

## Tehnologije proizvodnje vodonika korišćenjem solarne energije

MILOVAN M. MEDOJEVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,  
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad,  
JOVAN R. PETROVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,  
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad,  
NENAD M. MEDOJEVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,  
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad,  
MILANA S. MEDOJEVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,  
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad,

Stručni rad  
UDC: 621.357:546.11  
DOI: 10.5937/tehnika1601070M

*Imaju li u vidu da proizvodnja vodonika bazirana na obnovljivim izvorima energije, bez sumnje, predstavlja važan aspekt koji treba uzeti u obzir prilikom razmatranja potencijala ovog gasa, gde se kao posebno interesantne isti u tehnologije koje su bazirane na korišćenju solarne energije za proizvodnju istog, cilj ovog rada je ukazati na osnovne tehnološke putanje, sa mogućnošću kombinovanja, za proizvodnju vodonika baziranog na eksploataciji solarne energije, a to su: elektrohemijski, fotohemijski i termohemijski proces. Takođe, u radu je prikazana analiza navedenih tehnologija kako iz tehničkog tako i iz ekonomskog aspekta. Pored navedenog, rad ima za cilj da ukazuje na činjenicu da se generisanje vodonika korišćenjem obnovljivih izvora energije nameće kao logičan i pravilan način za uvođenje energije sunca u vidu hemijske energije.*

**Ključne reči:** solarna energija, vodonik, elektroliza, gorive ćelije

### 1. UVODNA RAZMATRANJA

Posmatrano u globalu, kao i imaju li u vidu trenutnu svetsku energetska situaciju, koja direktno i indirektno utiče na klimatske promene, izaziva životne sredine, međunarodne sukobe prouzrokovane potrebama nacija za energetskim resursima, kao i eksponencijalnim opadanjem rezervi fosilnih goriva, moderno društvo već uveliko razvija i implementira napredne energetske tehnologije bazirane na obnovljivim izvorima [1-10]. Kao posebno interesantne isti u se tehnologije koje su bazirane na korišćenju solarne energije za proizvodnju vodonika koji se već sada smatra gorivom budućnosti [3-13]. Posmatrano na duge staze, očekuje se da će vodonik eliminisati korišćenje fosilnih goriva, stvarajući i uslove za razvoj novih ekonomskih modela [3]. Proizvodnja vodonika bazirana na obnovljivim izvorima energije, bez sumnje, predstavlja važan aspekt koji treba uzeti u obzir prilikom razmatranja potencijala ovog gasa.

Potrebno je napomenuti da se proizvodnja vodonika može obezbediti i na način koji ne podrazumeva korišćenje istih energetskih tehnologija baziranih na obnovljivim izvorima energije [7, 11]. Međutim, moderno društvo sve više i više ukazuje potrebu za održivim razvojem, jer je postalo evidentno da postulati na kojima je baziran dosadašnji privredni, ekonomski, a i društveni razvoj, više ne mogu da obezbede željeni progres [1, 3, 8]. U današnje vreme, proizvodnja vodonika iz obnovljivih izvora energije postaje sve izraženija [1-16]. Generisanje vodonika korišćenjem obnovljivih izvora energije nameće se kao logičan i pravilan način za uvođenje energije sunca u vidu hemijske energije. U osnovi postoje tri tehnološke putanje, sa mogućnošću kombinovanja, za proizvodnju vodonika baziranog na eksploataciji solarne energije, a to su: elektrohemijski, fotohemijski i termohemijski proces [12, 14]. Osnovni cilj ovog rada jeste analiza navedenih tehnologija kako iz tehničkog tako i iz ekonomskog aspekta.

Adresa autora: Milovan Medojević, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6

Rad primljen: 18.08.2015.

Rad prihvaćen: 11.01.2016.

### 2. TERMODINAMIKA GORIVIH ĆELIJA - ELEKTROLIZERA

U nastavku su objašnjeni osnovni termodinamički procesi PEM gorivih ćelija o kojima će kasnije biti

nešto više reeno. Tako e, za druge tipove proces je nešto druga iji, ali principijalno isti [17-20]. Osnovna funkcija gorivih elija sa membranom na bazi polimera (kao i drugih tipova gorivih elija) bazira se na hemijskom procesu oksidacije i redukcije.

Spontana reakcija oksido-redukcije ostvaruje se prelaskom elektrona iz jednog hemijskog jedinjenja u drugo. Ako elektroni (iz vodonika) umesto da pre u direktno u jedinjenje koje treba redukovati (kiseonik), budu prinu eni da idu putem spoljašnjeg provodnika, uspostavi e se strujno kolo i izvršiti odre eni rad.

Na ovaj na in energija proistekla iz hemijske reakcije, odnosno energija izme u po etnog sanja reagenata (u ovom slu aju vodonika i kiseonika) i završnog stanja (vode), biva transformisana u elektri nu energiju. Da bi se otkrila priroda te energije, i shodno tome koli ina rada koju je mogu e realizovati polazi se od definicije slobodne energije (po Gibbs-u) [20, 21]. U gorivoj eliji je izvršena transformacija slobodne energije u elektri ni rad.

$$EMS = n \cdot F \cdot EMS = -\Delta G \quad (1)$$

Gde je  $n$  broj ekvivalentnih molova elektrona koji u estvuju u globalnoj reakciji (broj molova elektrona za broj molova vodonika u PEM je 2),  $F$  je Faradejeva konstanta (96.487 C/mol),  $EMS$  elektromotorna sila na terminalima gorive elije, dok je  $G$  varijacija slobodne energije. Dalje je:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (2)$$

Ovo važi na pritisku od 1atm (1.01325 bar) i jedini nim koncentracijama regenata. Za jednu PEM gorivu eliju napajanu sa vodonikom i kiseonikom koja proizvodi vodu u te nom stanju, reverzibilnom reakcijom dobija se [21]:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S = -285800 \frac{J}{mol} - 298 K \cdot -163.2 \frac{J}{mol \cdot K} = -237200 J/mol \quad (3)$$

Pa je maksimalna mogu a razlika na terminalima:

$$E_{rev} = - \frac{237200 \frac{J}{mol}}{2.96487 \frac{C}{mol}} = 1.229 V \quad (4)$$

Ovo važi uz uslov da je elektri no kolo otvoreno ( $I=0$ ). Kada se u kolu uspostavi struja u sistemu se javljaju fenomeni polarizacije (kontra EMS) koji dovode do pove anja temperature (disipacija) i shodno tome smanjuje se i efektivna razlika potencijala na terminalima gorive elije.

U realnom slu aju pritisak i koncentracija nemaju više standardne vrednosti, pa se izlazna EMS menja po zakonu Nernst-a [21]:

$$E = E_0 - \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \ln \frac{1}{H_2 \cdot O_2} \quad (5)$$

Efekte koje izaziva promena pritiska i temperature mogu e je uo iti ako se izvrši analiza varijacije Gibbs-ove slobodne energije variraju i temperaturu i pritisak:

$$\frac{\partial E}{\partial T}_P = \frac{\Delta S}{n \cdot F} \cdot e \quad \frac{\partial E}{\partial P}_T = \frac{-\Delta V}{n \cdot F} \quad (6)$$

Gde je  $n$  i dalje broj molova za PEM gorive elije, i ima vrednost 2, a  $V$  zapremina. Ako po emo od pretpostavke da je finalni proizvod reakcije voda u te nom stanju, i da je entropija u reakciji izme u vodonika i kiseonika negativna dobijamo da reverzibilni potencijal elije opada sa porastom temperature za približno 0.84 mV/C. Za istu reakciju promena zapremine je negativna, pa se dobija da sa porastom pritiska raste i reverzibilni potencijal elije. Sa druge strane porast temperature popravljja osobine elije, odnosno pove a va brzinu reakcije, smanjuje omsku polarizaciju, popravljja provodnost elektrolita-membrane, pove a va fenomene transfera kroz PEM i pove a va toleranciju na primese [20-21].

Opet, podizanjem radne temperature pove avaju se problemi korozije, degradiraju se elektrode i nestaje elektrolit usled isparavanja. Visoki pritisak stvara probleme materijalima od kojih je napravljana elija, što zahteva eš u kontrolu zaptivanja i kvalitetniju konstrukciju. Faradejev zakon elektrolize glasi: Masa supstance proizvedene ili potrošene od jedne elektrode proporcionalna je elektri nom protoku kroz eliju. Ekvivalentne mase razli itih supstanci bi e proizvedene ili potrošene od jedne elektrode pri protoku unapred definisanog elektri nog punjenja kroz eliju. Prime-njeno na slu aj PEM gorivih elija lako se dolazi do relacije koja odre uje eletri nu struju i koli inu potrošenog vodonika u adekvatnoj reakciji:

$$F_{H_2} \frac{mol}{s} = \frac{I \cdot A = \frac{C}{s}}{2 \cdot F \frac{C}{mol}} \quad (7)$$

gde je  $F_{H_2}$  molarni protok vodonika, dok dvojka pro-izilazi iz injenice da se pri redukciji svakog mola vodonika osloba aju po 2 elektrona.

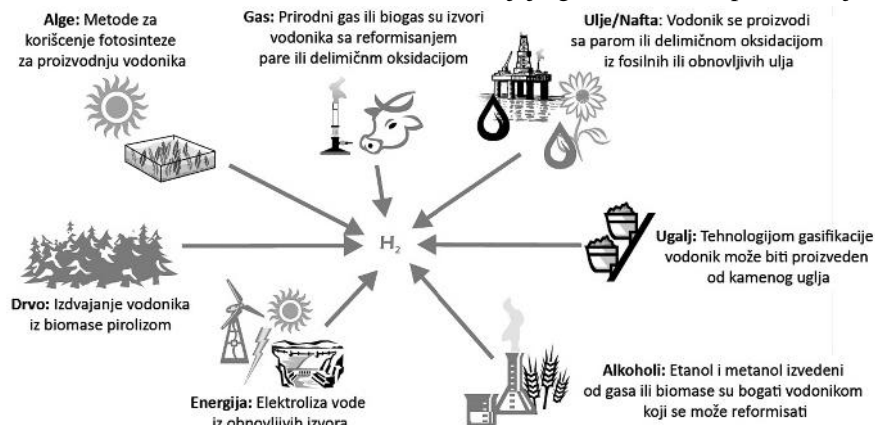
### 3. TEHNOLOGIJE I TRENDOWI U PROIZVODNJI VODNIKA

Na elno, proizvodnja vodonika zavisi od koriš-ene sirovine [11, 14]. Tu spadaju klasi ni konvencionalni resursi, kao što su prirodni gas i ugalj, obnovljivi izvori, kao što su biomasa i voda uz integrisanu implementaciju sistema za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora (npr. energija Sunca, vetra, talasa ili vodotokova). Razli iti tehnološki procesi se koriste, uklju uju i hemijske, biološke, elektroliti ke, fotoliti-ke i termohemijske procese [3, 11, 14]. Svaka teh-nologija je u razli itoj fazi razvoja, i svaka nudi je-dinstvene prilike, benefite ali i izazove. Lokalna do-stupnost sirovina, zrelost tehnologije, tržišne aplikacije

i tražnja, politika, kao i troškovi, direktno utiču na izbor različitih opcija za proizvodnju vodonika (slika 1).

Nekoliko tehnologija već su dostupne na tržištu za industrijsku proizvodnju vodonika. Prva komercijalna

tehnologija, koja datira iz kasnih 1920-ih, je elektroliza vode za proizvodnju istog vodonika. U 1960-im, industrijska proizvodnja vodonika polako se orijentira prema korišćenju fosilnih goriva, koja i danas predstavljaju glavni izvor za proizvodnju vodonika [14].

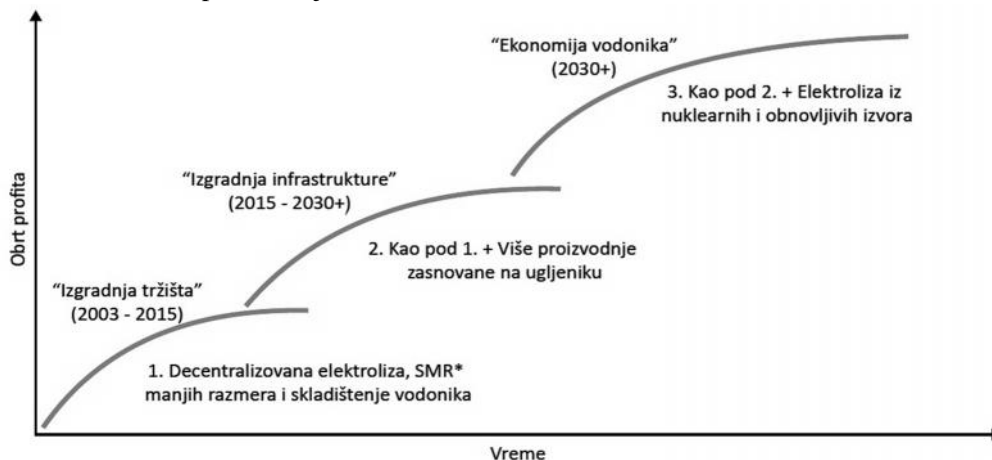


Slika 1 – Pregled tehnoloških procesa u zavisnosti od korišćenih sirovina

Na slici 2, ilustrovana je budućnost razvoja tehnologija za proizvodnju vodonika [3, 8, 14].

Proizvodnja vodonika na veliko je moguća i verovatna tek u malo daljoj budućnosti, dok u kratkom i srednjem roku, opcije za proizvodnju vodonika, fokusirane su na distribuiranu proizvodnju elektrolizom

iz vode, kao i tehnologijama reformisanja i gasifikacije prirodnog gasa i uglja [8, 11]. Pojava velikih centralizovanih proizvodnih pogona verovatna je u nekoj od kasnijih razvojnih faza, gde će takva postrojenja uglavnom biti zasnovana na eksploataciji biomase i fosilnih goriva sa mogućnošću u skladištenja CO<sub>2</sub> [14].



\*SMR - Steam Methane Reforming

Slika 2 - Trendovi u razvoju proizvodnje vodonika - dugoročna perspektiva

Prema Sporazumu o implementaciji vodonika (HIA) [14], osnovne aktivnosti za proizvodnju vodonika su:

- H<sub>2</sub> iz fosilnih goriva (postrojenja velikih razmera sa skladištenjem CO<sub>2</sub> i distribuirana postrojenja manjih razmera).
- H<sub>2</sub> iz biomase.
- Fotoelektroliza (fotoliza).
- Foto - biološka proizvodnja vodonika (biofotoliza).

Takođe, najnovija oblast fokusa u okviru HIA je proizvodnja vodonika na visokim temperaturama.

#### 4. OSVRT NA TEHNOLOGIJE ZA PROIZVODNJU VODNIKA KORIŠĆENJEM SOLARNE ENERGIJE

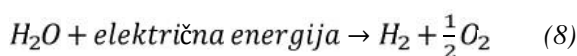
Kao što je već pomenuto, u osnovi postoje tri osnovna tehnološka procesa, sa mogućnošću u kombinovanju, za proizvodnju vodonika baziranog na eksploataciji solarne energije, a to su: elektrohemijski, fotohemijski i termohemijski proces, a koji su detaljnije analizirani u ovom radu.

#### 4.1 Proizvodnja vodonika korišćenjem solarne energije za cepanje molekula vode (elektroliza)

Vodonik se može proizvesti cepanjem/razdvajanjem molekula vode različitim procesima. U ovom radu razmatrani su samo oni tehnološki procesi koji integrišu korišćenje solarne energije za proizvodnju vodonika kao što su elektroliza vode, fotoliza, fotobiološka proizvodnja i razlaganje molekula vode uz prisustvo visoke temperature [4, 5, 13, 15].

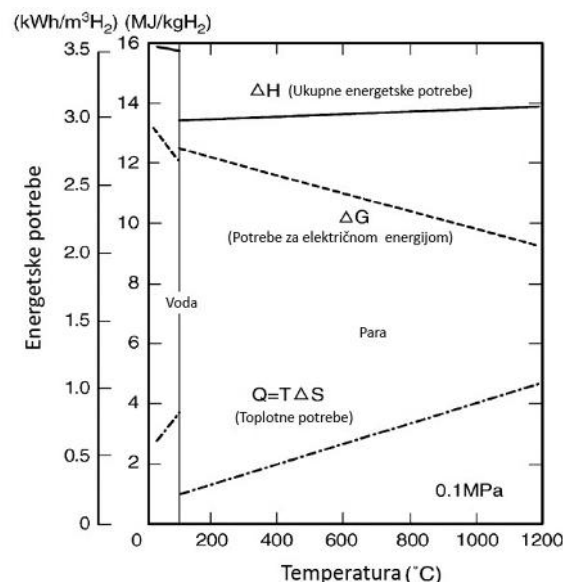
##### Elektroliza vode

Elektroliza vode je elektrohemijski proces u kome se molekuli vode razgrađuju na vodonik i kiseonik dovođenjem električne energije, kao što je prikazano jednačinom (8).



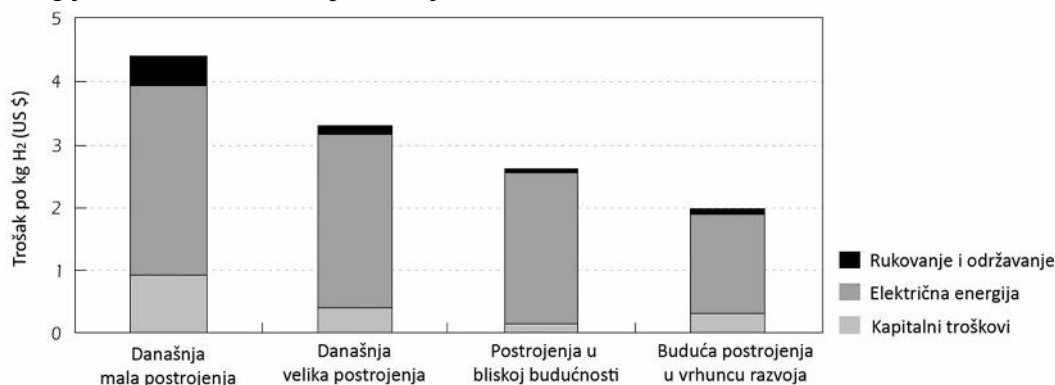
Ukupna energija koja je potrebna za elektrolizu vode neznatno se povećava sa temperaturom, dok potrebna električna energija opada (slika 3) [13]. Imaju i to u vidu, visoko temperaturni proces elektrolize vode pogodan je u slučajevima gde se usled nekog drugog procesa stvara određena količina toplote kao nusproizvod, odnosno tzv. otpadna toplota. Takođe, zahtevanu količinu toplote moguće je obezbediti korišćenjem solarnih kolektora, kao i fotonaponskih sistema za proizvodnju električne energije koja se kao eksergija u svakom momentu može transformisati u drugi vid energije. Ovo je posebno važno globalno, jer se većina proizvodnje električne energije zasniva na fosilnim gorivima sa relativno niskim stepenom korisnog dejstva niza energetskih transformacija. Ukupna potrebna energija za elektrolizu vode predstavlja zbir

električne i toplotne energije. Slika 3 pokazuje da potrebna električna energija opada kada temperatura raste. Odnos između električne energije i ukupne energije je 93% na 100°C, ali se ova vrednost smanjuje na oko 70% kada se elektroliza obavlja na 1000°C. Iako je evidentno, korisno je napomenuti da odvijanje reakcije na višim temperaturama zahteva manju količinu električne energije na ulazu reakcije [13, 14].



Slika 3 - Energetske potrebe elektrolize sa vodom i parom

Budući, potencijalni troškovi proizvodnje vodonika elektrolizom vode prikazani su na slici 4, gde se jasno ukazuje na trend mogućnosti za smanjenje proizvodnih troškova.



Slika 4 - Budući i potencijalni troškovi proizvodnje vodonika elektrolizom vode

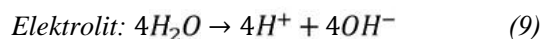
##### Alkalna elektroliza

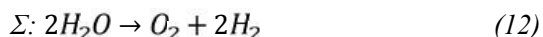
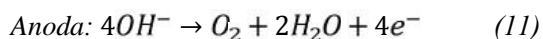
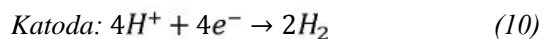
Uređaji za alkalnu elektrolizu koriste vodeni rastvor KOH (kalijum hidroksid) kao elektrolit koji obično cirkuliše elektrolitičkim celijama.

Uređaji za alkalnu elektrolizu su pogodni za stacionarne primene i dostupni su u varijantama sa radnim pritiscima do 25 bara [3, 14].

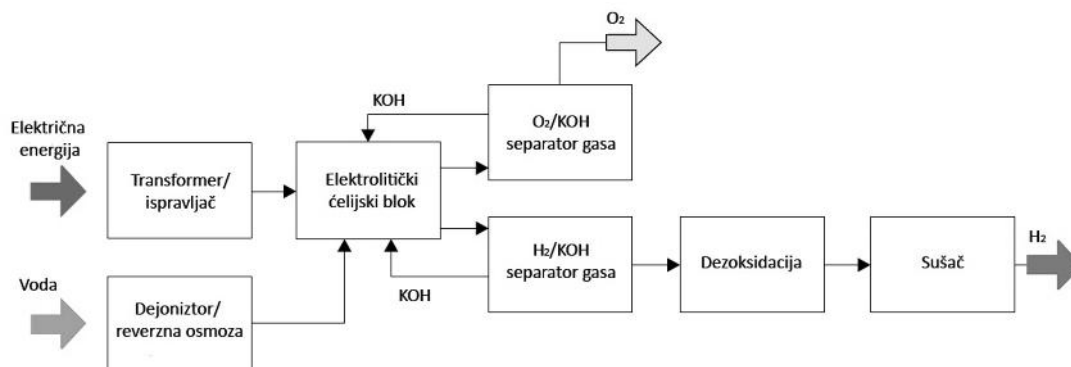
Alkalna elektroliza je zrela tehnologija, sa značajnim operativnim rezultatima primene u industrijskim aplikacijama, koja omogućava rukovanje i upravljanje na daljinu.

Unutar celije za alkalnu elektrolizu odvijaju se reakcije date jednačinama od (9) do (12).





Komercijalni uređaji obično se sastoje od određene količine elektrolita koji je raspoređen u ćelijske stekove. Osnovne komponente ovih uređaja prikazane su na slici 5.

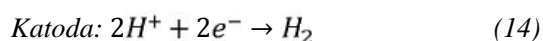
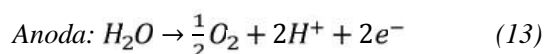


Slika 5 - Dijagram toka procesa alkalne elektrolize

Kao i kod elektrolize vode potrebna količina električne energije zahtjevana za odvijanje procesa alkalne elektrolize može se obezbediti uz pomoć adekvatno dimenzionisanog fotonaponskog sistema ili pak CSP<sup>1</sup> solarnog sistema u slučaju postrojenja većih razmera, odnosno nadogradnja postojećih solarnih elektrana u cilju proizvodnje vodonika. Glavni izazov za istraživanje i razvoj u budućnosti jeste smanjenje troškova proizvodnje ovih uređaja sa većim energetsom efikasnošću.

#### Elektroliza sa polimernom membranom kao elektrolitom (PEM)

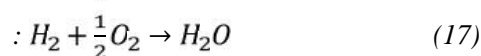
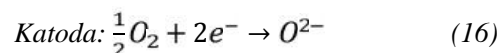
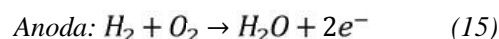
Princip funkcionisanja PEM elektrolize predstavljen je jednačinama (13) i (14). Ovaj tip gorivnih ćelija je specifičan, i razlikuje se od ostalih tehnologija. Karakteristična posebnost je vrsta elektrolita, koji je u ovom slučaju u stvari specijalno konstruisana polimerna membrana – plastična folija [14, 17-21]. Ona je karakteristična po tome što je za elektrone nepropusna barijera, a za jone maksimalno provodna. Uređaji za PEM elektrolizu ne zahtevaju ni elektrolit, što znatno pojednostavljuje njihovu izradu. Ovi uređaji mogu potencijalno biti dizajnirani za radne pritiske do nekoliko stotina bara, a pogodni su i za stacionarne ali i mobilne aplikacije. Glavni nedostatak ove tehnologije je ograničen vek trajanja membrane, dok su glavne prednosti ove tehnologije u odnosu na alkalnu elektrolizu povećana bezbednost zbog odsustva KOH elektrolita i kompaktniji dizajn zbog viših gustina i većih radnih pritisaka [14].



Sa relativno visokim troškovima, niskim kapacitetima, male efikasnosti i kratkim životnim vekom, uređaji bazirani na ovoj tehnologiji još su u razvoju u poređenju sa tehnologijom alkalne elektrolize. Očekuje se da se efikasnost PEM uređaja može znatno poboljšati dodatnim usavršavanjem i razvojem materijala, kao i dizajna elemenata ćelijskih stekova.

#### Visoko temperaturna elektroliza

Visoko temperaturna elektroliza je zasnovana na tehnologiji gorivnih ćelija sa visokom radnom temperaturom. Količina električne energije potrebna za cepanje molekula vode na temperaturi od 1000°C, znatno je manja nego kod elektrolize na temperaturi od 100°C. To znači da visoko temperaturni elektrolizer može da radi sa znatno višim stepenom efikasnosti procesa nego nisko temperaturni elektrolizer. Gorivne ćelije sa vrstnim oksidima (SOFC) su trenutno vodeća tehnologija i po tehničkim potencijalima i po mogućnostima aplikacije. Njihova radna temperatura je veoma visoka i kreće se u opsegu 800 – 1000°C. Međutim, traže se rešenja da se svi procesi uspešno odigravaju i na 600°C. Kod ovih vrsta gorivnih ćelija elektrolit je keramička struktura visokih performansi. Anoda je konstruisana od CERMET-a, metalizovane keramike na bazi nikla, dispergovanog po stabilizovanom ZIRCONIU, dok se na katodi nalazi katalizator u obliku dioksida [4, 10, 14]. Procesne reakcije na elektrodama i unutar ćelije su:



Na ovim temperaturama, elektrode reakcije su reverzibilne, a reakcije ćelije mogu se lakše preokrenuti

<sup>1</sup>CSP – skraćeno od eng. Concentrating Solar Power

na reakciju elektrolize. Trenutno su u toku pokušaji da se razviju sistemi kojima se sva ili deo električne energije potrebne za funkcionisanje mogu obezbediti solarne energije, čime se značajno smanjuje potrošnja električne energije iz konvencionalnih izvora.

Ono što je posebno interesantno spomenuti jeste mogućnost integracije ove tehnologije sa sistemom solarnih tornjeva. Solarni tornjevi pretvaraju Sunčevu energiju u električnu energiju tehnologijom koja se koristi mnoštvom velikih ogledala koja prate Sunce (heliostati) radi fokusiranja sunčevih zraka na prijemnik koji se nalazi na vrhu solarnog tornja. Radni fluid se zagreva u prijemniku i koristi se za stvaranje pare koja se dalje koristi u konvencionalnim turbinskim generatorima za proizvodnju električne energije. Ranije konstrukcije solarnih tornjeva koristile su paru kao radni fluid, dok se u sadašnjim konstrukcijama koristi rastop nitrata soli zbog boljeg prenosa toplote i skladišnih karakteristika.

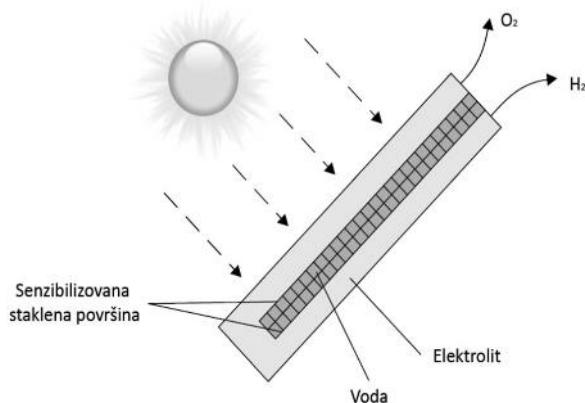
Sistem centralnog prijemnika teoretski radi na veoma visokim temperaturama i zbog toga ima mnogo veći stepen efikasnosti od paraboličnih konkavnog sistema. Ipak, sistem može biti ekonomičan samo pri većim kapacitetima (100 MW i više) [22]. Apsorber centralnog prijemnika može da zagreva radni fluid ili intermedijalni fluid do temperature u opsegu od 600 - 1000°C, koji može da služi za pokretanje postrojenja koje radi po Rankinovom ili Brajtonovom ciklusu. Solarno polje čine stotine heliostata, a svaki heliostat predstavlja pokretno konkavno ogledalo reflektujuće površine od oko 120 m.

#### 4.2. Foto-elektroliza (fotoliza)

Moderna istraživanja omogućila su nastanak kombinovanih sistema koji podrazumevaju integraciju fotonaponskih solarnih panela sa odgovarajućim tehnologijama elektrolize u cilju proizvodnje vodonika [3, 5]. Ovi sistemi su danas komercijalno dostupni a njihovo funkcionisanje je prilično jednostavno i pouzdano. Takođe, ovi sistemi nude određenu fleksibilnost, jer se kao rezultat njihovog korišćenja može generisati električna energija (kod fotonaponskog sistema), odnosno vodonik (u elektrolizeru).

Direktna foto-elektroliza predstavlja naprednu alternativu fotonaponske elektrolize kombinovanjem oba procesa u jednom uređaju. Ovaj princip je ilustrativno prikazan na slici 6. Fotoliza vode je proces gde se direktna svetlost koristi za cepanje molekula vode na vodonik i kiseonik [14]. Ovi sistemi nude veliki potencijal za smanjenje troškova elektrolitičke proizvodnje vodonika, u poređenju sa konvencionalnim dvostepenim tehnologijama. Fundamentalni i primenjeni napor sektora za istraživanje i razvoj nauke o materijalima i sistemski inženjering foto-elektrohemijskih celija evidentni su širom sveta, sa najmanje

13 zemalja OECD-a koje aktivno razvijaju i implementiraju projekte sa fokusom na unapređenje ove tehnologije [14].



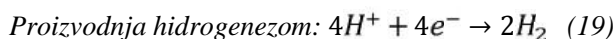
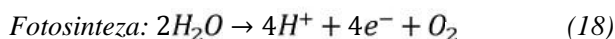
Slika 6 - Princip rada foto-elektrolitičke celije

Trenutna efikasnost uređaja za direktnu fotolizu, dokazana u laboratorijskim uslovima, iznosi 16% [5]. Trenutno je fokus na eksperimentisanju sa različitim materijalima u cilju povećanja efikasnosti procesa kao i na otkrivanju novih materijala sa istim ciljem.

#### 4.3. Foto-biološka proizvodnja vodonika (biofotoliza)

Foto-biološka proizvodnja vodonika se zasniva na dva procesa: fotosinteze (18) i proizvodnje vodonika hidrogenezom (19) kod, na primer, zelenih algi i cijano bakterija [3, 14].

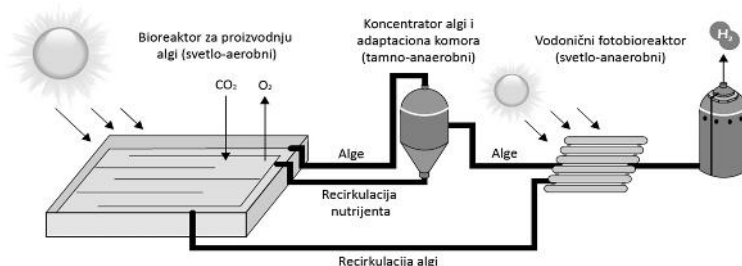
Ova tehnologija je još u razvoju ali se očekuje da dosadašnji rezultati istraživanja dovedu do dugoročnog rešenja za obnovljivu proizvodnju vodonika, što je od vitalnog značaja za bolje razumevanje i shvatanje prirodnih procesa proizvodnje vodonika.



Fotosinteza algi i proizvodnja vodonika su seštrinski procesi. Oba procesa počinju sa cepanjem molekula vode na kiseonik, elektrone i protone usled prisustva Sunčeve svetlosti. Protoni i elektroni zatim ulaze u narednu enzimsku reakciju. U prvom slučaju, "normalne" druge reakcije dolazi do vezivanja ugljen dioksida i proizvodnje skroba, a u drugom, alternativnom, dolazi do reakcije čiji je rezultat proizvodnja molekula vodonika.

Usled Sunčeve svetlosti, reakcija cepanja molekula vode započinje odmah. Međutim, postoji određeno vremensko kašnjenje (od nekoliko minuta) potrebno da svetlost aktivira enzime za vezivanje ugljenika. Elektroni proizvedeni usled cepanja molekula vode mogu ugroziti ili uništiti organizme ako se višak energije ne odvede iz procesa.





Slika 7 - Princip proizvodnje vodonika biofotolizom

Sa druge strane, alge mogu započeti alternativnu reakciju koja kombinuje protone i elektrone sa ciljem formiranja molekula vodonika, kako bi se oslobodile nepotrebne energije. To je privremeni, alternativni proces koji obično traje samo nekoliko minuta, a koji je namijenjen u cilju da iskoristi iz razloga jer generisanjem dovoljne količine kiseonika iz reakcije cepanja molekula vode, alge su primorane da prekinu proizvodnju vodonika i nastave sa reakcijom vezivanja ugljenika sa ciljem proizvodnje skroba koji predstavlja njihov izvor hrane.

#### 4.4. Visokotemperatursko cepanje molekula vode

Proces visokotemperaturskog cepanja molekula vode odvija se na temperaturi od približno 3000°C. Na ovoj temperaturi, 10% vode se bespovratno razgrađuje, dok se preostalih 90% može reciklirati [10]. Osnovni cilj daljih istraživanja vezanim za ovu tehnologiju jeste smanjenje temperature gdje se predlažu i razmatraju drugi visokotemperaturski procesi za cepanje molekula vode kao što su:

- Termohemijski ciklusi
- Hibridni sistemi sa termičkim i elektrolitičkim dekompozicijom
- Direktna katalitička dekompozicija molekula vode sa separacijom na principu keramičke membrane (termofizički proces)
- Plazmohemijska dekompozicija molekula vode u dvostepenom CO<sub>2</sub> ciklusu.

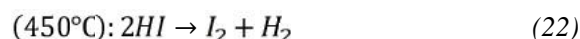
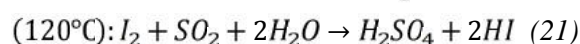
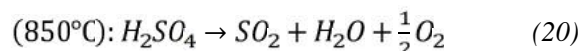
Očekivana efikasnost pomenutih procesa iznosi oko 50% [10], što bi dugoročno dovelo do drastičnog smanjenja troškova proizvodnje vodonika. Osnovni

razlog zabrinutosti stručnjaka predstavljaju karakteristike korištenih materijala i njihova otpornost na koroziju pri visokim temperaturama, rad separacione membrane pri visokoj temperaturi, kao i ponašanje izmjenjivača toplote i uređaja za skladištenje u takvim uslovima.

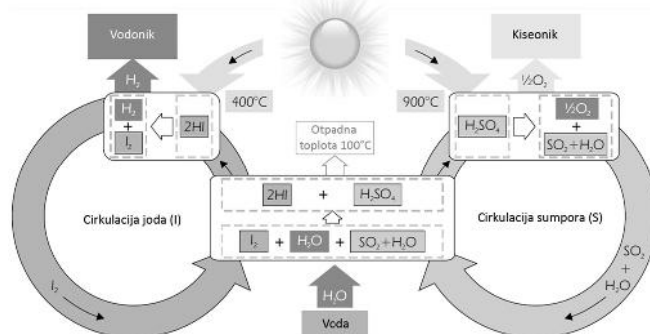
#### Termohemijsko cepanje molekula vode

Pod termohemijskim cepanjem molekula vode smatra se konverzija vode na vodonik i kiseonik nizom termički pogonjenih hemijskih reakcija.

Termohemijski ciklusi za cepanje molekula vode poznati su već 35 godina, a intenzivno su proučavani tokom kasnih 1970-ih i 1980-ih. Iako ne postoji sumnja u tehničku izvodljivost i njihovu relativno visoku efikasnost, potrebno je dosta napora kako bi ova tehnologija postala i komercijalno dostupna po prihvatljivoj ceni. Najpoznatiji primer termohemijskog procesa je sa ciklusom jod/sumpor (slika 8.), predstavljen jednačinama (20), (21), (22) i (23).



Glavni izazovi za unapređenje ovog ciklusa odnose se na razvoj tehnologije „hvatanja“ vodonika iz termički pogonjenih reakcija, kao i na inačice odvijanja željene reakcije uz eliminisanje nusreakcija, upotrebu štetnih supstanci i pojave korozije [10,14].



Slika 8 - Princip rada jod/sumpor termohemijskog ciklusa

## 5. ZAKLJUČAK NA RAZMATRANJA

Korišćenje vodonika u energetske svrhe nameće se kao logičan i održiv način u procesima zadovoljenja eksponencijalno rastućih energetskih potreba pre svega zato što je generalno lako dostupan u smislu da generalno egzistira u izobilju. Takođe, sagorevanjem vodonika praktično se ne emituju štetne supstance u atmosferu usled čega ne utiče na zagađenje životne sredine. Vodonik karakteriše visoka donja toplotna moć što ga čini energetski efikasnim gorivom, a ono što je posebno važno naglasiti, vodonik se smatra obnovljivim izvorom energije iz razloga što ga je moguće proizvesti po potrebi oslanjajući se na ne tako mali broj postojećih tehnologija za njegovo generisanje. Sa druge strane, postojeće tehnologije za proizvodnju vodonika nisu još uvek usavršene i ekonomične, dok je sam vodonik nestabilan kada se nalazi u gasnom stanju. Imajuć u vidu da je potrebno obezbediti određenu količinu energije u procesima generisanja vodonika, kao i efektivne načine za njegovu ekstrakciju i skladištenje, šira primena korišćenja vodonika još uvek ne predstavlja održiv način zadovoljenja energetskih potreba jer je proces njegovog dobijanja dugotrajan i skup. Pored navedenog, potrebno je stvoriti uslove za adekvatno transportovanje vodonika jer je previše lak i nemoguće ga je transportovati konvencionalnim cevovodima, što značajno poskupljuje njegovo korišćenje ako se radi o većim količinama. Ipak, konstantan razvoj velikog broja tehnologija, posebno onih što integrišu obnovljive izvore energije kao što je solarna energija znatno utiču na razvoj ekonomije vodonika u budućnosti.

## LITERATURA

- [1] Zamfirescu C, Dincer I, Assessment of a new integrated solar energy system for hydrogen production, *Solar Energy* 107, p. 700–713, 2014.
- [2] Jacobsson T. J, Fjällström V, Edoff M., Edvinsson T., CIGS based devices for solar hydrogen production spanning from PEC-cells to PV-electrolyzers: A comparison of efficiency, stability and device topology, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 134, p. 185–193, 2015.
- [3] Dincer I, Novel hydrogen production technologies and applications, *International journal of hydrogen energy* 35, p. 4787, 2010.
- [4] Lemus R. G, Martinez Duarte J.M., Updated hydrogen production costs and parities for conventional and renewable technologies, *International journal of hydrogen energy* 35, p. 3929 – 3936, 2010.
- [5] Wang Z, Roberts R. R, Naterer G. F, Gabriel K. S, Comparison of thermochemical, electrolytic, photoelectrolytic and photochemical solar-to-hydrogen production technologies, *International journal of hydrogen energy* 37, p. 16287 – 16301, 2012.
- [6] Rabady R. I, Solar spectrum management for effective hydrogen production by hybrid thermo-photovoltaic water electrolysis, *International journal of hydrogen energy* 39, p. 6827 – 6836, 2014.
- [7] He F, Li F, Hydrogen production from methane and solar energy: Process evaluations and comparison studies, *International journal of hydrogen energy* 39, p. 18092 – 18102, 2014.
- [8] Dincer I, Acar C, Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability, *International journal of hydrogen energy* xxx, p. 1 – 18, 2014.
- [9] Lacko R, Drobni B, Mori M, Sekavnik M, Vidmar M., Stand-alone renewable combined heat and power system with hydrogen technologies for household application, *Energy* 77, p. 164-170, 2014.
- [10] Chen J, Yang D, Song D, Jiang J, Ma A, Hu M.Z, Ni C, Recent progress in enhancing solar-to-hydrogen efficiency, *Journal of Power Sources* 280, p. 649-666, 2015.
- [11] Holladay J. D, Hu J, King D. L, Wang Y, An overview of hydrogen production technologies, *Catalysis Today* 139, p. 244–260, 2009.
- [12] Herzog A, Tatsutani M, A Hydrogen Future?: An Economic and Environmental Assessment of Hydrogen Production Pathways, *Natural Resources Defense Council*, p. 23, 2005.
- [13] Suárez-González M. A, Blanco-Marigorta A. M, Peña-Quintana J. A, Review on hydrogen production technologies from solar energy, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11)*, Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2011.
- [14] IEA, Hydrogen production and storage: R&D Priorities and Gaps, *IEA Publications*, 2006.
- [15] Quaschnig V, Trieb F, Solar thermal power plants for hydrogen production, *HYPOTHESIS IV Symposium*, Stralsund, Germany, p. 198-202, 9-14 September 2001.
- [16] Šingliar M, Solar energy using for hydrogen production, *Petroleum & Coal* 49 (2), p. 40-47, 2007.
- [17] Sieniutycz S, Fuel Cell Processes: Nonlinear Electrochemical and Thermal Diffusion Phenomena, *Chemical Engineering Transactions* 8, 269-274, 2005.
- [18] Sieniutycz S, Kuran P, Modeling thermal behavior and work flux in finitrate systems with radiation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, p. 3264-3283, 2006.



- [19] Sieniutycz S., Complex chemical systems with power production driven by mass transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52, p. 2453-2465, 2009.
- [20] Sieniutycz S., Fuel cells as energy systems: efficiency, power limits and thermodynamic behavior, *Journal of Energy and Power Engineering* 5, p. 17-28, 2011.
- [21] Rayment C, Sherwin S, *Introduction to Fuel Cell Technology*, University of Notre Dame, 156 s, 2003.
- [22] Gvozdenac D, Nakom i -Smaragdakis B, Gvozdenac-Urošević B, *Obnovljivi izvori energije*, FTN izdavaštvo, Novi Sad, 2010.

## SUMMARY

### SOLAR DRIVEN TECHNOLOGIES FOR HYDROGEN PRODUCTION

*Bearing in mind that the production of hydrogen based on renewable energy sources, without doubt, is an important aspect to be taken into account when considering the potential of this gas, where as particularly interesting technologies stand out the ones which are based on the use of solar energy to produce hydrogen. The goal of this paper provides basic technological trajectories, with the possibility of combining, for solar driven hydrogen production, such as: electrochemical, photochemical and thermochemical process. Furthermore, the paper presents an analysis of those technologies from a technical as well as economic point of view. In addition, the paper aims to draw attention to the fact that the generation of hydrogen using renewable energy should be imposed as a logical and proper way to store solar energy in the form of chemical energy.*

**Key words:** solar energy, hydrogen, electrolysis, fuel cells