

Предговор

Задњих неколико година је веома нагло повећан интерес за водоник у енергетици. Европска Унија је поставила циљ да до 2050. године у њеном укупном енергетском билансу водоник учествује са 13-14%. Слична је ситуација и у другим водећим економијама свету и у осталим земљама, уопште. У питању су врло значајни политички, технолошки и економски аспекти ове концепције развоја енергетике. Пратећи ова кретања, Србија такође почиње да разматра место водоника у националној енергетској политици. У том циљу, за заинтересоване чланове АИНС, и јавности, ИО АИНС је пре неколико месеци затражио од проф. М. Аџића да припреми краћи материјал о водонику, који следи у наставку.

М. Аџић овом приликом изражава своју захвалност проф. М. Месаровићу, проф. Н. Ђајићу, проф. Б. Гргуру, као и члановима МОЕ, који су прочитали рукопис и својим коментарима допринели да буде побољшан и коначно уобличен.

ВОДНИК У ЕНЕРГЕТИЦИ

Увод

Светски енергетски систем се мења брже него икада раније, а обновљиви извори енергије су у фокусу глобалног политичког деловања. Форсирање обновљивих извори енергије је резултат политике засноване на концепту смањења утицаја гасова стаклене баште, пре свега емисије CO₂, на климу, потреби за енергетском независношћу, сигурношћу и диверсификацији извора енергије. Ово снажно утиче на промоцију, развој и коришћење обновљивих извора енергије, пре свега енергије ветра, сунца и биомасе. Дилема је колико томе доприносе мање експонирани разлози: геополитички, безбедносни, економски, протекционизам, потискивање произвођача фосилних горива. Маргинализује се и измиче пажњи чињеница да тренутно преко 80% светске примарне енергије обезбеђују фосилна горива, која ће, процењује се, задржати примат и 2050. године.

Концепт и политика борбе за „зелену планету“ су формализовани и општеприхваћени Париским климатским споразумом из 2015. године. До данас је преко 190 земаља ратификовало овај споразум којим се подржавају одрживи развој и обновљиви извори енергије. У наставаку ове политике, водоник је 2017. године препознат као обећавајуће решење које испуњава већину циљева Париског споразума. Водоник је лансиран као звезда 2017. године на Светском економском форуму у Давосу, када је тринаест светских водећих компанија у области енергије, саобраћаја, финансија и индустрије основало „Hydrogen Council“ и покренуло глобалну иницијативу са циљем да се значајно повећају улагања у развој и комерцијализацију водоника и горивних ћелија. Ништа мање значајна је одлука јапанске Владе, исте 2017. године, да Јапан постане „водонично друштво“. Нешто касније је и Европска Унија промовисала документ „Going climate neutral by 2050“.

У складу са овим концептом, задњих десетак година долази до наглог повећања броја инсталираних соларних и ветро-енергетских система у свету, тако да неке земље могу да задовоље добар део својих енергетских потреба из обновљивих извора енергије. Непредвидивост производње електричне енергије из ветар-сунце извора може да доведе до проблема балансирања производње и потрошње. Једно од перспективних решења овог

проблема је конверзија вишка произведене и складиштење електричне енергије у потенцијалну хемијску енергију водоника. Водоник је врло погодан за складиштење, конверзију и пренос енергије, а еколошки је повољан, јер у процесу реакције са кисеоником ослобађа воду. С обзиром да горивне ћелије углавном користе водоник као гориво за производњу електричне енергије, нашле су се на главној сцени светске енергетике заједно са њим.

Производња водоника

И поред тога што је најраспрострањенији елемент у природи, слободног водоника на Земљи има врло мало. Водоник који се производе користи се највећим делом као индустријска сировина. Више од 95% произведеног водоника се користи за производњу вештачког ђубрива, у хемијској, нафтној и индустрији хране, у металургији, електронској, фармацеутској и индустрију неметала, као и за друге индустријске гране и потребе. Као носилац енергије, односно гориво, водоник се примарно користи за производњу електричне енергије у горивним ћелијама, за погон возила и пловила и у специфичним индустријским процесима. Нема детаљних података о светској производњи водоника. Постоје процене на бази годишњих потреба појединих индустријских грана. Приближна процена је да се у свету произведе између 90 и 200 милиона тона водоника годишње.

Индустријска производња водоника је углавном заснована на термо-хемијским процесима развијаним два века, који као сировину користе фосилна горива и биомасу. Преко 95% произведеног водоника добија се из фосилних горива. Састав продуката прераде зависи од процеса, сировина и радних параметара. У општем случају продукте чине CO , H_2 , CH_4 , CO_2 , O_2 , N_2 . Уколико се као сировина користи угаљ, могуће је присуство и других компоненти, зависно од елементарног састава угља. Важно је имати у виду да је овим процесима прераде фосилних горива својствена емисија CO_2 који не представља угљенично неутрални продукт.

Реформисање природног гаса је тренутно економски најповољнији, најефикаснији и најчешћи метод производње водоника. Степен корисности је у распону 65 – 85%. Гасификацијом угља и биомасе у гасогенераторима, добија се генераторски гас. Степен корисности се креће у опсегу 70 до 85%. Добијени гасовити продукти се подвргавају пречишћавању и потом користе као гасовито гориво или се издвајају поједине компоненте, као водоник, CO_2 и друге. За производњу водоника користи се 6% укупне светске потрошње природног гаса и 2% укупне светске потрошње угља. У Србији, нафтна и индустрија вештачких ђубрива су највећи потрошачи водоника. Само Азотара Панчево је производила више десетина хиљада тона водоника годишње.

Електролиза воде је такође врло развијен поступак за производњу водоника чији су продукти H_2 и O_2 . У условима вишка произведене електричне енергије из обновљивих извора, пре свега ветра и сунца, електролиза воде постаје атрактивна метода за производњу водоника. Степен корисности се тренутно креће у опсегу 70 - 80% и потрошњом електричне енергије од ~50 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$. За електролизу воде могуће је користити и реверзибилни рад горивних ћелија. Степен корисности горивних ћелија са електролитом на бази полимера (PEMFC) је до 65%, а горивних ћелија на бази чврстих оксида (SOFC) до 70%. Водоник је могуће произвести и фотобиолошким процесима, разлагањем воде на високој температури, али су од мањег значаја за масовну производњу водоника. Сви поменути процеси производње водоника су предмет сталног усавршавања у циљу смањења трошкова и повећања ефикасности.

Цена водоника је од примарног значаја за употребу у енергетске сврхе. У САД, цена водоника 2005. године је била 0,037 \$/MJ, да би у 2015. била 0,030 \$/MJ. Одељење за енергетику при влади САД је покренуло иницијативу да до 2030. године производна цена водоника из обновљивих извора енергије буде око 1\$/kg. Ова цена по јединици енергије је тренутно 3 пута већа у односу на цену енергије природног гаса на берзи у САД. Имајући у виду да се ради о берзанским производима, флукуације могу у врло кратком времену да измене цене природног гаса и водоника. Већ неколико година се водоник за потребе саобраћаја у Немачкој продаје по 9,5 € /kg, или 11,3 \$/kg, што је за ред величине већа цена у односу на циљану у САД за 2030. годину.

Напомена: Зависно од коришћеног енергетског извора, сировине и примењеног процеса производње водоника, одомаћили су се скраћени називи за произведени водоник: зелени водоник – произведен електролизом, при чему је потребна електрична енергија добијена из обновљивих извора енергије, ветра и сунца. Дилема је да ли ту спада и нуклеарна енергија, као и питање биомасе чија се обновљивост мери деценијама. Плави водоник - произведен прерадом фосилних горива, а ослобођени CO₂ се издваја, складишти или користи. Тиркизни водоник – произведен пиролизом фосилних горива, уз издвајање чађи. Сиви (или смеђи) водоник, произведен прерадом фосилних горива, при чему се ослобођени CO₂ испушта у атмосферу. Бели (или природни) водоник, је елементарни водоник који се нађе локално у природи, у количини која је довољна за комерцијалну експлоатацију.

Складиштење

Произведени водоник се компримује, транспортује и складишти, уз поштовање свих мера безбедности, посебно уколико је утечњен, у криогеним условима. С обзиром на малу густину водоника и ниску температуру водоника у течном стању, складиштење и транспорт чине значајни део трошкова који утиче на крајњу цену водоника, али и на смањење укупног степена корисности процеса производње. Бројне су методе за складиштење водоника. Од класичних метода у резервоарима под притиском, подземним складиштима, у течном стању на ниским температурама, у мешавини са природним гасом у гасоводима, до адсорпције у новим, егзотичним материјалима. Складиштење енергије на бази водоника је могуће вршити у реалном времену, све до сезонског нивоа, што је велика погодност у односу на остале методе складиштења енергије. Ускладиштени водоник пружа могућност повећања флексибилности и робустности одрживог енергетског система уз потенцијално снижење цене енергије кроз интеграцију система и боље коришћење обновљиве енергије. Водоник је могуће, условно речено, складиштити и додавањем природном гасу у постојећим гасоводима, до концентрације од 20%, и користити у постојећим постројењима за сагоревање, уз мање реконструкције.

Стандарди, прописи, безбедност

Тренутно озбиљна препрека коришћења водоника је недостатак међународно усклађених стандарда и прописа за водоник и његову примену у енергетске сврхе. Ова област обухвата безбедносне процедуре у вези са складиштењем, транспортом, руковањем, употребом водоника и мешавина водоника и других гасовитих горива, у целом производно-употребном циклусу, закључно са уређајима за конверзију енергије. Неопходно је даље развијање и усавршавање метода и сензора за откривање истицања водоника, мерење концентрације

водоника у амбијенту, појаву пламена. Потребно је истраживати утицај водоника на материјале са којима је у додиру. Појава увлачења пламена у елементе уређаја за конверзију енергије није у потпуности обрађена. Неопходно је донети техничке нормативе за безбедно постављање станица за снабдевање возила водоником, безбедно складиштење, претакање и безбедност од појава пожара и експлозија. Србији недостају стандарди и прописи за водоник и његово коришћење у енергетске сврхе. Било би потребно да се што пре донесу.

Употреба

Водоник је могуће користити у практично свим системима за производњу електричне енергије, у горивним ћелијама, гасним турбинама, моторима са унутрашњим сагоревањем, од уређаја великих снага до гасних уређаја у домаћинствима. Водоник је од посебног значаја као базно гориво за горивне ћелије и погон возила.

Горивне ћелије

Горивне ћелије су за сада једини дуже времена комерцијализовани уређаји који користе водоник. Горивне ћелије претварају хемијску енергију горива у електричну енергију и топлоту. У комерцијалној употреби је неколико типова горивних ћелија. Неки типови горивних ћелија могу да користе и друга горива поред водоника. Горивне ћелије дају једносмерну електрична струју ниског напона $< 1 \text{ V}$. У примени су потребни већи напони, па се јединичне горивне ћелије спрежу редно. Овде ће бити поменуте горивне ћелије са чврстим електролитом на бази полимера који служи и као мембрана (PEMFC), јер су највише комерцијализоване, имају широку примену у мобилним и стационарним енергетским системима, у транспорту и домаћинствима. Њихов степен корисности у пракси је до око 50%, а и мана им је коришћење племенитих метала као катализатора. Током употребе долази до деградације елемената горивних ћелија што узрокује пад степена корисности. За стационарне системе са горивним ћелијама циљани радни век је 40.000 радних сати, а за мобилне, 5.000 сати. Пројектована цена при масовној производњи горивних ћелија за транспортна средства је 40 - 50 $\$/kW$. Транспорт, складиштење и дистрибуција водоника су један од кључних проблема за даљи развој и примену горивних ћелија у возилима, преносним и стационарним енергетским системима. У јулу 2021. године у Европи постоји преко 140 јавних пумпи са водоником за путничка, теретна возила и аутобусе, од чега се око две трећине налази у Немачкој.

Као и у свим другима областима истраживања, развоја и примене уређаја, тако су и за горивне ћелије очекују даља фундаметална открића, иновације, побољшања перформанси, поузданости и трајности, решавање проблема физичке и хемијске деградације компоненти горивних ћелија и смањење трошкова производње. У области PEMFC, то су питања везана за све компонентне: мембрану, катализаторе, носаче катализатора, слоја за дифузију гасова, биполарне плоче, заптивке, системе за напајање горивом и ваздухом, одвођење продуката реакција, системе за хлађења и одвођење топлоте.

Сагоревање

Сагоревање водоника, или мешавина природног гаса и водоника је такође изгледна опција за производњу електричне и топлотне енергије. За сагоревање чистог водоника је неопходно је развити наменске уређаје и системе за сагоревање, или извршити реконструкцију постојећих уређаја за сагоревање фосилних горива.

Чињенице да водоник има најшире границе упаљивости (доња граница упаљивости 4%) и највећу брзину простирања ламинарног пламена у односу на сва друга гасовита горива, могу да имају добре и лоше последице, зависно од знања и способности конструктора уређаја за сагоревање да искористи повољна својства, или потисне или умањи ефекте неповољних својстава водоника. Проблеми са којима се треба суочити при коришћењу водоника су појава увлачења пламена, посебно у условима припреме смеше са ваздухом, неконтролисано паљење, могућност детонације, деловање водоника на материјале са којима је у додиру, повећања кртости метала праћено слабљења структуре и појава неконтролисаног истицања водоника у околину. Посебно је важан проблем увлачења пламена и утицај врсте примењених конструктивних материјала, геометрије и димензија горионика, преноса топлоте, карактеристика површина у контакту са пламеном, аеродинамика, интензитет и размере турбуленције, ефекат граничног слоја, брзина простирања турбулентног пламена, посебно у условима врло сиромашне гориве смеше са ваздухом. Водоник има изузетно високу отпорност према детонативном сагоревању што га чини врло погодним горивом за ото моторе. Коришћење водоника и смеша са бензинима и другим гасовитим горивима у моторима са унутрашњим сагоревањем омогућује повећање степена корисности, олакшава сагоревање врло сиромашне смеше уз смањену емисију CO₂, CO, угљоводоника и честица. Као неповољан ефекат је очекивано повећање емисије NO_x, што је могуће решавати одговарајућом аеродинамиком и организацијом сагоревања.

Степен корисности

Степен корисности уређаја и система за производњу електричне енергије сагоревањем гасовитог горива варирају: гасне термоелектране 35 – 42%, дизел мотори 35 – 45%, гасне турбине 30 - 45%, бензински мотори 25 – 35%. Горивне ћелије су најефикаснији уређаји за производњу електричне енергије.

Укупни степен корисности циклуса електрична енергија-производња водоника – складиштење – транспорт – производња електричне енергије, када се користе PEMFC горивне ћелије, је до 40%, за гасне термоелектране до 25%, за дизел моторе и гасне турбине испод 25% и нешто преко 20% за бензинске моторе.

Једноставно речено, ако се 1 kWh произведене електричне енергије ускладишти као хемијска енергија водоника, а затим изврши конверзија у електричну енергију, добије се 0,4 kWh ако се користе горивне ћелије или 0,2 kWh ако се користи бензински мотори. То је једна од цена коју треба платити да би се смањила емисија CO₂, али је и инвестиција која омогућује складиштење вишка произведене електричне енергије, већу сигурност, енергетску независност, диверсификацију енергетских извора. На глобалном нивоу, водоник може да игра значајну улогу у геополитици, економији и врши притисак на проивођаче фосилних горива.

Србија и водоник

Каква је ситуација у Србији у вези са производњом и коришћењем водоника за енергетске потребе. У документу Стратегија развоја енергетике Републике Србије до 2025 године са пројекцијама до 2030 године, у оквиру одељка који се односи на чланство у Енергетској заједници, наводи се следеће: „Тржиште енергије Енергетске заједнице обухвата тржиште електричне енергије и природног гаса. Крајем 2008. године, ово тржиште је проширено и на тржиште нафте и деривата нафте, а ова могућност је остављена и за утечњени природни гас, водоник и друге облике енергије која се преноси мрежама“. У делу који се односи на развој енергетике Србије после 2030 године предвиђа се следеће: „За смањење емисије гасова са ефектом стаклене баште, према сада комерцијално расположивим технологијама поред још интензивнијег нивоа примене мера енергетске ефикасности и увођења обновљивих извора енергије, било би неопходно увођење и нуклеарних постројења у енергетику Републике Србије. Међутим, период до средине овог века је дуг и у њему се могу очекивати и значајнији продори технологија које су сада на нивоу експерименталних постројења или чак само теоријске разраде (производња и коришћење водоника, гориве ћелије, нуклеарна фузија и сл). За Републику Србију би, с обзиром на расположиве резерве лигнита, од кључног значаја могао да буде развој технологија коришћења „чистог угља“ које укључују и складиштење CO₂.“

У Закону о коришћењу обновљивих извора енергије (2021), у делу који се односи на коришћење иновационих технологија и нових обновљивих извора енергије, каже се: „У циљу повећања коришћења енергије из обновљивих извора, могу се подстицати технологије у раном развоју које користе нове обновљиве изворе, као што је зелени водоник и други енергенти. Зелени водоник може се користити у области топлотне енергије, саобраћаја и природног гаса у складу са одредбама овог закона и закона којим се уређује енергетика. Влада на предлог Министарства утврђује подстицајне мере за производњу, транспорт, складиштење и коришћење зеленог водоника који се користи у складу са ставом 2. овог члана“, чиме су и формално отворена врата за увођење водоника у енергетику Србије.

Као што већ речено, Србија има велико искуство у индустријској производњи водоника из природног гаса, у количини од више десетина хиљада тона годишње. Истраживањима у области водоника и горивних ћелија се у Србији бави релативно мали број истраживача. Светски је призната београдска школа електрохемије на Технолошко металуршком факултету у Београду. У области производње водоника и истраживања горивних ћелија активни су истраживачи Факултета за физичку хемију у Београду и Лабораторије за физичку хемију Института Винча, док су у области сагоревања водоника и горивних ћелија, активни истраживачи на Машинском факултету у Београду.

Имајући у виду стање и пројекцију енергетике Србије у ближој будућности, животни стандард грађана и чињеницу да се налази на важним европским путним правцима, Србија треба да производњу водоника веже за потребе транспорта. У том смислу, може да се процени да ће у 2030. години потребе Србије износити до 2.000 тона водоника годишње. Ту количину водоника је могуће произвести у земљи, јер Србија има искуства у производњи десетина хиљада тона водоника годишње. Оптимално је да у овој првој фази, до 2030. године, Србија производи око 2.000 тона водоника годишње реформисањем природног гаса, без издвајања CO₂, за шта је потребно ангажовати око 20 MW капацитета постројења, вероватно из индустрије вештачких ђубрива. Ако се определи за зелени водоник из обновљивих извора, Србија треба да издвоји око 30 MW капацитета ветрогенератора за производњу водоника поступком електролизе.

Закључак

Светска енергетска транзиција ка обновљивим изворима енергије је опште прихваћена стратегија која се реализује на дужи рок. Зелена енергетика која форсира водоник, економски је оправдана у оним земљама које остварују вишак електричне енергије добијен из обновљивих извора, или је ствар политичке одлуке, као што је усвојени циљ Европске Уније (ЕУ) да до 2050. године у укупном енергетском билансу водоник учествује са 13-14%. Циљ ЕУ је врло захтеван. Колико је остварив, време ће показати.

Србија као земља кандидат за чланство у ЕУ, треба да реагује брзо, да дефинише своју политику према енергетици водоника, да припрема одговарајућу инфраструктуру за складиштење, транспорт и дистрибуцију водоника, пумпне станице, законска акта, стандарде, прописе, да школује и обучава инжењере и радно особље за рад у енергетским технологијама водоника. За потребе саобраћаја и енергетике, процена је да ће до 2030. године потребе Србије износити до 2.000 тона водоника годишње .

Да би компетентно пратила ситуацију и доносила оптимална решења у вези са водоником Србији је потребан замах у области истраживања и примене водоника и горивних ћелија, како би се генерисала научна, истраживачка и стручна база знање, која би јој омогућили да држи корак са земљама ЕУ и светом. Недовољно знање и искуство у области водоничне енергетске транзиције може да има озбиљне последице на националну економију и енергетику. При томе, не сме се губити из вида да ће фосилна горива и даље чинити кичму светске енергетике, јер ће према проценама удео фосилних горива у 2050. години бити најмање 60% у укупној светској производњи примарне енергије. Србија треба пажљиво да прати политику ЕУ и доноси одлуке које су у националном интересу.