.-S. Lee, Y. W. Cho, J. M. Bellosta von Colbe, M. Dornheim, M. Rokni, J. O. Jensen, M. Sloth, Y. Filinchuk, J. E. Jørgensen, F. Besenbacher, T. R. Jensen, Complex hydrides for hydrogen storage – new perspectives, *Mater. Today* **17** (2014) 122–128, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mattod.2014.02.013>.
15. I. P. Jain, P. Jain, A. Jain, Novel hydrogen storage materials: A review of lightweight complex hydrides, *J. Alloys Compd.* **503** (2010) 303–339, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.04.250>.
16. N. Biliškov, in *Infrared Spectroscopy: Theory, Developments and Applications*, Nova Science Publishers Inc., 2014.
17. N. Biliškov, I. Halasz, E. Callini, A. Borgschulte, A. Züttel, in 9<sup>th</sup> International Symposium Hydrogen & Energy, A. Züttel (Ed.), 28 EMPA, Materials and Technology, 2015.
18. E. Callini, K.-F. Aguey-Zinsou, R. Ahuja, J. R. Ares, S. Bals, N. Biliškov, S. Chakraborty, G. Charalambopoulou, A.-L. Chaudhary, F. Cuevas, B. Dam, P. de Jongh, M. Dornheim, Y. Filinchuk, J. Grbović Novaković, M. Hirscher, T. R. Jensen, P. B. Jensen, N. Novaković, Q. Lai, F. Leardini, D. M. Gattia, L. Pasquini, T. Steriotis, S. Turner, T. Vegge, A. Züttel, A. Montoner, Nanostructured materials for solid-state hydrogen storage: A review of the achievement of COST Action MP1103, *Int. J. Hydrog. Energy* **41** (2016) 14404–14428, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.025>.
19. R. Krishna, E. Titus, S. Maryam, O. Olena, R. Sivakumar, G. Jose, A. Rajkumar, J. M. G. Sousa, A. L. C. Ferreira, J. Campos Gil, in *Hydrogen Storage*, J. Liu (Ed.), InTech, 2012.