

UNIVERZITET SINGIDUNUM
BEOGRAD
DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

**ENERGETSKI I EKONOMSKI ASPEKTI ELEKTROLITIČKOG
DOBIJANJA VODONIKA - UNAPREĐENJE PROCESA NJEGOVOG
DOBIJANJA U CILJU SMANJENJA TROŠKOVA PROIZVODNJE I
ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE**

MENTOR:

Prof. dr Miroslav Popović

STUDENT: M.Sc. Mina Seović

BROJ INDEKSA: 2016/465030

Beograd, 2023.god.

Mentor: Prof. dr Miroslav Popović
Univerzitet Singidunum, Beograd

Članovi komisije: Prof. dr Miroslav Popović
Univerzitet Singidunum, Beograd

Prof. dr Dragan Cvetković
Univerzitet Singidunum, Beograd

Dr Ivana Perović
Institut za nuklearne nauke “Vinča”, Beograd

Datum odbrane:

Datum promocije:

Energetski i ekonomski aspekti elektrolitičkog dobijanja vodonika - unapređenje procesa njegovog dobijanja u cilju smanjenja troškova proizvodnje i zaštite životne sredine

ZAHVALNICA

Dr Ivana Perović, naučni saradnik INN „Vinča“, je osoba zahvaljujući kojoj ova doktorska disertacija postoji. Njena posvećenost, velikodušnost i strpljivost učinile su da se pokrenem i dođem do ovoga cilja. Njeni saveti bili su od neprocenjive vrednosti i uverena sam da nikada neću moći dovoljno da joj se zahvalim. Hvala Ivana!

Zahvaljujem se dr Snežani Brković, naučnom saradniku INN „Vinča“, koja me je uvela u čarobni svet elektrohemijske i sa kojom sam radila eksperimente i publikovala radove koji su u srži ove teze.

Zahvaljujem se dr Milici Marčeti Kaninski, naučnom savetniku IOFH, na tome što me je pravilno usmerila i naučila da radim.

Zahvaljujem se prof. dr Miroslavu Popoviću, vanrednom profesoru Univerziteta Sigidunum, na divnoj saradnji, besprekornim i brzim odlukama i podršci na izradi disertacije.

Želim da se zahvalmi gđi Diani Orlić, koja je pratila moj rad sve ove godine i radovala se svakom pređenom stepeniku.

I mojoj mami Mirjani Seović.

APSTRAKT

Globalna potrošnja energije, emisija gasova staklene bašte, i zagađenje vazduha koje neprestalno raste, zahtevaju razvoj i uvođenje novih, alternativnih, energenata koji će zameniti fosilna goriva. Stati na put globalnom zagrevanju jedan je od najvećih izazova današnjice. Zbog ovako kompleksnog problema, Vlade mnogih zemalja na globalnom nivou, ostvaruju saradnju, postavljanjem pravila u zaštiti životne sredine kroz očuvanje biodiverziteta i korišćenja prirodnih izvora energije na racionalan način koji je osnovni uslov zdravog i održivog razvoja. Prelazak na obnovljive izvore energije (OIE), kao zamena fosilnim gorivima, je cilj koji je prepoznat kao rešenje navedenih problema. Međutim, da bi se potpuno prešlo na upotrebu OIE neophodno je premostiti jaz u snabdevanju energijom iz ovih izvora imajući u vidu njihovu intermitentnost.

Kao odličan kandidat za ovu ulogu - ulogu mosta između OIE i električne energije, u poslednjih nekoliko godina nametnuo se vodonik i vodonična energija. Vodonik je prepoznat kao nezamenljiv medijum za skladištenje i manipulaciju energijom. Dobijanje vodonika treba da bude što efikasnije, zelenije, jeftinije, brže. Trenutno najbolja metoda koja zadovoljava pomenute uslove jeste alkalna elektroliza u sprezi sa OIE. Opsežna istraživanja na polju unapređenja elektrolitičkog procesa dobijanja vodonika rezultovala su znatnom uštedom energije, tj. povećanju energetske efikasnosti ovog sistema, što samim tim opravdava ekonomsku stranu primene ove tehnologije i što je bio predmet istraživanja u okviru ove doktorske disertacije.

Praktični cilj ove disertacije je otvaranje mogućnosti za supstituciju dosadašnjih zastarelih, nečistih tehnologija dobijanja vodonika, naprednom, ekološki održivom i opravdanom tehnologijom koja će imati direktan uticaj na mitigaciju efekata klimatskih promena. Troškovi proizvodnje vodonika, unapređenim procesom elektrolize kroz tehnološki pojednostavljen proces *in situ* aktivacije, tj. rastvaranjem određene kombinacije kompleksa *d*-metala direktno u elektrolit tokom elektrolitičkog procesa, opisanim u ovom radu su značajno smanjeni, za čak 15%. Eksperimentalnim merenjima utvrđen je mehanizam reakcije izdvajanja vodonika koji je doveo do uštede energije samog procesa. Utvrđeno je da aktivnost izdvajanja vodonika zavisi od koncentracije elektroaktivnih vrsta, kao i od gustine struje taloženja depozita na elektrodama i radne temperature.

Nakon interpretacije eksperimentalnih rezultata, predstavljen je opsežan pregled ekonomskih faktora i analiza mogućih scenarija vezanih za tranziciju na novi vodonični energetski poredak.

Ključne reči: vodonik, vodonična ekonomija, alkalna elektroliza, zaštita životne sredine

ABSTRACT

Global energy consumption, greenhouse gas emissions and air pollution, which is constantly increasing, require the development and introduction of new, alternative energy sources that will replace fossil fuels. Preventing global warming is one of the biggest challenges of today. Due to such a complex problem, the governments of many countries at the global level cooperate, establishing rules for environmental protection through the preservation of biodiversity and the rational use of natural energy sources, which is the basic condition for a healthy and sustainable development. The transition to renewable energy sources (RES), as a substitute for fossil fuels, is a goal that is recognized as a solution to the mentioned problems. However, in order to fully transition to the use of RES, it is necessary to bridge the gap in the supply of energy from these sources, taking into account their intermittency. As an excellent candidate for this role - the role of a bridge between RES and electricity, hydrogen and hydrogen energy have emerged in the last few years. Hydrogen is recognized as an irreplaceable medium for energy storage and manipulation. Obtaining hydrogen should be as efficient, greener, cheaper and faster as possible. Currently, the best method that meets the above conditions is alkaline electrolysis in conjunction with RES. Extensive research in the field of improving the electrolytic process of obtaining hydrogen resulted in significant energy savings, i.e. an increase in the energy efficiency of this system, which justifies the economic side of the application of this technology and which was the subject of research in this doctoral dissertation.

The practical goal of this dissertation is to open the possibility for the substitution of outdated, impure technologies for obtaining hydrogen, with an advanced, ecologically sustainable and justified technology that will have a direct impact on mitigating the effects of climate change. The costs of hydrogen production, by the improved process of electrolysis through a technologically simplified process of in situ activation, i.e. by dissolving a certain combination of d-metal complexes directly into the electrolyte during the electrolytic process described in this paper, have been significantly reduced, by as much as 15%. Experimental measurements determined the reaction mechanism of hydrogen extraction, which led to the energy saving of the process itself. It was found that the activity of hydrogen extraction depends on the concentration of electroactive species, as well as on the density of the deposition current on the electrodes and the operating temperature.

After the interpretation of the experimental results, an extensive overview of economic factors and analysis of possible scenarios related to the transition to a new hydrogen energy system was given.

Keywords: hydrogen, hydrogen economy, alkaline electrolysis, environmental protection

SADRŽAJ

1.	Uvod.....	1
1.1.	Energetska slika sveta	2
1.2.	Klimatske promene	3
1.2.1.	Efekat staklene bašte.....	4
1.2.2.	Posledice klimatskih promena.....	5
1.2.3.	Uticaj klimatskih promena na ekosisteme i biodiverzitet.....	5
1.3.	Obnovljivi izvori energije	5
1.3.1.	Geotermalna energija.....	6
1.3.2.	Energija vode.....	7
1.3.3.	Energija Sunca.....	8
1.3.4.	Energija vetra.....	9
1.3.5.	Energija biomase	10
1.4.	Međunarodne regulative u domenu zaštite životne sredine	12
1.4.1.	Istorijski osvrt i integrisani pristup.....	12
1.4.2.	Rio, Kjoto, Pariz.....	13
1.4.3.	Arhuska konvencija	15
1.5.	Regulative Republike Srbije u domenu zaštite životne sredine	16
2.	Vodonik i vodonična energija.....	18
2.1.	Dobijanje vodonika	19
2.1.1.	Reforming proces.....	19
2.1.1.1.	Reforming proces vodenom parom.....	20
2.1.1.2.	Parcijalna oksidacija.....	20
2.1.1.3.	Autotermalni reforming - ATR.....	21
2.1.2.	Gasifikacija.....	21
2.1.3.	Dobijanje vodonika iz biomase	22
2.1.4.	Elektroliza	22
2.2.	<i>In situ</i> metoda elektrolitičkog dobijanja vodonika	25
2.3.	Principi dobijanja energije iz vodonika	27
2.4.	Zašto zeleni vodonik? Zašto sada?	29
2.4.1.	Prognoze za zeleni vodonik.....	32
2.5.	Vodonična ekonomija	37
2.5.1.	“Ecology, economy and environment”	38
2.5.2.	Ekološki menadžment i održivi razvoj	40
2.5.2.1.	Ekološki menadžment	40
2.5.2.2.	Koncept održivog razvoja.....	41
2.5.3.	Misija i vizija.....	42
2.5.4.	Teorijske pretpostavke o vodoničnoj ekonomiji	43

3.	Ciljevi istraživanja	49
3.1.	Cilj studije.....	50
4.	Eksperimentalni dizajn.....	51
4.1.	Potrošnja energije.....	52
4.2.	Elektrohemijska ispitivanja	53
5.	Rezultati eksperimenata i diskusija.....	55
5.1.	Rezultati i diskusija merenja potrošnje energije.....	55
5.2.	Rezultati i diskusija elektrohemijjskih merenja.....	59
5.2.1.	Polarizaciona merenja, nadnapon HER-reakcije stvaranja vodonika i stvarna energija aktivacije Co-Cr katalizatora.....	59
5.2.2.	Elektrohemijska impedansna spektroskopija (EIS).....	63
5.3.	Rezultati analize ekonomskih scenarija za zeleni vodonik.....	66
6.	Zaključak	70
7.	Literatura	72

1. Uvod

Povećana upotreba sirovina, materijalnih dobara i energije, izazvana rastom svetske populacije, rezultirala je pojavom negativnih efektata na životno okruženje i zdravlje ljudi. Može se reći da je neusklađenost u potrošnji prirodnih resursa i rasta populacije dovela do globalnih ekoloških problema. Globalna potrošnja energije, emisija gasova staklene bašte, i zagađenje vazduha koje neprestalno raste, zahtevaju razvoj i uvođenje novih, alternativnih, energenata koji će zameniti fosilna goriva. Rast emisije gasova staklene bašte (*Greenhouse Gases-GHG*) i zavisnost od fosilnih izvora energije su više nego dovoljan razlog za prelazak na nove, alternativne izvore i ohrabrenje industrijalcima za ulaganja u nove tehnologije. Stari na put globalnom zagrevanju jedan je od najvećih izazova današnjice. Glavni cilj koji je postavljen kako na globalnom, tako i na lokalnim nivoima, je ograničenje emisije ugljen-dioksida, da bi se sprečio porast temperature za više od 2°C u poređenju sa preindustrijskim nivoom [1].

Stanje u kome se nalazi životna sredina kao posledica antropogenog delovanja je alarmantno. Sada, kada je problem osvešćen, jasno je da se mora delovati i ulagati da bi se planeta i život na njoj mogli očuvati. Pod pojmom ulaganja ovde se podrazumeva jedan širi smisao, dakle ne samo materijalna ulaganja, već i mentalna, da bi se navike i percepcije ljudi promenile. Tek onda možemo govoriti i o ulaganjima u užem smislu reči, koja mogu da daju pozitivan rezultat i u ekološkom i u ekonomskom smislu. Zbog ovako kompleksnog problema, vlade mnogih zemalja na globalnom nivou, ostvaruju saradnju, postavljanjem pravila u zaštiti životne sredine kroz očuvanje biodiverziteta i korišćenja prirodnih izvora energije na racionalan način koji je osnovni uslov zdravog i održivog razvoja.

Prelazak na obnovljive izvore energije (OIE), kao zamena fosilnim gorivima, je cilj koji je postavljen u nadi da će rešiti navedene probleme. Međutim, da bi se potpuno prešlo na upotrebu OIE neophodno je premostiti jaz u snabdevanju energijom iz ovih izvora imajući u vidu njihovu intermitentnost.

Kao odličan kandidat za ovu ulogu - ulogu mosta između OIE i električne energije, u poslednjih nekoliko godina nametnuo se vodonik i vodonična energija.

Vodonik je sekundarni nosilac energije, za njegovo dobijanje potrebno je uložiti energiju, ali je odličan za dugoročno skladištenje iste, te za balansiranje mreže sa OIE, što je od ključnog značaja za stabilnost elektroenergetskog sistema.

Vodonik je prepoznat kao nezamenljiv medijum za skladištenje i manipulaciju energijom. Postoji više načina njegovog dobijanja, međutim samo jedan od njih - elektroliza - je dovoljno dobar da zadovolji najbitniji uslov današnjice a to je - ekološka podobnost. Dobijanje vodonika treba da bude što efikasnije, zelenije, jeftinije, i brže. Trenutno najbolja metoda koja zadovoljava pomenute uslove jeste tzv. alkalna elektroliza u sprezi sa OIE.

Opsežna istraživanja na polju unapređenja elektrolitičkog procesa dobijanja vodonika rezultovala su znatnom uštedom energije, tj. povećanju energetske efikasnosti ovog sistema, što samim tim opravdava ekonomsku stranu primene ove tehnologije i što je bio predmet istraživanja u okviru ove doktorske disertacije.

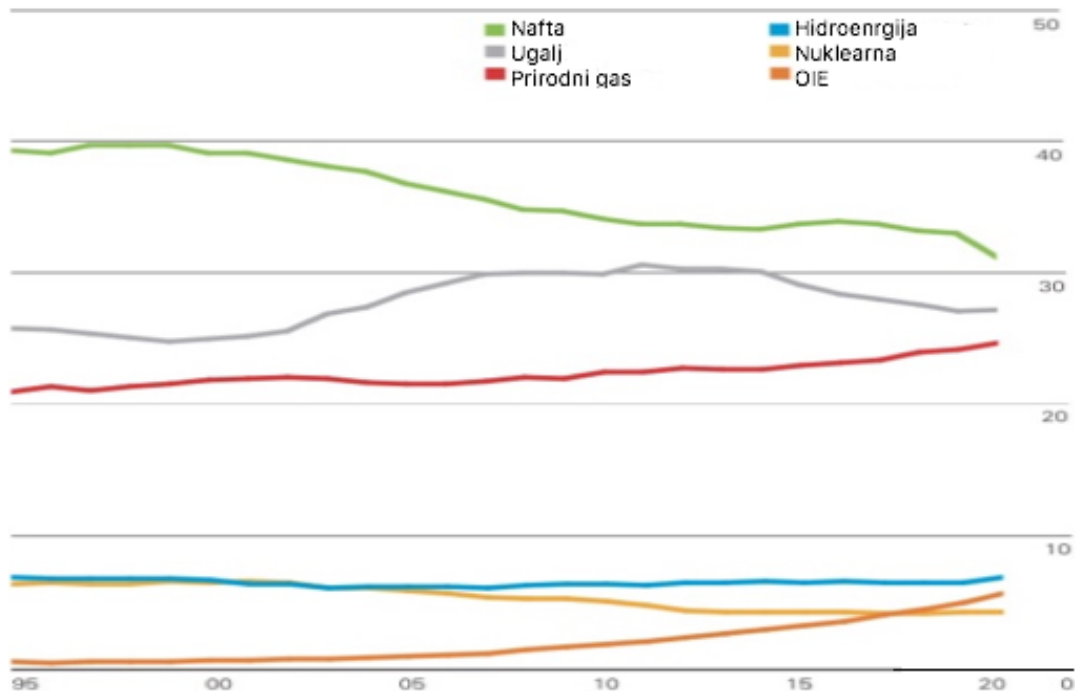
Takođe, vodonična energija pripada naučno-tehnološkoj revoluciji tj. trećoj industrijskoj revoluciji koja uvodi društvo u novi civilizacijski kontekst koji je definisan kao kreativno inovaciono društvo ili društvo utemeljeno na znanju [2].

U skladu sa navedenim predmetom istraživanja, opšti cilj istraživanja ove doktorske disertacije usmeren je na identifikaciju različitih tehnologija elektrolitičkog dobijanja vodonika pomoću pregleda literature uzimajući u obzir performanse i primenljivost u stvarnom svetu, kao i unapređene procesa elektrolitičkog dobijanja vodonika u laboratorijskim uslovima, kroz razvoj novih elektrodnih materijala.

Praktični cilj disertacije je otvaranje mogućnosti za supstituciju dosadašnjih zastarelih, nečistih tehnologija dobijanja vodonika, naprednom, ekološki održivom i opravdanom tehnologijom, koja će imati direktan uticaj na mitigaciju efekata klimatskih promena. Troškovi proizvodnje vodonika, unapređenim procesom elektrolize su značajno smanjeni, što su i preliminarna istraživanja već dokazala. Ekonomski efekti koji proizilaze iz unapređenog procesa jasno ukazuju da inovacije koje se dešavaju na polju fundamentalnih istraživanja, pored toga što imaju značaj u očuvanju i zaštiti životne sredine, pokazuju i znatno bolje ekonomske parametare u odnosu na postojeće. Određivanje numeričkih parametara dobijenih tokom rada, u kombinaciji sa već postojećim publikovanim rezultatima, i njihovo poređenje sa referentnim vrednostima, takođe predstavlja jedan od bitnih ciljeva istraživanja.

1.1. Energetska slika sveta

Energija je potreba na kojoj je čovečanstvo zasnovano. Energija protiče kroz ekosisteme, povezuje njih i njihove činioce i na tom putu samo menja oblik. Količina energije koju dobijamo od Sunca u trajanju od nekoliko časova, veća je nego što cela ljudska vrsta potroši za godinu dana. Na žalost, još nismo došli do rešenja kako da je efikasno iskoristimo. Osim toga energija Sunca je uskladištena u fosilnim gorivima i biomasi, a Sunce je pokretač vetrova, kruženja vode u prirodi, jednom rečju – osnova OIE. Način na koji se energija troši, predstavlja osnovnu karakteristiku stanja društvenog napretka i ekonomije. Moderna energetika stavila je ključni akcenat na energetske efikasnost i razvoj obnovljivih i alternativnih izvora energije, kako bi se upotreba fosilnih goriva smanjila a njihov uticaj na životnu sredinu ublažio. Danas je globalni udeo potrošnje fosilnih goriva 84% [3], a na Slici 1.1. se može videti kakvi su trendovi potrošnje u poslednjih 25 godina [4].



Slika 1.1. Udeo globalne primarne energije izražen u procentima [4]

Nafta i dalje ima najveći udeo u energetsom miksu 31,2%. Ugalj učestvuje sa 27,2% što je za nijansu više u odnosu na 2020. godinu. Udeo prirodnog gasa i OIE porastao je na 24,7% odnosno 5,7%, redom. OIE su pretekle nuklearne izvore koji sada čine 4,3% ukupne potrošnje. Hidroenergetski udeo, porastao je za 0,4%, prvi put od 2014. godine i sada iznosi 6,9%.

Što se tiče nuklearne energije, čija je upotreba počela polovinom XX veka otkricem nuklearne fisije, ona je od tada, pa sve do incidenta u Fukošimi, Japan, imala uzlaznu putanju. Međutim, od te 2011. godine energetska politika u mnogim zemljama sveta se promenila, pa su se tako Nemačka, Italija, Austrija i Švajcarska odlučile da obustave proizvodnju električne energije iz nuklearnih izvora. Gledano iz trenutne perspektive, pod uticajem pandemije Covid-19 i Rusko-Ukrajinske krize, može se naslutiti da bi nuklearne elektrane ponovo mogle biti aktivirane.

1.2. Klimatske promene

“Klimatske promene predstavljaju one promene klime koje se direktno ili indirektno pripisuju ljudskim aktivnostima, koje menjaju sastav atmosfere i koje se za razliku od klimatskih varijabilnosti beleže tokom dužeg vremenskog perioda” [5].

Klimatske promene, postale su svakodnevna tema u našim životima. Mnoge kompanije prilagodile su svoje poslovne politike, od suvog ostvarivanja profita do, davanja na značaju načinu na koji se resursi i energija troše prilikom nastajanja njihovih proizvoda. Ali to je tek početak jer se takav način mišljenja mora preneti do pojedinca. Narušeni ozonski omotač,

pojačan efekat staklene bašte, smanjen biodiverzitet, aerozagađenje, kontaminacija voda, sve su to elementi koji čine krovni problem - klimatske promene.

Promene klime koje se proteklih decenija uočavaju, predstavljaju posledice delovanja biotičkih i abiotičkih faktora. Izdvojen iz biotičkih faktora u zasebnu kategoriju je antropogeni faktor, koji je najviše doprineo pojavi klimatskih promena i negativnim posledicama koje se uočavaju u biosferi.

Prvi izveštaj Međuvladinog panela o klimatskim promenama ("International Panel on Climate Changes", IPCC, 1990) prezentovan je 1990. godine. Povodom toga postignut je globalni dogovor o čovekovom uticaju na klimu, i to je bila osnova za Okvirnu konvenciju Ujedinjenih nacija o klimatskim promenama [6].

Na osnovu izveštaja izvedeni su sledeći zaključci:

- Potvrđuje se postojanje efekta staklene bašte; emisije koje čovek svojim aktivnostima stvara, povećavajući koncentracije gasova staklene bašte u atmosferi (CO_2 , NH_4 , freon, N_2O). Povećana koncentracija ovih gasova rezultira zagrevanjem atmosfere.
- CO_2 ima najveći uticaj na pojačanje efekta staklene bašte, čak 50 %.
- Porast temperature koji se očekuje u XXI veku je $0,2^\circ\text{C}$ po dekadi.
- Mnogo je nepoznanica prilikom predviđanja klimatskih promena naročito kada su u pitanju vremenski okvir, intenzitet i lokaliteti.
- Porast nivoa Svetskog mora, procenjen je na 6cm godišnje, a posledica je termalne ekspanzije i topljenja glečera.

1.2.1. Efekat staklene bašte

Efekat staklene bašte predstavlja fenomen apsorbovanja toplotne energije od strane gasova koji čine atmosferski omotač i njeno emitovanje u svim pravcima. Ovaj efekat je prirodni mehanizam zahvaljujući kome je život na Zemlji moguć. Međutim, kako je atmosfera prezasićena ovim gasovima dolazi do pregrevanja Zemljine površine. U sastav atmosfere ulaze sledeći gasovi staklene bašte: vodena para, ugljen-dioksid, metan, azot-suboksid i ozon. Osim pomenutih, u manjim koncentracijama se mogu javiti: CFC (hlor-fluorugljenik), HCFC (hlor-fluorugljovodonik), CF_4 (tetraflourmetan), C_2F_6 (heksaflouretan), SF_6 (sumporheksafluorid), NF_3 (azotrifluorid) [7]. Najznačajniji i najodgovorniji za pojavu globalnog zagrevanja je ugljen-dioksid. Njegova koncentracija u atmosferi direktno je proporcionalna antropogenim aktivnostima, što podrazumeva sagorevanje fosilnih goriva, širenje urbanih i poljoprivrednih zona, dezertifikaciju...

1.2.2. Posledice klimatskih promena

Neposredne i najuočljivije posledice klimatskih promena su porast atmosferske temperature, smanjenje ledenog pokrivača, porast nivoa svetskog mora, izmenjeni režim precipitacije, vlage i strujanja vazduha. Bez obzira na visok stupanj razvoja civilizacije, humana zajednica je deo prirode i nije izolovana od promena koje se u njoj dešavaju. Naprotiv, ona je direktno involvirana, odnosno direktno odgovorna za njihov nastanak. Naizgled superiorna, ljudska zajednica je veoma vulnerabilna/ranjiva kada su u pitanju zdravlje, dostupnost pijaće vode, hrane, snabdevanje energijom a to su sve parametri na koje klimatske promene veoma loše utiču. Prema klimatskim istraživanjima koja se vrše, najpovoljniji scenario, koji se odnosi na porast temperature u XXI veku, tvrdi da će prosečna temperatura porasti za 1,8°C (od 1,1°C do 2,9°C), a prema najlošijem scenariju za 4°C (od 2,4°C do 6,4°C). Na osnovu istog, može se očekivati da nivo svetskog mora bude viši za 18-38 cm, odnosno 26-59 cm [8].

1.2.3. Uticaj klimatskih promena na ekosisteme i biodiverzitet

Klima ima značajan uticaj na prirodne ekosisteme i oni se milionima godina prilagođavaju njenim promenama. Postojanje biološke raznovrsnosti pripisuje se različitim klimatskim uslovima koji su svoj uticaj ostvarili kroz evoluciju. Klimatske promene, kojima smo svedoci, smatramo nepovoljnima po ekosisteme zato što se odvijaju brže nego što se organizmi na njih mogu adaptirati. U IV izveštaju Međuvladinog panela o klimatskim promenama iz 2007. godine, navedene su pretpostavke za koje se smatra da mogu imati najveći uticaj na održavanje ekvilibrijuma u ekosistemima :

-Ekosistemi imaju određen prag tolerancije na klimatske promene nakon čega prelaze u nestabilno stanje.

-Ekosistemi su pod stalnim uticajem antropogenih faktora koji u sprezi sa klimatskim promenama pojačavaju njihove negativne efekte.

-Brze klimatske promene, zajedno sa negativnim uticajem čoveka na životnu sredinu, mogu dovesti do nepredvidivih promena biosfere.

-Klimatske promene mogu da dovedu do izumiranja biljnih i životinjskih vrsta koje su osnova za normalno funkcionisanje ekosistema [5], [9].

1.3. Obnovljivi izvori energije

Obnovljivi izvori energije su glavni nosioci energetske tranzicije ka karbonski neutralnoj energetici i ekonomiji. Oni podrazumevaju uporebu prirodnih resursa koji se mogu obnoviti posmatrajući ljudsku vremensku skalau. To su resursi koji su alternativa neobnovljivim izvorima energije- fosilnim gorivima.

Najzastupljeniji OIE su trenutno: energija Sunca, energija vetra, hidro energija, energija talasa, geotermalna energija i energija biomase.

Zajednički imenitelj ovih izvora je dobijanje čiste energije, bez stvaranja zagađenja, što i jeste cilj svetske energetike i ekonomije.

Osobina svih OIE je intermitentnost - nestalnost, periodičnost: pojava vetra, količina insolacije, visina plime i oseke, sve su ovo pojave koje se ne mogu sa sigurnošću predvideti. Ponekada ima previše energije koja se može proizvesti i obrnuto - malo ili ništa. Ova činjenica je veoma važna i dovela je do zaključka da je neophodno višak energije koji može biti generisan, iskoristiti, ne dozvoliti da propadne i na pravi način ga povezati odnosno skladištiti.

Kao najbolje rešenje za skladištenje energije, dobijanje električne struje, dekarbonizaciju i održavanje klimatske neutralnosti, koja je najveći problem koji se javlja između društva i prirode, jeste vodonik. Najkvalitetniji vodonik dobija se procesom elektrolize koja je ujedno i najčistiji način za njegovu proizvodnju. To je proces razlaganja molekula vode, na svoje činioce - vodonik i kiseonik, uz utrošak električne energije. Tako bi (višak) energije koja se dobija iz OIE, mogao da se koristi za proizvodnju vodonika, koji se zatim može skladištiti i u periodima kada OIE ne mogu da obkrbljuju sistem punim kapacitetom, vodonik bi ga održavao u ekvilibrijumu.

Implementacija vodonika u integrisani energetska sistem, nije ideja koja je nastala iznenada, ali je ideja čija vrednost eksponencijalno raste. Evropska Komisija je u julu mesecu 2020. godine, uz strategiju za rešavanje posledica koju je izazvala bolest Covid-19, usvojila i strategiju za integraciju energetskog sistema i još jednu posebnu posvećenu vodoniku - strategiju za klimatski neutralnu Evropu [10].

1.3.1. Geotermalna energija

Veoma interesantan i potencijalno značajan “čisti” izvor predstavlja geotermalna energija. Ona nije obnovljiva, u užem smislu, ali obzirom da je ima u ogromnim količinama, njeno iskorišćavanje bilo bi neprimetno/nezatno. Geotermalna energija se može koristi direktno ili indirektno. Direktno korišćenje vruće vode podrazumeva njeno ispušavanje sa određene dubine ili njeno samostalno izbijanje (gejzir). Ovi izvori koriste se za grejanje kuća, staklenika, u zdravstveno-rekreativne svrhe i u industriji.

Indirektno korišćenje podrazumeva prevođenje geotermalne energije u električnu struju. Princip rada je isti kao kod klasičnih termoelektrana: razlika se javlja u načinu dobijanja vodene pare. Tehnologije koje se primenjuju prilagođene su temperaturi vode u podzemlju. Ovakav izvor energije je stabilan, ekonomičan i ekološki prihvatljiv, obzirom da nema štetnih emisija.

Ograničenja vezana za geotermalne izvore enegije su velike dubine na kojima su takva nalazišta smeštena. Ukoliko to nije slučaj, dešava se da su plitka nalazišta stacionirana u trusnim područjima, tj. područjima visokog rizika, pa se dovodi u pitanje investiranja u takve projekte. Među zemljama koje prednjače u korišćenju geotermalne energije su Island, Meksiko, SAD, Filipini.

Geotermalna energija u Srbiji ima veliki potencijal da bude važan izvor energije, kako za proizvodnju električne energije tako i za različite industrijske procese, kao i za grejanje i hlađenje domaćinstava. Srbija poseduje nekoliko geotermalnih polja kao što su Vršačko, Zrenjaninsko,

Kikindsko i Kruševačko. Do danas je najbolje iskorišćen geotermalni izvor u Vršcu, koji se koristi za zagrevanje staklenika i proizvodnju hrane. Na žalost, upotreba ovog vida energije u našoj zemlji još nije dovoljno zastupljena, zbog nedostatka finansijskih sredstava, ali i zbog nedostatka pravnih regulativa. Međutim, postoji nada da će dodatna istraživanja i investicije u ovaj izvor energije u bliskoj budućnosti omogućiti njeno korišćenje na održiv i ekonomski isplativ način [13].

1.3.2. Energija vode

Voda pokriva više od 70% Zemljine površine i predstavlja vrlo interesantan i potentan izvor energije. Hidroenergija je najrazvijeniji i najveći izvor obnovljive energije. U ovu grupu spadaju energija kopnenih vodotokova, energija plime i oseke, morskih talasa.

Snaga kopnenih vodotokova koristi se formiranjem akumulacija tj. pregrađivanjem reka izgrdnjom brana. Na taj način potencijalna energija vode pretvara se u mehaničku, prelaskom preko turbine, a ona se uz pomoć električnog generatora prevodi u električnu. Hidroelektrane ne proizvode direktna zagađenja, kao što su emisije štetnih gasova, ali mogu uticati na kvalitet vode i živi svet. Drugim rečima, uticaj velikih hidroelektrana nije zanemarljiv zato što dolazi do bitnih promena u prirodi: potapanje dolina i naselja, oslobađanje metana (koji nastaje u procesu truljenja potopljenih biljaka), promena mikroklimе koja negativno utiče na biljne i životinjske zajednice, prvenstveno narušavajući njihova prorodna staništa - biotope. Za razliku od velikih, uticaj malih hidroelektrana je neznatan jer se lako mogu uklopiti u okolinu. Takođe, ne iziskuju enormna ulaganja, objekti nisu veliki ali je nužno pridržavati se svih ekoloških principa, da ne bi došlo do katastrofe – u vidu presušivanja rečnih korita i uništenja flore i faune [15].

U Srbiji, hidroenergija ima najveći udeo u obnovljivim izvorima, zahvaljujući hidroelektranama Đerdap 1 i 2, kao i hidrelektani Bajina Bašta. U poslednjih nekoliko godina, javlja se sve veći interes za korišćenje hidroenergije u Srbiji, obzirom na njenu obnovljivost i održivost na duži vremenski period.

Energija plime i oseke, potiče od gravitacionih sila Sunca i Meseca. Ovaj tip energije dobija se na mestima gde su dnevne oscilacije nivoa mora izrazito naglašene a princip funkcionisanja sličan je kao kod hidroelektrana. Brana se gradi na ulazu u zaliv. Kada se nivo vode podigne, ona prelazi preko turbine, zaliv se puni, brana se zatvara i čeka se da nivo vode padne. Voda se tada pušta iz zaliva i to se može raditi na dva načina, preko turbine, što je složeniji proces (ali i bolje iskorišćenje energije) ili kroz sistem cevi, u slučaju jednosmernih turbina. Energija plime i oseke, može se koristiti u područjima u kojima su te pojave izrazito ispoljene [16].

Problem energije koja se dobija od plime i oseke, je u njenom diskontinuitetu. Što znači da je proizvodnja električne energije na ovoj osnovi neisplativa izolovano, bez podrške drugih tehnologija. Dakle, ovaj obnovljivi izvor energije je ekološki prihvatljiv, ne emituje GHG, ne stvara otpad, ne koristi gorivo za pogon. Pošto su plima i oseka proćavane pojave pouzdano se može predvideti proizvodnja energije, a jednom napravljeno postrojenje nije toliko skupo za održavanje.

Negativna strana, koja privlači najviše pažnje, jesu ogromna početna ulaganja jer se radi o vrlo masivnim projektima koja obuhvataju velika područja. Tehnički gledano, postoji i ograničeno dnevno vreme rada elektrane, i to na oko 10 sati [17]. Osim toga, mogu se pojaviti veliki ekološki problem vezani za uništavanje prirodnih ekosistema. Ovo se posebno odnosi na određene vrste ptica koji se u ovim ekosistemima hrane pa se uništavanjem istih, i njihov opstanak dovodi u pitanje.

Energija talasa može se posmatrati kao transformisana energiju Sunca. Delovanjem Sunca nastaju vetrovi a talasi nastaju interakcijom vetra i vodene površine. Talasi sadrže znatne količine neiskorišćene energije a njeno konvertovanje u drugi vid, predstavlja izazov u tehničkom pogledu. Postoji više načina za pretvaranje energije talasa u električnu energiju [18].

Snaga talasa se obično transformiše uz pomoć plutajućih turbinskih platformi ili plutača koje se podižu i spuštaju sa naletima vode. Osim toga snaga talasa se može generisati korišćenjem promena vazdušnog pritiska koje se dešavaju u komorama za hvatanje talasa koje su okrenute prema moru ili promenama pritiska talasa na dnu okeana.

Uprkos ogromnom energetsom potencijalu snage talasa, tehnički izazovi ostaju nerešeni. Finansiranje istraživanja je veoma skromno u poređenju sa onim koji podržavaju solarnu, vetar i druge obnovljive oblike energije. Razvoj masivnih mašina za upotrebu u okeanima je skup; borba sa slanom vodom na polju korozije još uvek nije završena dok fizička sila talasa utiče na zamor materijala kolektora energije talasa, prenosnih žica i druge infrastrukture tokom vremena [18].

1.3.3. Energija Sunca

Sunce je najveći izvor obnovljive energije. Energija Sunca potiče od nuklearnih reakcija u njegovom jezgru, tj. od reakcija fuzije vodonikovih atoma pri čemu nastaje helijum, uz oslobađanje ogromne količine energije. Ova energija se u vidu svetla i toplote rasprostire Svemirom i tako jedan njen deo stiže do naše planete. Zbog praktično neiscrpne količine energije Sunčevog zračenja, koja je i osnovni izvor života na Zemlji, već duže vreme se vrše istraživanja u cilju razvoja efikasnih tehnologija za njeno korišćenje.

Solarna energija je energija sunčevog zračenja koja se javlja u dva oblika – svetla i toplote. Intezitet zračenja koji se može iskoristi ne može se sa sigurnošću predvideti (nasuprot npr. energiji koja se dobija iz vetra). Energija Sunčevog zračenja je dakle relativno predvidljiv izvor, ali ga nema noću i mnogo je manje intenzivno u toku zime, što znači da postrojenja mogu raditi samo tokom dana i da se, uz njih, moraju graditi dodatna postrojenja koja treba da osiguraju akumulaciju energije, da bi se potrošačima omogućilo kontinuirano snabdevanje kada je insolacija niska ili je nema. Osnovni načini iskorišćavanja energije Sunca mogu biti aktivni i pasivni.

Tehnologije pasivne solarne energije zasnivaju se na apsorpciji te energije, skladištenju i distribuciji na prirodan način (npr. prirodna ventilacija), bez korišćenja mehaničkih elemenata. Tehnologije korišćenja dnevnog svetla su pasivne; one podrazumevaju prozore, krovne prozore, zatamnjanje i uređaje za refleksiju. Termin 'pasivne tehnike' označava spontano odvijanje

procesa gde nije potrebno uložiti dodatnu energiju. Na osnovu ovoga može se zaključiti da je ova tehnologija 100% ekološka.

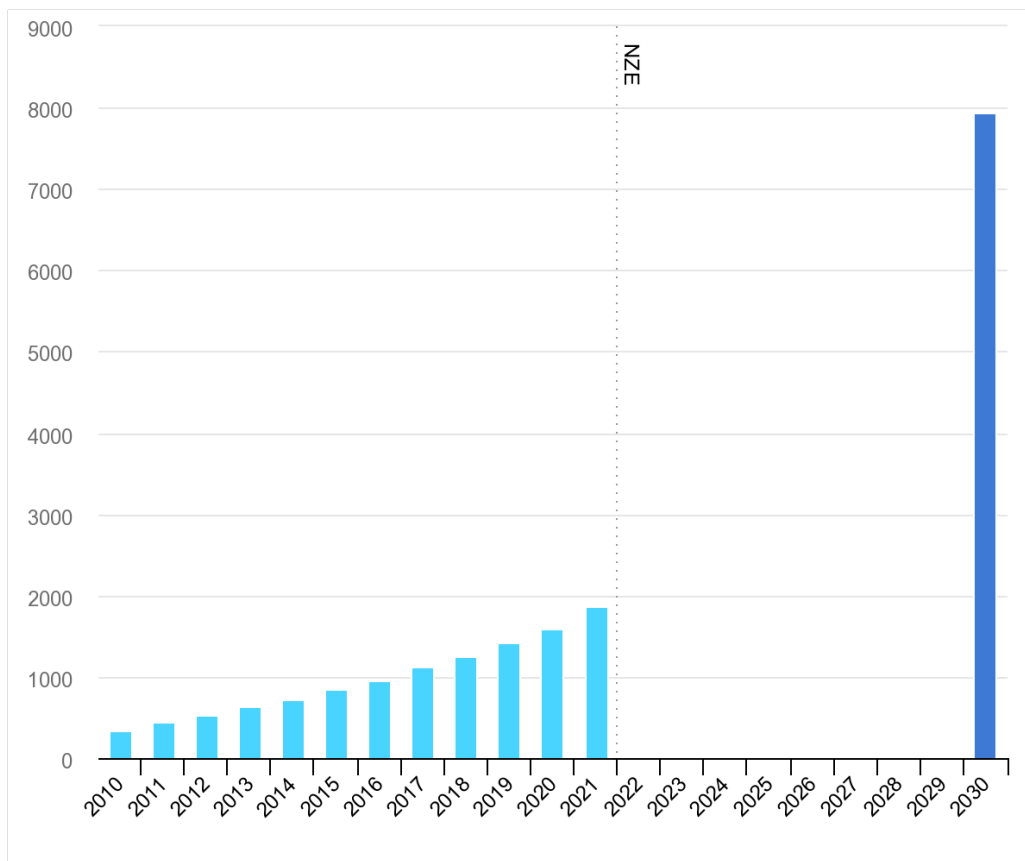
Aktivno korišćenje solarne energije podrazumeva upotrebu različitih uređaja za pretvaranje sunčevog zračenja u druge vidove energije. Korišćenje fotonaponskih ćelija (fotoelektrična konverzija) i solarnih kolektora (fototoplotna konverzija) su dva načina energetskog iskorišćavanja Sunčevog zračenja za pretvaranje u električnu i toplotnu energiju, respektivno [19].

Solarni kolektori fokusiraju Sunčevo zračenje, koristeći ogledala, u jednu tačku u kojoj se radni fluid zagreva. On se zatim koristi za pokretanje turbina koje onda pokreću generatore električne struje. Ovo je osnovni princip rada solarnih elektrana.

Fotonaponske ćelije predstavljaju poluprovodnike koji pretvaraju solarnu energiju u električnu. Princip njihovog rada se može ukratko objasniti na sledeći način: Sunčeva energija stiže u obliku fotona do Zemlje gde dolazi u kontakt sa solarnom ćelijom. Fotoni joj predaju svoju energiju i na taj način izbijaju elektrone iz površinskih slojeva atoma foto-ćelije, putem fotoelektričnog efekta. Trenutno oslobođeni elektroni se kreću ka drugoj strani panela i stvaraju razliku potencijala odnosno električnu energiju.

1.3.4. Energija vetra

Šire posmatrano, može se reći da energija vetra predstavlja oblik Sunčeve energije, jer vetar nastaje kao posledica različitih vrednosti vazdušnog pritiska u funkciji temperature usled neravnomernog zagrevanja Zemljine površine. Baš zbog toga nastaju vetrovi - u težnji da se pritisci izjednače. Na Zemlji postoje područja u kojima duvaju tzv. stalni vetrovi, i ta su područja idealna za iskorišćavanje energije vetra. To su obale okeana i morske pučine. Štaviše, pučine su najbolja mesta za iskorišćavanje energije vetra, ali su troškovi instalacije postrojenja najviši. Pri pretvaranju kinetičke energije vetra u mehaničku energiju, koristi se samo razlika brzine na ulazu i izlazu u postrojenje, tako da nema nikakvog zagađivanja okoline. Energija vetra je najpotentniji izvor energije u odnosu na sve ostale obnovljive izvore, i obim njenog korišćenja poslednjih godina pokazuje trend uniformnog porasta na svetskom nivou (Slika 1.2.). Vetrenjače se često povezuju u parkove vetrenjača, a na električnu mrežu su spojeni preko transformatora. U odnosu na snagu električne struje koju proizvode vetroparkovi se priključuju na mreže nižeg ili višeg napona. U zavisnosti od prihvatnih kapaciteta elektromreže parkovi vetrenjača mogu imati kapacitet i do nekoliko stotina MW. Turbine na vetar znatno su usavršene u poslednjih nekoliko godina i u ovoj oblasti prednjači nemačko tržište [16] [17].



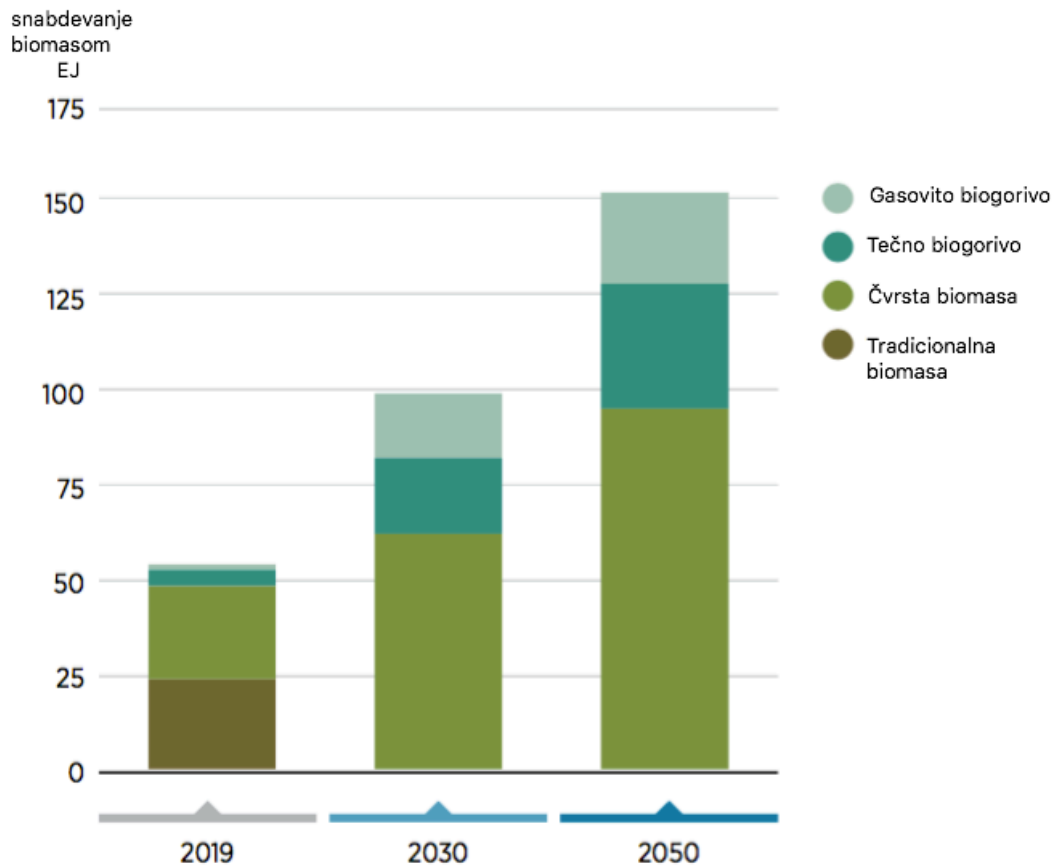
Slika 1.2. Trend korišćenja energije vetra na svetskom nivou (TWh) sa predikcijom do 2030. godine [20]

1.3.5. Energija biomase

Prema direktivi Evropske komisije biomasa je po definiciji “biorazgradivi deo proizvoda, otpada i ostataka biološkog porekla iz poljoprivrede (kako biljnog tako i životinjskog porekla), šumarstva i srodnih sektora kao što je ribarstvo i akvakultura kao i biorazgradivi deo industrijskog i komunalnog otpada“(2009/28/EC) [19]. Potencijal biomase koji je visoko rangiran na globalnoj energetske sceni doprinosi porastu njene upotrebe. Ovome u prilog ide podatak da je u svetu 2019. godine potrošnja energije dobijene iz biomase iznosila oko 50 EJ (10^{18} J), dok se za 2050. godinu procenjuje da će iznositi preko 150 EJ [21].

Pored velikih količina biomase koje nastaju kao otpad i nus proizvodi u šumarstvu i poljoprivredi, sve je veći broj biljnih vrsta koje mogu da se gaje u te svrhe, kao što su brzorastuće drveće i zelene alge, što daje ogromne mogućnosti za primenu ovog energenta. Intenzivna primena biomase omogućila bi pojavu novih radnih mesta a osim toga, posle hidroelektrana, biomasa predstavlja najznačajniji obnovljivi izvor energije. Biomasa se u prošlosti koristila za dobijanje toplotne energije, a u novije vreme sve se više grade postrojenja za konverziju iste u

električnu energiju. Električna energija iz biomase se, kao i kod fosilnih goriva, dobija sagorevanjem, gde se toplotna energija pretvara u mehaničku, a ona u električnu energiju. Na slici 1.3. prikazane su prognoze za korišćenje biomase koje bi se uklapale u tzv. 1,5°C scenario - ograničenja daljeg porasta globalne temperature, što je dogovoreno 2015. godine u Parizu [22].



Slika 1.3. Korišćenje biomase prema 1,5°C scenariju [21]

Tok i pregled svetskog i evropskog zakonodavstva, stanja regulative, vezan za zaštitu životne sredine, održivi razvoj, konkurentnu i sigurnu energiju, biće prikazan u nastavku.

1.4. Međunarodne regulative u domenu zaštite životne sredine

Međunarodna saradnja u oblasti ekologije iznedrila je veliki broj dokumenata koji se bave zaštitom životne sredine. Fokus modernog društva, koje se bazira na znanju i korišćenju naučnih saznanja, društva koje čvrsto veruje nauci, paralelno razvija ekologiju i ekonomiju i insistira na odgovornosti prema sadašnjim i budućim generacijama. Kako je čovekov odnos prema prirodi neracionalan, kratkovid i agresivan, ekološka politika je postala jedna od najbitnijih sfera - oblasti delovanja, koja mora ojačati svoju praktičnu primenu na što širem nivou. Postojanje niza konvencija i sporazuma predstavlja početni vid borbe, ali ukoliko njihova primena ne zaživi u praksi ili ima samo parcijalnu pristup, onda problemima kojima se one bave, nije moguće stati na put.

Očuvanje životne sredine predstavlja problem i brigu cele međunarodne zajednice i uslov je opstanka čovečanstva, i nije, kako se nekada smatralo, problem lokalnog karaktera koji je vezan za industrijske zone i urbane sredine. Prihvatanjem ovakvog stava, razvila se međunarodna ekološka saradnja i došlo je do formiranja pravnih okvira zarad uređenja i unapređenja poimanja u ovoj oblasti. Priroda ne prepoznaje političke i ekonomske granice i traži jedinstvenu i zajedničku borbu.

1.4.1. Istorijski osvrt i integrisani pristup

Krajem šezdesetih godina XX veka, rezultati naučnih istraživanja su prvi put ukazali da postoji potreba da se zaštiti životna sredina. Tada su Ujedinjene nacije (UN) počele da se bave ovim problemom i na inicijativu Švedske održana je Konferencija UN o čovekovoj sredini u Stokholmu 1972. godine - Stokholmska konferencija [23]. Tom prilikom usvojena je Deklaracija UN o čovekovoj sredini u kojoj je definisano 26 principa zaštite životne sredine koje, države članice, treba da implementiraju u svoja zakonodavstva. Na ovoj Konferenciji doneta je Odluka o osnivanju centralnog organa UN koji će se baviti problemom životne sredine Programa UN za životnu sredinu- UNEP (United Nations Environment Programme), koji je sa radom počeo 1973.godine [24].

Sledeća - i najbitnija - UN konferencija o životnoj sredini i održivom razvoju bila je 1992. godine u Rio de Ženeiru. Na ovoj konferenciji usvojena je Deklaracija o Životnoj sredini i održivom razvoju koja je razradila principe Stokholmske konferencije i u koju su dodati novi, u cilju jedinstvenog uređenja sistema zaštite životne sredine na nacionalnom i globalnom planu [25].

Briga o životnoj sredini jedino se efikasno može realizovati na globalnom nivou paralelno sa problemima energetike. EU je jednostavno i logično, u tom cilju postavila kao prioritet povećanje obima korišćenja OIE, štednju energije i njeno efikasno korišćenje kao i smanjenje korišćenja prljave energije i favoriziranje zelene! Od velikog značaja jesu regulative koje se odnose na kontrolu zagađenja. Među njima se izdvojila Arhuska konvencija čiji je cilj slobodan pristup informacijama od javnog značaja i učešće javnosti u odlučivanju po pitanjima vezanim za

zaštitu životne sredine [26]. Zatim, Kjoto protokol koji ima za cilj da obaveže države potpisnice da stabilizuju i smanje emisije zagađujućih gasova i umanje rizik od klimatskih promena [27].

Dokazano je da su najveći zagađivači životne sredine fosilni izvori energije kojima se obezbeđuje nesmetani razvoj moderne civilizacije. Tako intenzivan razvoj sa druge strane doveo je civilizaciju u disbalans sa prirodom što ih zajedno primorava da promene osnovna stanovišta i logiku postojanja. U praksi to znači postojanje odgovarajućih zakonskih regulativa koje pri donošenju propisa iz oblasti energetike moraju biti usaglašeni sa propisima iz oblasti zaštite životne sredine. Ovakav pristup zove se integrisani- onaj u kome nema podele na energetske i ekološku stranu.

Integrirani sistem podrazumeva da je potrebno da se povežu svi njegovi elementi i to: nosioci energije, infrastrukturne komponente i potrošači. U ovakvom sistemu, vodonik bi mogao da bude glavni nosilac dekarbonizacije industrije, transporta, proizvodnje električne energije širom Evrope. Strategija za klimatski neutralnu Evropu postavila je smernice kojima preporučuje ulaganja, regulacije, tržišta, kao i forsiranje istraživanja i stvaranje inovacija koja treba da doprinesu da se potencijal vodonika kao goriva iskoristi najefikasnije. Prioritet je razvoj zelenog vodonika koji se proizvodi upotrebom OIE a koji samim tim ima najvišu ekološku vrednost. Ovaj čin jasno pokazuje važnost i nadu koja se daje vodoniku kao gorivu budućnosti.

Iz pravnog ugla posmatrano odnos energetike i zaštite životne sredine ostvaren je kroz uticaj koji energetika vrši na celokupnu životnu sredinu. Obe ove discipline su pravno veoma složene i njihovi odnosi se uređuju zakonima, propisima, sudskom praksom, pravnim načelima, sporazumima.

1.4.2. Rio, Kjoto, Pariz

Globalno zagrevanje koje je jedna od posledica klimatskih promena, može da dovede do katastrofalnih posledica po živi svet. Prognoze tj. scenarija koji predviđaju porast nivoa mora, sve manje pitke vode, devastaciju staništa, pojava bolesti, ujedinili su ekološku zajednicu na globalnom nivou. Ovaj proces veoma je delikatan, jer je bilo neophodno doneti određene političke odluke koje za sobom nose ekonomske efekte koji se, ne baš povoljno, odnose na aktivnosti gigantskih proizvođača i potrošača fosilnih goriva.

Godine 1992. na konferenciji u Rio de Ženeiru usvojena je Okvirna konvencija UN o klimatskim promenama koja nije bila obavezujuća ali njen cilj bio je da utiče na razvijene zemlje da ne povećavaju svoje emisije GHG [25].

Prvi međunarodni obavezujući akt bio je Kjoto protokol, usvojen na trećoj “Konferenciji članica Okvirne konvencije UN o promeni klime”, koja se odigrala 1997. godine u Kjotou (Japan). Protokol iz Kjota uz Okvirnu konvenciju UN o promeni klime (*eng. The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*) je dodatak međunarodnom sporazumu o klimatskim promenama, koji je potpisan sa ciljem smanjenja emisije GHG [27]. Međutim, da bi ovaj dokument bio pravosnažan uslovi koji su trebali da budu zadovoljeni su da ga ratifikuje najmanje 55 država i da one predstavljaju najmanje 55% ukupnih zagađivača. Ovi uslovi bili su ispunjeni tek 16. februara 2005. godine pošto je Ruska federacija ratifikovala

protokol [28]. Što se tiče EU, ona je Kjoto protokol ratifikovala odlukom Saveta ministara EU, koja je stupila na snagu 31. maja 2002. godine [29].

Republika Srbija je postala članica Kjoto protokola 17. januara 2008. godine kada je donela zakon o njegovom potvrđivanju.

Protokol su potpisale 192 države, što čini 61% zagađivača. Na žalost, planirani efekti ovoga protokola, nisu postignuti jer, se njime najveći zagađivači nisu obavezali. Države potpisnice Protokola, podeljene su u dve grupe čiji je kriterijum razvijenost. Tako se obaveze razlikuju za razvijene i zemlje u razvoju.

Kjoto protokol je zasnovan na tri stuba, preciznije rečeno tri fleksibilna mehanizma: mehanizam čistog razvoja, trgovanje emisijama i zajednička implementacija. Prema članu 12. Protokola, mehanizam čistog razvoja dozvoljava razvijenim zemljama investiranje u projekte za redukciju GHG u zemljama u razvoju, što pospešuje njihov održivi razvoj, a sa druge strane dovodi do smanjenja emisije gasova u razvijenim zemljama. Ovaj mehanizam je zasnovan na logici da je efikasnije i lakše smanjiti emisije GHG u zemljama u razvoju, koje imaju zastarelu tehnologiju, nego u razvijenim.

Trgovanje emisijama podrazumeva da razvijene zemlje mogu da otkupe određeni deo emisija GHG od zemalja u razvoju, ili ulažu u njihovu infrastrukturu, i na taj način steknu "emisione kredite". Osim toga, ako je u mogućnosti, zemlja u razvoju može sama da ulaže u projekte za smanjenje emisija GHG na svojoj teritoriji, i da samostalno trguje emisionim kreditima, pod uslovom da je ratifikovala Kjoto protokol.

Svetska banka osnovala je posebne fondove čiji je zadatak investiranje u projekte za smanjenje emisija u zemljama u razvoju kroz koje se ostvaruje profit trgovinom emisionim kreditima koji se stiču ovim investicijama [30]. Bez obzira na značaj ovog Protokola, postoje zemlje koje ga nisu ratifikovale (SAD) i one koje su istupile iz njega u drugom periodu važenja, a to su: Rusija, Japan, Novi Zeland i Kanada.

Manjakavosti Protokola u Kjotu, rešavane su u Dohi, Katar krajem 2012. godine, na konferenciji UN. Amandman u Dohi se odnosio na period od 2013-2020. godine. Prema nekim mišljenjima Doha amandmani produžavaju anomalije Kjoto protokola, tako što ostavljaju mogućnost kompanijama razvijenih zemalja da ostvaruju veći procenat emisija i zahvaljujući tome ostvaruju profit na tržištu emisija [22].

Pariski sporazum, rezultat je zasedanja na konferenciji UN, koja se održavala od 30. novembra do 12. decembra 2015. godine u Parizu. Sporazum je sastavljen od 29 članova, iznad kojih se izdvaja cilj ograničenja rasta temperature značajno ispod 2°C u poređenju sa predindustrijskim periodom. Princip „zajedničke i podeljene odgovornosti”, koji potiče iz Kjota, ostao je na snazi, tako da su razvijene zemlje u obavezi da više doprinesu smanjenju emisija štetnih gasova. Zaključak ovog aktuelnog sporazuma je da se klimatske promene moraju rešavati bez odlaganja, na globalnom i lokalnom nivou. Uslov za stupanje na snagu ovog sporazuma je isti kao i u slučaju Kjoto - 55+55%. Prva evaluacija planirana je za 2023. godinu, kada će se utvrditi novi „nacionalno ustanovljeni doprinosi“ [22].

Pariski sporazum je obavezujući akt za sve države potpisnice i to za period od 2021-2030. godine. Sporazum je utemeljen na naučnim činjenicama i rešenjima koja podrazumevaju implementiranje novih, naprednih tehnologija ali i novih obrazaca ponašanja. U prevodu to znači

prestanak korišćenja fosilnih goriva i prelazak na obnovljivu energiju, čije strategije postoje u svim razvijenim zemljama. U Sporazumu je decidno istaknuta obaveza saradnje između zemalja i mehanizmi ostvarivanja iste, odnosno obaveza razvijenih zemalja da formiraju fondove iz kojih se pomaže zemljama u razvoju zarad ostvarenja svojih ekološko-energetskih ciljeva [31].

Pariski sporazum oglasio je da je era fosilnih goriva okončana i da novo razdoblje počinje stvaranjem nacionalnih politika koje kao prioritet uzimaju očuvanje čiste i zdrave životne sredine. Pariski sporazum favorizuje mehanizam reputacionog rizika umesto pravnih sankcija i na taj način podstiče strane da povećavaju svoje učinke na svakih pet godina [31].

1.4.3. Arhuska konvencija

Na "Četvrtoj konferenciji ministara: Životna sredina za Evropu, Arhus, Danska "(25. jun 1998. godine), usvojena je Arhuska konvencija o dostupnosti informacija, učešću javnosti u donošenju odluka i pravu na pravnu zaštitu po pitanjima životne sredine, organizovana od strane Ekonomske komisije UN za Evropu.

Arhuska predstavlja međunarodno-pravni instrument koji povezuje ekološka prava i prava čoveka na zdravu životnu sredinu, uz odgovornost prema budućim generacijama. Ova konvencija je koncipirana tako da demokratsku javnost ubedi da prihvati održivi razvoj kroz koji će uticati na formiranje i donošenje odluka koje imaju ekološki značaj.

Arhuska konvencija tj. njene norme podeljene su u tri grupe:

1. Prva grupa normi odnosi se na pravo javnosti da pristupi informacijama od ekološkog značaja, kao i pravila prema kojima su te informacije dostupne.
2. Druga grupa normi odnosi se na pravo javnosti da donosi odluke značajne za životnu sredinu.
3. Treća grupa normi predstavlja pravo na pravnu zaštitu po pitanjima životne sredine. Javnosti moraju biti dostupne informacije i procedure o pokretanju upravnih i sudskih postupaka [32].

Arhuska konvencija doprinela je razvoju međunarodnog prava u oblasti životne sredine i samim tim obezbedila je više prava građanima i nevladinim organizacijama u toj oblasti. Konvencija je doprinela kvalitetnom upravljanju životnom sredinom i unapređenju održivog razvoja u regionu Evrope. Pristup informacijama doprinosi poznavanju materije iz oblasti zaštite životne sredine što rezultira efikasnom učešću javnosti u procesu donošenja odluka i finalno, zdravijoj i čistijoj životnoj sredini. Takođe, doprinos Konvencije odnosi se i na razvoj oblasti ljudskih prava u širem smislu te reči. Primena koncepta učešća javnosti u donošenju odluka, doprinosi ostvarivanju prava na zdravu životnu sredinu, kao opšteg, ljudskog prava i demokratizacije društva [26].

Primena ove konvencije odnosno njeno sprovođenje u praksu, je veoma složen proces koji zahteva sinhronizaciju različitih učesnika u sistemu zaštite životne sredine, ali i ozbiljne promene u javnoj upravi i društvu u celini [26].

1.5. Regulative Republike Srbije u domenu zaštite životne sredine

Među zakonima i propisima Republike Srbije, njih preko 100 odnosi se na životnu sredinu i većina je usklađena sa zakonodavstvom i direktivama EU. Pariski sporazum o klimatskim promenama Srbija je potpisala zajedno sa Okvirnom Konvencijom UN o promeni klime (UNFCCC), avgusta 2017. godine.

Uredba Evropskog parlamenta od 11. decembra 2018. o Upravljanju Energetskom zajednicom i klimatskim akcijama, delimično je inkorporirana u Zakon o izmenama i dopunama Zakona o energetici [33], kojim se definiše pravni okvir za Integrisani nacionalni plan za energetiku i klimu i za izveštavanje o realizaciji ovog plana.

Republika Srbija permanentno radi na unapređenju pravnog okvira koji ima direktne ili indirektno veze sa sprovođenjem aktivnosti vezanih za klimatske promene. U tom smislu može se istaći da je Srbija potpisala Sofijsku deklaraciju o Zelenoj agendi za zapadni Balkan, 10. novembra 2020. godine, kojom se obavezala da će razvijati tržišne modele za podsticanje OIE, uvesti takse na emisiju CO₂ i da će postepeno ukidati subvencije na fosilna goriva- ugalj, i to sve do 2050. godine.

U novembru 2021. na konferenciji UN o klimatskim promenama - COP 26, Republika Srbija je potpisala Klimatski pakt iz Glazgova, koji je prvi klimatski sporazum kojim se nedvosmisleno/ izričito planira smanjenje korišćenja uglja.

Zaštita životne sredine je regulisana nacionalnim i opštinskim zakonima i podzakonskim aktima. Na stranici <http://www.pravno-informacioni-sistem.rs>, nalazi se kompletna lista propisa vezanih za ovu oblast [34].

Zakon o klimatskim promenama usvojen je 18. marta 2021. godine [34], a njegovom primenom doći će do smanjenja GHG i prilagođavanja na promene izazvane novim klimatskim uslovima.

Republika Srbija radi na harmonizaciji svog zakonodavstva sa evropskim kao i prilagođavanju energetskog sistema energetskom sistemu EU. Osim toga, Srbija je na putu usvajanja novog Nacionalnog adaptacionog plana (NAP), obaveznog dokumenta koji proističe iz Pariskog sporazuma. Zadatak NAP-a je usklađivanje sa sektorskim planovima i programima. NAP obavezuje resorna ministarstva i lokalne zajednice da svake četiri godine podnose izveštaje o sprovedenim merama. Prema Zakonu za izradu NAP-a, zaduženo je Ministarstvo zaštite životne sredine i NAP se odnosi na period od deset godina. Osim toga Ministarstvo zaštite životne sredine nadležno je i za:

- Procenu emisije GHG,
- Uspostavljanje sistema za izveštavanje o procedurama, merama i projekcijama,
- Pripremu ažuriranog dvogodišnjeg izveštaja i izveštaja koji priprema Republika Srbija za Okvirnu konvenciju UN o klimatskim promenama.

Zakon o klimatskim promenama, jeste osnova za: izradu Studije umanjenja emisije CO₂ sa akcionim planom i programom za prilagođavanje klimatskim promenama; uspostavljanje sistema za praćenje i izveštavanje o emisijama GHG na nacionalnom nivou; predviđanje količine

emisije GHG iz poznatih izvora, njihove eliminacije i uspostavljanja sistema za izveštavanje o procedurama, merama i projekcijama GHG u skladu sa zahtevima Pariskg sporazuma.

Cilj svih sporazuma, konvencija, dogovora, kako globalnih tako i lokalnih jeste da se ideja o ekološki odgovornoj državi osvesti i da bude jasno da takva država počiva na principu odgovornog pojedinca, koji zna šta ostvalja u nasleđe novim generacijama.

2. Vodonik i vodonična energija

Vodonik je veoma važna industrijska sirovina i ima veliku upotrebnu vrednost. Vodonik se koristi u mnogim granama industrije, počevši od hemijske (proizvodnja amonijaka i metanola), preko naftne (proizvodnja goriva za motorna vozila), pa sve do prehrambene (hidrogenizacije masti i ulja). Potreba za vodonikom raste stabilnom stopom, već četiri dekade i prognozira se da će interesovanje i investiranje u njega biti sve veće [35].

Vodonik je najlakši i najzastupljeniji element u univerzumu i na Zemlji. On čini skoro 60% mase Sunca, a na Zemlji je po masenom udelu na devetom mestu. Vodonik je element broj jedan u Periodnom sistemu elemenata. On je izgrađen od jednog elektrona i jednog protona, a postoji u tri izotopska oblika (različiti broj neutrona u jezgri): protijum, deuterijum i tricijum. U normalnim uslovima on je gas bez mirisa, ukusa i boje. U reakciji sa kiseonikom, pri kojoj se otpušta značajna količina energije, nastaje voda (1).



Vodonik ima visok udeo energije po masi, skoro tri puta veći od benzina. On je nosilac energije nije njen izvor, ne postoji slobodan u prirodi i dobija se iz sirovina koje su njime bogate. To su prirodni gas i drugi ugljovodonici i naravno voda. Najveći izazov današnjice je kako na najbolji način osloboditi vodonik iz njegovih jedinjenja i efikasno ga primeniti. Najbolji način mora da zadovolji mnoge uslove – energetske, ekonomske i ekološke, što nije lako ali se na ovim zahtevima temelji *vodonična ekonomija*.

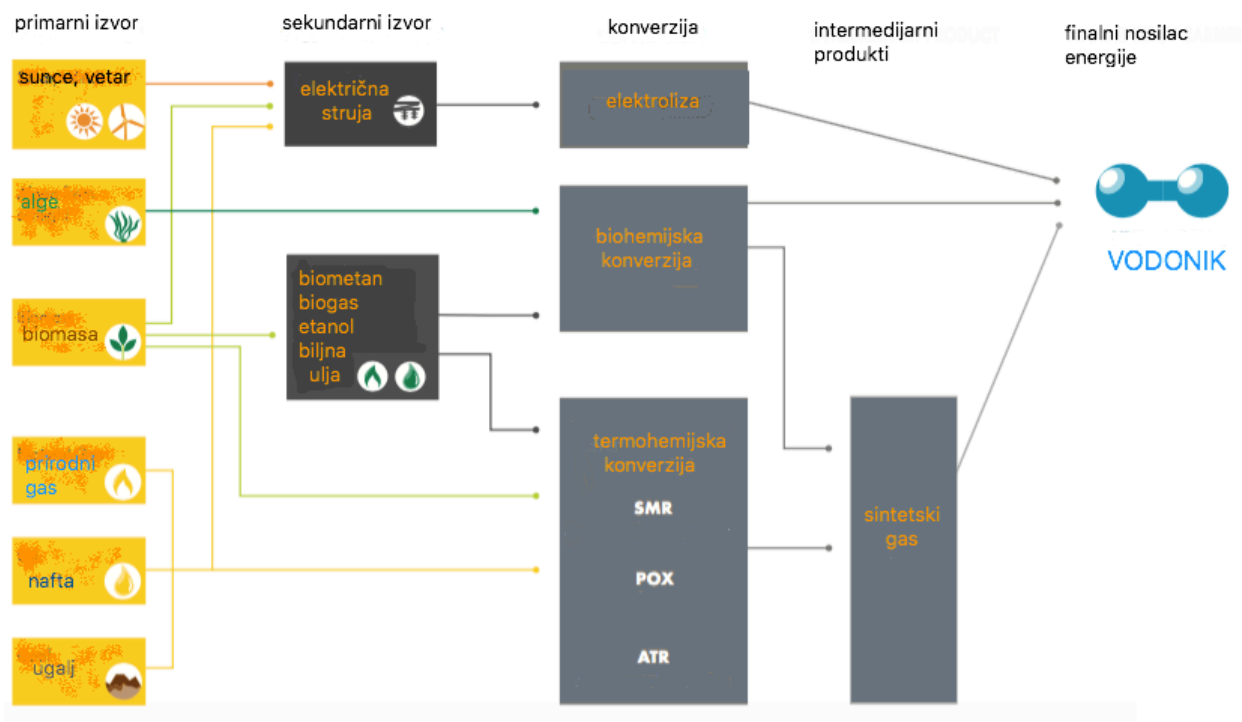
Komercijalna proizvodnja vodonika širom sveta iznosi oko 40 miliona tona, što predstavlja oko 1% svetske energetske potrebe. Ova količina koristi se kao hemijska sirovina u petrohemijskoj, prehrambenoj, elektronskoj industriji i u metalurgiji.

Vodonik ima potencijal da obezbedi energiju u svim ekonomskim sektorima: transportu, građevinarstvu i industriji. On može da dopuni ili zameni električnu energiju koja se isporučuje mrežom do finalih potrošača. Osim toga, vodonik može imati ulogu depoa za skladištenje energije koja se dobija iz intermitentnih obnovljivih izvora, kao što su solarna i energija vetra. I napokon, kada se koristi kao gorivo u gorivnim ćelijama, konvertuje se u električnu energiju na efikasan način u stacionarnim i mobilnim uređajima. Upravo zato, gorivne ćelije mogu i trebaju da zamene konvencionalna napajanja u prevoznim sredstvima. Osim toga, vodonik je idealno gorivo za udaljena/izolovana naselja do kojih električna mreža ne može doći ili je njeno prisustvo iz ekonomskih razloga neisplativo. Vodonik se dobija posredstvom raznih izvora (fosilnih, nuklearnih, obnovljivih) i zato može redukovati/smanjiti zavisnost i poboljšati energetske sigurnost [36].

2.1. Dobijanje vodonika

Dobijanje vodonika obuhvata široku paletu procesa. Proseci i tehnologije koji se najviše koriste podrazumevaju korišćenje fosilnih goriva i oni čine 90% svetske proizvodnje vodonika. Vodonik se dobija i iz OIE. Osim različitih izvora, koriste se i različite procesne tehnologije kao što su: biološke, hemijske, elektrohemijske, fotoelektrohemijske, termalne [37],[38]. Sve nabrojane tehnologije imaju različite osnove, nivoe razvijenosti i samim tim, prednosti i mane.

Različiti izvori i načini dobijanja vodonika predstavljeni su na slici 2.1. [39].



Slika 2. 1. Izvori i načini dobijanja vodonika (preuzeto i modifikovano iz [39])

2.1.1. Reforming proces

Reforming fosilnih ugljovodonika je najrasprostranjeniji metod dobijanja vodonika. Reforming je konverzija ugljovodonika i alkohola hemijskim procesima u vodonik, uz oslobađanje vodene pare, ugljen monoksida i ugljen dioksida. Reakcija se odvija na visokim temperaturama (od 700 do 900°C) i praćena je upotrebom katalizatora.

Osim toga, za reforming je neophodan oksidans koji se dodaje u polaznu sirovinu a u zavisnosti od njega, reforming se deli na:

- “Steam reforming”, reforming vodenom parom- proces u kome se vodena para koristi kao oksidans i zahteva dovođenje toplote jer je reakcija endotermna.
- Parcijalna oksidacija, podrazumeva upotrebu kiseonika ili vazduha u funkciji oksidansa. Reakcija je egzotermna, toplota se oslobađa.
- Autotermalni reforming, podrazumeva korišćenje i vodene pare i kiseonika a njihov odnos se podešava tako da ne bude ni osobađanja ni dovođenja toplote-izotermna reakcija.

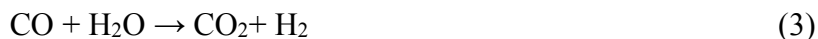
2.1.1.1. Reforming proces vodenom parom

Sirovi materijali za ovaj proces su prirodni gas i voda. Ponekad se koristi nafta i LPG. Polazna sirovina zahteva pripremu za ovaj proces a pod tim se podrazumeva uklanjanje sumpora koji se vezuje za katalizator. U sledećem koraku, metan i voda se konvertuju u vodonik prema sledećim reakcijama:



Formira se gas koji se sastoji od vodonika i ugljen monoksida, i male količine ugljen dioksida, vodene pare i ostataka ugljovodonika. Molekuli vodonika i ugljenika mogu dalje reagovati sa kiseonikom. U ovom procesu neophodno je da što manje vodonika odreaguje kako bi njegov prinos bio što veći, što se postiže dodavanjem odgovarajućih katalizatora.

U sledećem koraku, ugljen monoksid i preostala voda se konvertuju do vodonika i ugljen-dioksida u tzv, “water gas shift reaction” (3):



Sadržaj ugljen monoksida se dalje smanjuje hemijskom konverzijom. Čistoća dobijenog gasa se povećava fizičkim procesima prečišćavanja.

2.1.1.2. Parcijalna oksidacija

Parcijalna oksidacija je egzotermna konverzija teških ugljovodonika (najčešće uglja) dodavanjem kiseonika. Termalna parcijalna oksidacija se odvija pod visokim pritiskom i veoma visokoj temperaturi od oko 1250 do 1450° C. Kako se toplota oslobađa, nije potrebno koristiti eksterni izvor toplote osim za parcijalno sagorevanje sirovog materijala. Reakcija parcijalne oksidacije hexadekana, alkana koji se nalazi u sirovini, izgleda ovako:

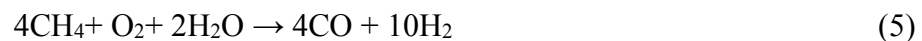


Suštinska razlika, u odnosu na prethodni proces, je ta, što se kao oksidans koristi kiseonik umesto vodene pare. Kiseonik koji se za ovu priliku koristi, proizvodi se u posebnoj proizvodnoj jedinici, što znatno povećava potrošnju energije u procesu parcijalne oksidacije.

Može se zaključiti, da je parcijalna oksidacija manje efikasna u poređenju sa reformingom mada je njena upotreba neprikosnovenjena u procesima dobijanja vodonika iz teških frakcija sirovog materijala [38][39].

2.1.1.3. Autotermalni reforming - ATR

ATR predstavlja kombinaciju dva tehnološka procesa- reforminga vodenom parom i parcijalne oksidacije. Reforming metana se odvija prema sledećoj hemijskoj jednačini:



U ovom zbirnom procesu, prinos vodonika zavisi od reforminga vodenom parom. Toplota koja je neophodna za odvijanje ovog procesa dobija se iz internog koraka, parcijalne oksidacije.

Prednost ATRa je u tome što nije zavisna od eksternog snabdevanja toplotom što čini protivtežu povećanim investicijama i operativnim troškovima koji su neophodni za komplikovane procese separacije i prečišćavanja gasa.

2.1.2. Gasifikacija

Gasifikacija je tradicionalni metod dobijanja gasovitih goriva. Ona predstavlja reakcije primarnih izvora ugljenika, u ovom slučaju uglja, sa kiseonikom u cilju dobijanja sintetskog gasa. U ovom procesu sirovi materijal se prvo suši i lomí, a zatim termički obrađuje u bezvazdušnoj atmosferi, da bi se dobile vodonična i ugljenična komponenta, koje se zatim parcijalno sagorevaju kiseonikom [40]. Prema sledećoj hemijskoj jednačini, zagrejani ugljenik i vodena para daju sintetski gas, sačinjen od CO i H₂.



U narednom koraku, ugljen-monoksid se prevodi u ugljen-dioksid, a vodena frakcija u vodonik.

Proces gasifikacije može se odvijati pod pritiskom ili na atmosferskom. Što je pritisak viši, bolje su performanse procesa, ali i cena proizvodnje raste. Gasifikacija iziskuje veliku potrošnju toplote energije, takođe. Prema načelima procesnog menadžmenta, ona se uvodi iz prethodnog procesa parcijalne oksidacije goriva.

Sastav dobijenog sintetskog gasa, drugim rečima količina i čistoća vodonika, zavisi od temperature i pritiska, rashladnog kapaciteta reaktora i vremena koje gas provodi u reaktoru [41].

2.1.3. Dobijanje vodonika iz biomase

Na svetskom nivou posmatrano, proizvodnja vodonika iz biomase je bila zanemarljiva do sada. Dugoročno gledano iz perspektive proizvodnje vodonika sa niskim sadržajem CO₂, moguće je da bi ova proizvodna opcija mogla igrati značajniju ulogu – pod uslovom da se zahtevi održivosti za biomasu koja se koristi mogu ispuniti i da su dostupne dovoljne količine.

Postoje dve metode dobijanja vodonika iz biomase- termohemijske i biohemijske.

Termohemijske metode proizvodnje vodonika iz biomase sastoje se od sledećih faza: predtretman biomase, gasifikacija biomase i prečišćavanje gasa. Prvi korak u procesu je predtretman biomase -radi formiranja čestica odgovarajućih dimenzija i dehidratacije. Tretirana biomasa podleže procesu gasifikacije koji može biti atmosferski ili pod pritiskom, direktan ili indirektan. Od vrste gasifikacije koja je primenjena zavisi sastav gasa koji se formira i udeo vodonika u njemu. Potom slede metode za prečišćavanja gasa koje su prilagođene njegovom sastavu i sadržaju pepela [42].

Biohemijska proizvodnja vodonika iz biomase podrazumeva korišćenje mikroorganizma. Može se vršiti fermentacija ili, alternativno, biofotoliza- cepanje molekula vode. Zajedničko svim biohemijskim metodama je činjenica da trenutno postoje samo na laboratorijskoj skali. Tržišna zrelost još nije blizu jer su stope konverzije u vodonik daleko ispod tržišnog praga [38] [43].

2.1.4. Elektroliza

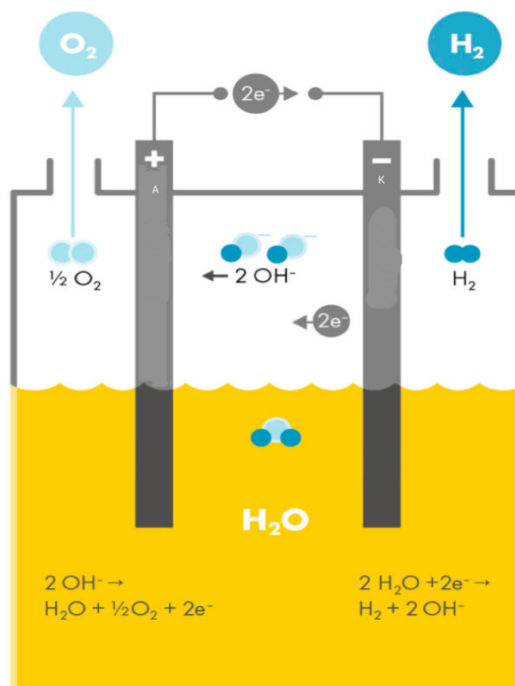
"Elektroliza je proces razlaganja elektrolitičkih rastvora pomoću električne struje uz izdvajanje proizvoda na elektrodama" [44].

Dobijanje vodonika elektrolizom odvija se kada kroz električno kolo, koga čine dve elektrode uronjene u odgovarajući rastvor, propusti jednosmerna struja. Tada se molekuli vode razlažu na kiseonik, koji se izdvaja na pozitivno naelektrisanju elektrodi- anodi i vodonik koji se izdvaja na katodi-negativno naelektrisanju elektrodi.

Elektroliza vode je metoda kojom se može dobiti vodonik izuzetne čistoće. Dobijen na ovaj način može se direktno koristiti u sofisticiranim sistemima za njegovo sagorevanje- gorivnim ćelijama [45].

Elektrolizer se sastoji od izvora struje i dve elektrode, presvučene plemenitim metalima, koje su uronjene u elektrolit, slika 2.2. Elektrolit ili jonski provodnik može biti tečnost (najčešće kalijum hidroksid, KOH) za alkalnu elektrolizu.

U alkalnom elektrolizeru, katoda (negativan pol) predaje elektrone vodenoj sredini- rastvoru. Kako je voda disosovana, to dovodi do formiranja vodonika H₂ i hidroksidnih jona OH⁻.



Slika 2.2. Princip procesa elektrolize (preuzeto i modificovano iz [39])

Nosioci naelektrisanja kreću se u elektrolitu prema anodi. Na anodi, koja predstavlja pozitivan pol, elektroni se apsorbuju negativnim OH^- jonima. OH^- joni, anjoni se oksiduju da bi formirali vodu i kiseonik. Kiseonik se izdvaja na anodi. Membrana ne dozvoljava da se produkti elektrolize- gasoviti H_2 i O_2 mešaju, ali dozvoljava prolazak OH^- jona.



Efikasnost elektrolize je determinisana količinom struje koja se koristi za izdvajanje vodonika.

U zavisnosti od metode koja se koristi efikasnost vodenog elektrolizera trenutno iznosi 60-80%.

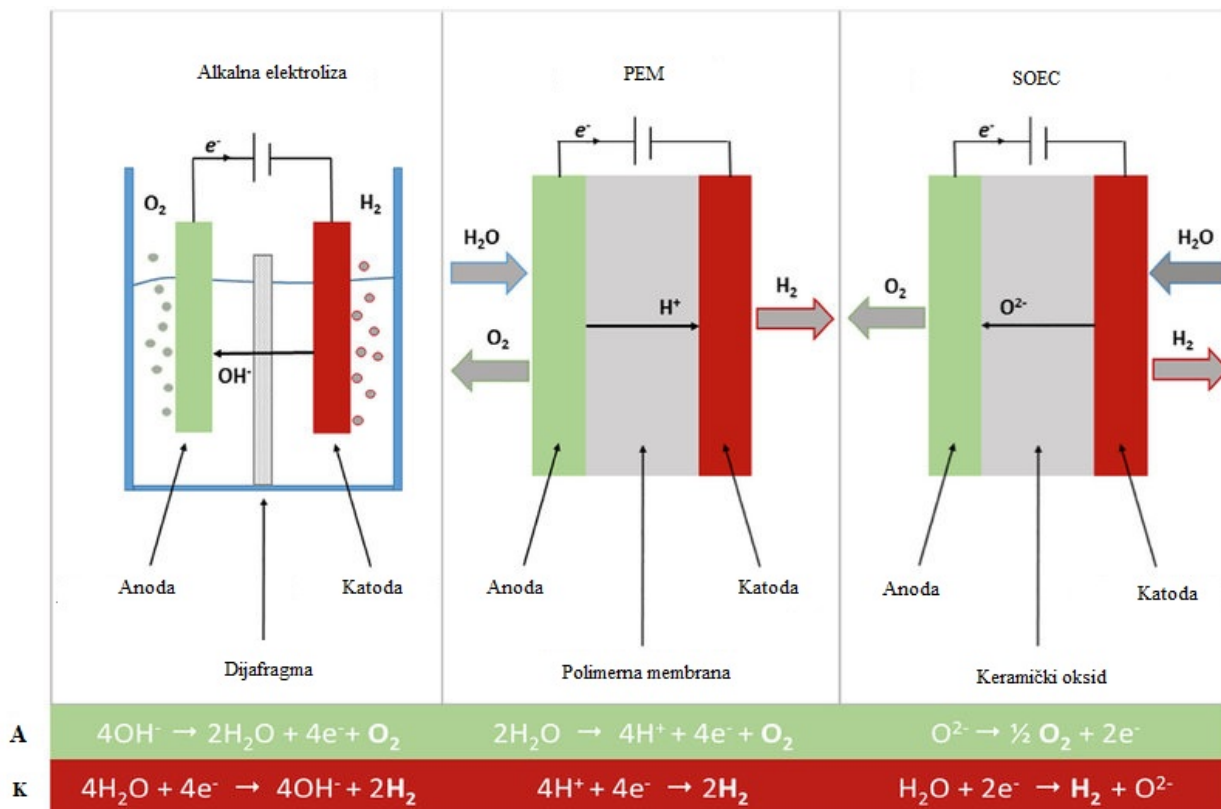
Elektrolizeri se sastoje od individualnih ćelija i centralnog sistema jedinica. Oni su definisani elektrolitičkim materijalom i radnom temperaturom. Postoje niskotemperaturni: AE (Alcaline Electrolyser), PEM (Polymer Electrolyte Membrane), AEM (Anion Exchange Membrane) i visoko temperaturni SOEC (Solid Oxide Electrolyzer Cell) koji su još u fazi razvoja i istraživanja i nisu komercijalno dostupni, slika 2.3.

PEM elektrolizere čini čvrsta polimerna membrana i dva elektrodna sloja koji sadrže katalizatore za katodnu i anodnu reakciju. Polimerna membrana ima funkciju elektrolita i propusna je za protone [45].

SOEC elektrolizeri u ulozi elektrolita imaju čvrste okside ili keramiku i rade na veoma visokim temperaturama (od 500 do 800°C), jer se za ubrzanje kinetike elektrodne reakcije ne koriste katalizatori [45].

Niskotemperaturni elektrolizeri su dostupni na tržištu, a među njima AE su ubedljivi lideri, gledajući po instaliranim kapacitetima širom sveta. PEM su se pojavili početkom XXI veka, dok su AEM „sveži na tržištu“.

Performanse različitih tipova elektrolizera date su u tabeli 2.1.



Slika 2.3. Šematski prikaz tri elektrolitičke tehnologije za dobijanje "zelenog" vodonika (preuzeto i modificirano iz [46])

Trenutni prioriteti istraživača fokusirani su na podizanje efikasnosti elektrolize što podrazumeva duži operativni vek elektrolizera, redukovanje troškova kao i razvoj fleksibilnih sistema koji su adaptirani na intermitentne i fluktuirajuće izvore energije.

Ekonomska privlačnost produkcije vodonika elektrolizom je dosta zavisna od cene struje. Prateći cene električne energije u protekloj dekadi, zaključuje se da je elektroliza skuplja od SMR [47]. Za dobijanje vodonika elektrolizom potreban je pogodan i isplativ izvor struje, što su upravo OIE.

Tabela 2.1. Performanse različitih tipova elektrolizera (preuzeto i modificirano iz [39])

Tip	Temperatura (°C)	Elektrolit	Veličina postrojenja		Efikasnost (%)	Vek trajanja (god.)	Čistoća H ₂ (%)	Kapitalni troškovi* (€/kW)
AE	60 – 80	KOH	0,25 - 760 Nm ³ H ₂ /h	1,8-5300 kW	65 – 82	20 - 30	99,5 - 99,998	620–1170
PEM	60 - 80	Polimerna membrane	0,01 - 240 Nm ³ H ₂ /h	0,2-1150 kW	65 – 78	10 – 20	99,9 - 99,999	1090–1650
SOEC	700 - 900	Keramički oksid	laboratorijski-eksperimentalni stupanj		85 (laboratorija)	n/a	99,9	>1560
								*za 2020. godinu

Upoznali smo se sa različitim načinima/tehnologijama dobijanja vodonika. One se dele, ne samo u zavisnosti od izvora energije koji se koristi za njihovo dobijanje (fosilni ili obnovljivi) već i po veličini i lokaciji proizvodnih jedinica. U zavisnosti od potreba i načina snabdevanja, vodonik se može dobijati decentralizovano, u blizini potrošača (proizveden na maloj skali) ili u velikim centralizovanim poljima sa kojih se transportuje gasovodom ili cisternama do stanica za punjenje.

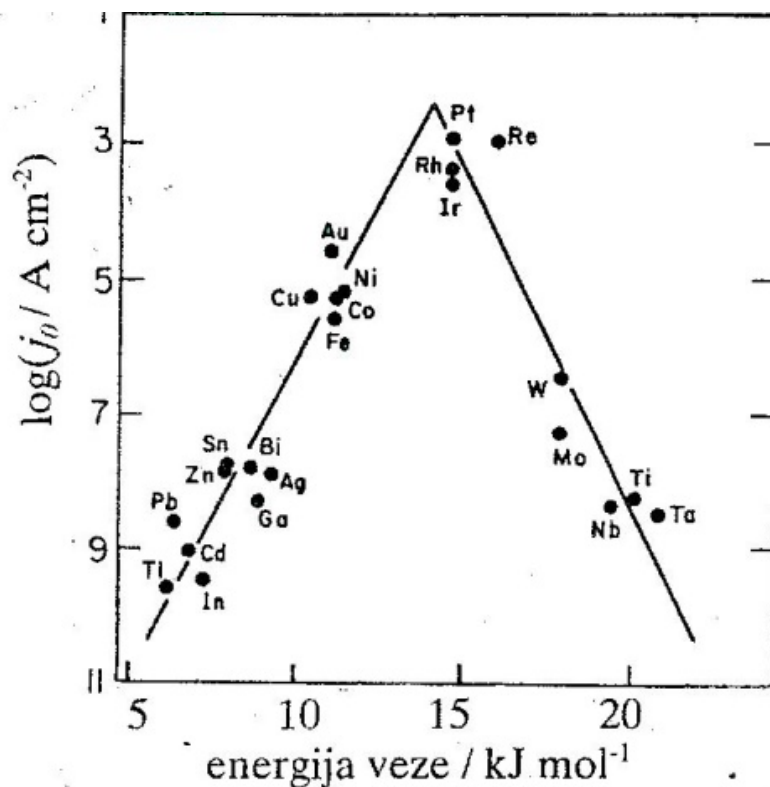
2.2. *In situ* metoda elektrolitičkog dobijanja vodonika

Da bi elektroliza postala efikasnija, energetske gubitke treba da se svedu na minimum. Postoji više tačaka koje treba napasti da bi se to ostvarilo, a to su: geometrija ćelije za elektrolizu, razvoj novih membranskih materijala, naročito elektrokatalitičkih materijala za izradu elektroda. Postoji još jedan način za unapređenje efikasnosti elektrolitičkog procesa izdvajanja vodonika a to je dodavanje kompleksa d-metala u elektrolit tzv. *In situ* metoda dodavanja jonskih aktivatora.

In situ metoda, direktnog dodavanja jonskih aktivatora u elektrolit, pokazala je značajan boljitak, redukujući potrebe za energijom po masi dobijene jedinice vodonika u odnosu na čist elektrolit na različitim temperaturama i gustinama struje. Zakonitost koja se javlja je da su uštede energije veće na višim temperaturama i gustinama struje. Morfološke i strukturne karakteristike depozita koji se formira na katodi, kao rezultat dodavanja *j.a.*, mogu se smatrati nosiocima poboljšanja performansi procesa. *In situ* elektrodepozicija je proces koji ima određene prednosti nad procesom depozicije električnim lukom a naročito u odnosu na skupi i zahtevni proces jonske implantacije. Ona se izvodi direktnim rastvaranjem supstanci u elektrolitu za vreme samog procesa elektrolitičkog dobijanja vodonika. Uloga *j.a.* je da se deponuju na površini katode i na taj način smanjuju nadnapon koji se dovodi kolu tokom procesa izdvajanja vodonika što utiče da proces postane energetski povoljniji [45][48].

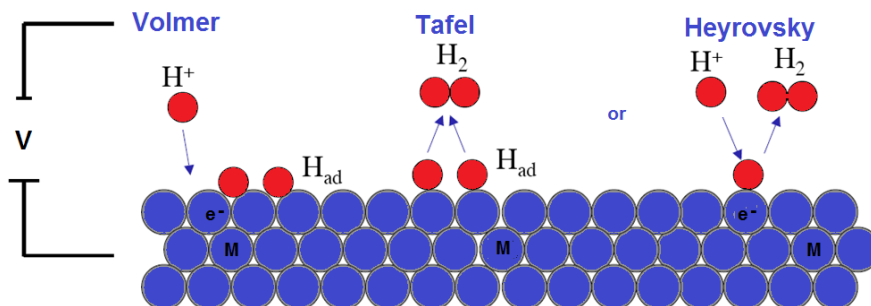
U našim istraživanjima pokazalo se da je aktivacija zavisna od koncentracije jonskih vrsta u rastvoru i od potencijala na kome se izvodi. *In situ* aktivacija je posebno atraktivna jer ne zahteva poseban korak formiranja aktivne površine elektrode, koji bi dodatno poskupljivao proces. Ovaj postupak omogućava korišćenje tankih bipolarnih ploča za industrijsku primenu, presvlačenje trodimenzionalnim depozitom sa aktivnim mestima za izdvajanje vodonika. Ovo utiče i na mogućnost postavljanja elektroda na malu razdaljinu što redukuje omske gubitke i utiče na poboljšanje efikasnosti izdvajanja vodonika. Reakcija za izdvajanje vodonika, HER je jedna od najpručavanijih elektrohemijskih reakcija zbog svog mogućnosti povezivanja sa održivim izvorima energije [45], [46].

Istraživanja koja smo sprovodili, zasnovana su na tzv. Brewer-ovoj teoriji intermetalika [51]. Ako kao meru elektrokatalitičke aktivnosti metala za HER reakciju uzmemo gustinu struje izmene, njena vrednost prati dobro definisanu zavisnost oblika vulkanske krive (slika 2.4.) u odnosu na broj elektrona u valentnim orbitalama (duž posmatrane periode) sa maksimumom kod metala sa d^8 konfiguracijom. Prema ovoj teoriji očekuje se sinergetski aktivacioni efekat kad god se kombinuju dva d-metala, jedan sa leve a drugi sa desne strane vulkanske krive. Katalitička aktivnost legure prevazilazi aktivnost pojedinačnih metala a ponekad prevazilazi i aktivnost plemenitih metala [46], [47], [49], [50], [52], [53].



Slika 2.4. Gustina struje u funkciji energije veze vodonik-metal na različitim metalima (vulkanska kriva) [45][48]

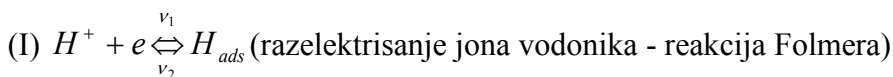
Reakcija izdvajanja vodonika – HER u alkalnom rastvoru dešava se prema trostepenom mehanizmu koji je predstavljen na slici 2.5.



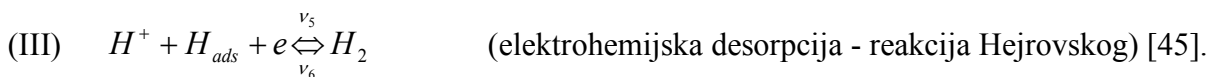
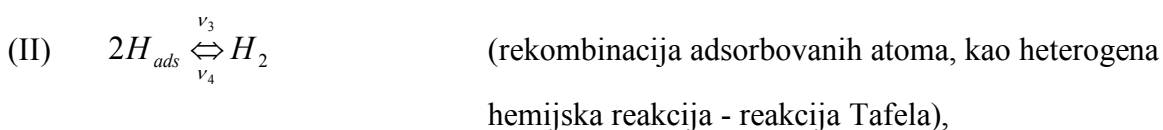
Slika 2.5. Stupnjevi u procesu izdvajanja vodonika (preuzeto iz [54])

Stupnjevi I, II i III zovu se Folmerova reakcija (razelektrisanje vodoničnog jona elektrosorpcijom), Tafelova reakcija (hemijska reakcija rekombinacije adsorbovanih atoma) i Hajrovski reakcija (elektronska desorpcija-drugi stupanj prenosa elektrona), redom [55].

Prvi stupanj je elektrosorpcija atoma vodonika pri čemu dolazi do razelektrisanja protona u baznim (pH>7) rastvorima:



U sledećem koraku atomi vodonika koji su bili adsorbovani na površini katode uklanjaju se uz nastanak molekula gasa na jedan od sledećih načina/stupnjeva:



2.3. Principi dobijanja energije iz vodonika

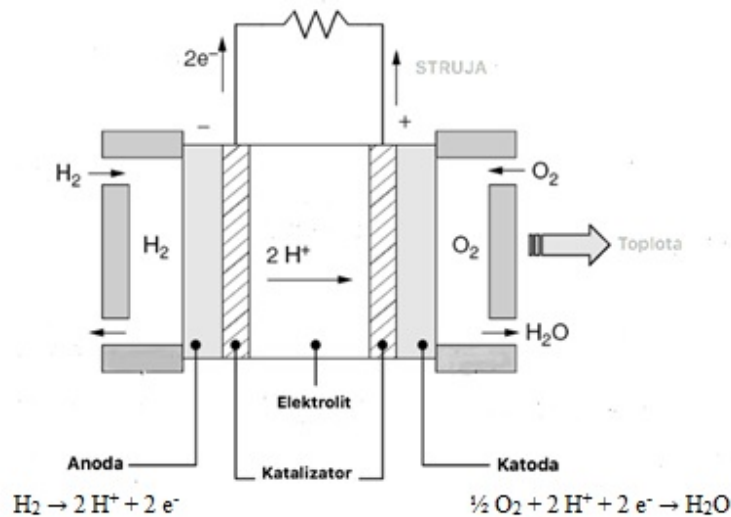
Toplota se od vodonika može direktno dobiti njegovim spaljivanjem u vazduhu ili kiseoniku kao i katalitičkom oksidacijom. Međutim, centralno mesto u dobijanju energije iz vodonika zauzimaju gorivne ćelije.

Gorivne ćelije, mogu se opisati kao uređaji koji se koriste za kontinuiranu konverziju hemijske energije goriva u električnu, dokle god su i gorivo i oksidans dostupni.

Gorivne ćelije su pokazale da je njihova efikasnost konverzije hemijske energije u električnu, preko 60%, što je znatno više od motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Osim toga veoma je važno istaći da je njihov rad ekološki podoban. Produkt ovoga naprednog sistema je voda. Dakle ugljen-dioksid i ostali zagađivači vazduha, koji loše utiču na prirodu i zdravlje ljudi, ne javljaju se u ovom procesu. Prilikom korišćenja gorivnih ćelija, buka koju proizvode je minimalna, a ona je još jedan od bitnih globalnih zagađivača i izazivač stresa.

Postoji nekoliko varijeteta gorivnih ćelija, ali je princip rada isti kod svih. Sastoje se iz tri osnovne jedinice: anode, elektrolita i katode, pri čemu su elektrode porozne na difuziju gasa. Prema vrsti elektrolita koji se koristi, razlikuje se nekoliko tipova gorivnih ćelija. Na slici 2.6. prikazana je gorivna ćelija sa PEM (eng. *Proton-Exchange Membrane*) u ulozi elektrolita.

Elektrolit, tanka polimerna membrana, ima osobinu da propušta protone ali nije provodljiva za elektrone i neutralne gasove. Vodonik (gorivo) se uvodi u gorivnu ćeliju sa jedne strane dok se oksidans (kiseonik) dovodi na suprotnu. Vodonik teži da se razloži na elektrone i protone, što i jeste cilj, a da bi se ovaj proces potpomogao elektrode se oblažu katalizatorima koji tu reakciju favorizuju.



Slika 2.6. Šematski prikaz konfiguracije gorivne ćelije sa membranom propusnom za protone (PEM) (preuzeto i modificovano iz [56])

Kako vodonik oslobađa protone u blizini anode, stvara se gradijent koncentracije protona kroz membranu pri čemu oni difunduju kroz nju i dospevaju do katode, koja preuzima svo pozitivno naelektrisanje. Pozitivno naelektrisanje privlači elektrone, no kako je membrana za njih nepropusna, oni formiraju spoljašnje strujno kolo između elektroda kojim se kreću i stižu do katode. Protok elektrona kroz spoljašnje kolo, je put kojim se energija prenosi do potrošača [57].

Razvoj gorivnih ćelija počeo je još 1839. godine kada je britanski fizičar William R. Grove shvatio da se u procesu koji je suprotan elektrolizi vode može dobiti električna struja. On je prvi ustanovio da do stvaranja električne struje dolazi na mestu gde se dodiruju tri faze: gasna (vodonik ili kiseonik), tečna (elektrolit) i čvrsta (platinska elektroda) [58], te je na taj način postulirao gorivnu ćeliju.

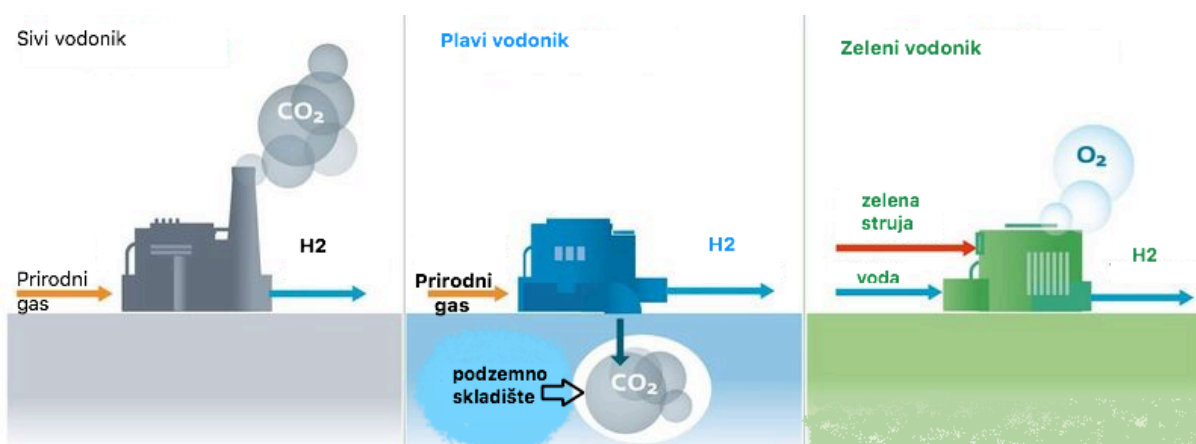
L. Mond i C. Langer, napravili su prvi korak u usavršavanju gorivne ćelije tako što su između elektroda umetnuli permeabilnu membranu, čime su odvojili katodni i anodni prostor i značajno smanjili dimenziju gorivne ćelije. Osim toga promenili su strukturu elektrode, koristeći porozne materijale, što se nije promenilo do danas. Sledeći veliki pomak u razvoju gorivnih ćelija napravio je F. T. Bacon. On je 1959. godine prezentovao svoj izum -gorivnu ćeliju koja je bila sačinjena od 40 subjedinica snage od po 5kW i efikasnosti 60% [58]. Sredinom XX veka, proizvedene su prve gorivne ćelije za pokretanje malih električnih uređaja, a prvo vozilo na ovaj pogon napravljeno je 1959. godine od strane Allis-Chalmers kompanije [58]. Godine 1955. Willard Thomas Grubb, hemičar iz General Electric-a razvio je membranu za razmenu protona (PEM) koja je svoju prvu komercijalnu upotrebu doživela na svemirskom projektu Gemini 1965. godine.

2.4. Zašto zeleni vodonik? Zašto sada?

Klimatske promene i globalno zagrevanje se primećuju na dnevnom nivou sve jače i jasnije, ukazujući nam da je potreba za dubokim promenama u energetsom matriksu koji vodi ekonomiju neophodna. Vodonik se 70-tih godina XX veka, pojavio kao moguće rešenje kada je nastupila prva velika naftna kriza. Kao gorivo on ima određene prednosti: sveprisutan je u prirodi, nije toksičan za životnu sredinu, lako se prenosi i čuva i tako obezbeđuje čistu energiju koja se može distribuirati na velike distance.

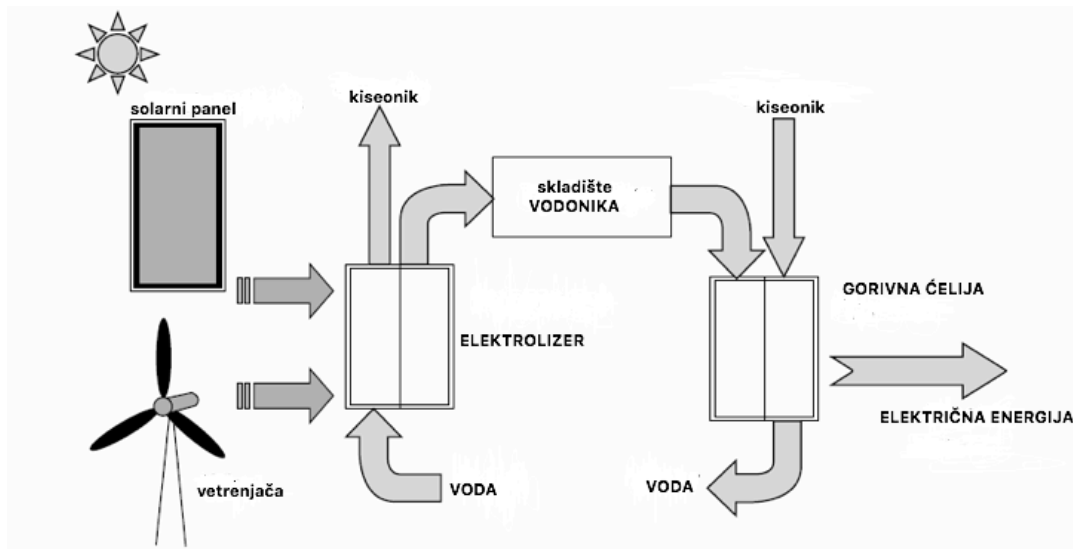
Prema izvoru iz kog se dobija, i načinu na koji se dobija, vodonik se deli na: “sivi”, “plavi” i “zeleni”. Najzastupljeniji je sivi vodonik, u skladu sa internacionalnim kodom. On se dobija iz prirodnog gasa u procesu koji je veoma nepovoljan na životnu sredinu (SMR) jer se za jedan kilogram dobijenog vodonika emituje 10 kg ugljen-dioksida.

Procesom u kome se ugljen-dioksid prikuplja i skladišti, i koji je znatno povoljniji za životnu sredinu, dobija se “plavi vodonik”. Proces dobijanja “plavog vodonika” za sobom ostavlja jedan do tri kilograma ugljen-dioksida na 1 kg produkta [59]. Slika 2.7. predstavlja tri boje vodonika.



Slika 2.7. Tri boje vodonika (preuzeto i modifikovano iz [60])

Ekološki najpovoljniji način dobijanja vodonika je onaj kojim se dobija “zeleni vodonik” a ujedno predstavlja svojevrsnu spregu elektrolize i OIE, slika 2.8.



Slika 2.8. OIE u sprezi sa elektrolizerom i gorivnim ćelijama proizvode zelenu električnu energiju (preuzeto i modifikovano iz [57])

Da bi se dostigli ciljevi koji su postulirani Pariskim sporazumom (2015) a to je redukovanje emisije ugljen-dioksida za 60% do 2050. godine [61], upotreba zelenog vodonika predstavlja esencijalni deo puta dekarbonizacije. Kao što je već istaknuto, vodonik je fleksibilan nosioc energije koji se može transformisati u električnu struju ili toplotu omogućavajući aktivnosti u industriji, transportu i domaćinstvima. Analize koje su od strane konsultantske kuće McKinsey urađene za Hydrogen Council sugerišu da tranzicija na vodoničnu ekonomiju može da doprinese smanjenju emisije ugljen-dioksida u vrednosti od 7,5 gigatona na godišnjem nivou do 2050.godine [62] (što je ekvivalent 20% ukupne emisije iz 2018).

Shvatajući trenutnu situaciju, zakonodavci su prihvatili ulogu da pospešuju i ohrabruju tranziciju na čistu energiju, jer je svest o neophodnosti dekarbonizacije porasla. Pojavljuju se nova fundamentalna otkrića, nova tehnička rešenja koja se mogu uklopiti u ekonomske aktivnosti.

U tom svetlu, zeleni vodonik nudi idealne mogućnosti širokom spektru akcionara ("stakeholders") kao što su naftne kompanije, komunalna preduzeća, potrošači, firme koje se bave razvojem OIE. Zeleni vodonik predstavlja tehnologiju koja nudi mogućnost sezonskog čuvanja energije što je bitno jer može da dopuni “prazan hod” kod npr. hidroenergetskih kapaciteta kada su u stanju niske proizvodnje. Može se koristiti u saobraćaju, u vozilima sa gorivnim ćelijama, koja su u ekspanziji a to mogu biti vozovi, brodovi, kamioni pa čak i avioni.

Od 2018. godine, energetske agencije kao što su IRENA (eng. *International Renewable Energy Agency*) i IEA (eng. *International Energy Agency*), zaključile su da “čist vodonik uživa

značajan politički i poslovni ugled, i da zakona i projekata u koje se inkorporira ima sve više, i da je vreme da se optimizuju tehnologije i padne njegova cena što će doprineti njegovoj masovnoj upotrebi”[63]. Značaj poboljšanja performansi za dobijanje zelenog vodonika ušao je u fokus kompanijama koje se rukovode procenama da će kada se to desi, cena vodonika pasti između 30 i 70 procenata i to do 2030 [62]. Kada se taj nivo dostigne zeleni vodonik će postati najvažniji energetska vektor koji će dekarbonizovati širok energetska sektor.

Dekarbonizacija ekonomskih aktivnosti zahteva kompleksan tehnološki pristup koji će biti u stanju da obezbedi razvoj holističke strategije za pristupačan, pouzdan i čist (‘nulta emisija’) energetska sistem. U ovakvim novim okvirima moraju se preispitati sve činjenice o zelenom vodoniku koji je do skora bio etiketiran i diskvalifikovan kao preskup i neisplativ. Kao što je već spomenuto, ali je bitno ponovo istaći, ovo nije prvi put da je vodonik prepoznat kao potencijalni izvor energije budućnosti, i da su interesovanja i investicije vezane za njega primljene sa skepsom. Međutim, tehnološki uslovi današnjice u poređenju sa 90-tim godima prošlog veka i početkom ovoga, su se drastično promenili te možemo izdvojiti četiri značajne razlike koje pogoduju razvoju i prihvatanju vodonične energije kao okosnice budućeg vremena:

➤ Klimatske regulative

Klimatske regulative, na čelu sa Pariskim sporazumom, su uzročnici transformacije javnih stavova vezanih za klimatske promene. Da bi se izbegao scenario koji je predviđen od strane IPCC-Međuvladin panel o klimatskim promenama, (1,5-stepeni scenario), donosioci zakona/zakonodavci/vlade i mnoge velike korporacije, rukovođene njime, trude se da osmisle energetska rešenja koja mogu da utiču na dekarbonizaciju sektora, koji su veliki zagađivači. U tom cilju nekoliko alternativnih tehnologija može da demonstrira nadahnuta rešenja za dekarbonizaciju ali zeleni vodonik je prvi među njima i on je upotrebljiv za sve vrste saobraćaja, za sezonsko skladištenje energije, za grejanje za industriju i stanovništvo.

➤ Troškovi dobijanja vodonika iz čistih izvora su dramatično smanjeni

Pojavom solarnih panela i vetrenjača (na kopnu i moru) koji su dostigli LCOE (eng. Levelized Cost Of Energy- nivelisani trošak energije) koji iznosi manje od 25 \$/MWh omogućeno je da kompanije koje se bave elektrolizom mogu da ponude tako dobijen vodonik za manje od 1,9 dolara po kilogramu [64]. Tako je moguće da decentralizovana proizvodnja zelenog vodonika uskoro postane konkurentna sa “sivim vodonikom”.

➤ Tehnologije za dobijanje vodonika su se poboljšale u performansama i troškovima

Elektrolizeri i gorivne ćelije sada imaju neuporedivo bolje performanse, duži životni vek, razvijenu sistemsku efikasnost, koštaju značajno manje i mogu se primeniti na velikom broju aplikacija. Ovakave okolnosti kreiraju jak pozitivan efekat koji rezultira padom troškova dobijanja zelenog vodonika iz ugla snabdevanja električnom energijom iz obnovljivih izvora i iz ugla usavršavanja procesa elektrolize. Ovakav progres otključao je nova istraživačka stremljenja

u vodoničnoj tehnologiji što omogućava da krajnji korisnici dobiju atraktivna rešenja, koja će biti ekonomski i ekološki imperativ.

Prvi značajan pokušaj sa se razvije vodonik kao energetska rešenje počelo je krajem XX veka. U SAD najbolja početna tačka bilo je pregled napisan od strane Hydrogen Technology Advisory Panel (HTAP), a koji je predstavljen američkom Kongresu, u kome je istaknuto da je "vodonik važan energetska vektor za SAD i ceo svet..."[65]. Autori ove studije nisu bili sami na svom putu, tokom naredne dekade vlade širom sveta puno su ulagale u istraživanja, razvoj i širenje (RD&D) vezano za vodoničnu energiju i gorivne ćelije. IEA je procenila da je između 2000 i 2010. godine taj trend bio u proseku 7%, kada nastupa pad u interesovanju i ulaganju u vodoničnu tehnologiju na 5,2% do 2017. godine [35].

Zašto je došlo do pada interesovanja može se objasniti na sledeći način. Pre svega nije bilo zahteva za zelenim vodonikom od strane industrije, zatim, cena ovako proizvedenog vodonika nije bila dovoljno konkurentna u odnosu na ostale načine njegovog dobijanja. Gorivne ćelije nisu u tom trenutku zadovoljavale operativne kriterijume- bile su kratkoživeće, nedovoljno efikasne i skupe.

U današnje vreme došlo je do pada troškova vezanih za obnovljive izvore energije, što je veoma bitno za komercijalizaciju zelenog vodonika. Postoje i druge promene koje imaju značajnu ulogu u olakšavanju pristupa tehnologijama zelenog vodonika i gorivnih ćelija. Pre svega, globalni pritisak za čistim energetskim rešenjima je transformisao civilizacijske potrebe u smeru koji favorizuje potrebu i razvoj zelenog vodonika i gorivnih ćelija. Zajedno sa ovim promenama, elektrolizeri i gorivne ćelije su napredovali i na putu su široke upotrebe.

Na globalnom planu postoji mnogo projekata koji se bave elektrolizom, koji su na različitim nivoima razvoja i popularizacije. Takođe, počevši od 2016.godine, oko 90 svetskih kompanija, koje kontrolišu više od \$2.6 trilliona prihoda, pridružilo se Hydrogen Council-u, koji je vodeći inicijator industrijskih promena i tranzicija. Skoro sve kompanije članice, bave se proizvodnjom vodonika iz fosilnih goriva, ali veoma velika većina teži da razvija elektrolitičke modele. Države usmeravaju značajna sredstva u ovu oblast [62].

Kao rezultat ovih promena i razvoja, vodonik je prepoznat od vodećih svetskih ekonomija i korporacija kao ključna komponenta koja će omogućiti tranziciju energetskog sektora.

2.4.1. Prognoze za zeleni vodonik

Zeleni vodonik pruža mogućnost lokalne proizvodnje goriva koje može biti deponovano na duge staze i jedino što zahteva su OIE i voda. Ova činjenica je veoma bitna za transformaciju energetskog sistema, naročito kod zemalja u razvoju i onih koje su zavisne od uvoza skupih energenata i samim tim u velikom riziku da li je snabdevanje gorivom delimično ili potpuno poremećeno. Ovakve krize mogu biti uzrokovane regionalnim konfliktima, geopolitičkim tenzijama- koje Evropa upravo doživljava, zatim finansijskim stanjem pa i korupcijom jer sve navedeno podriva ekonomski napredak i rast.

Od presudnog je značaja da države mogu da računaju na pouzdan i pristupačan način posedovanja energenata da osnaže svoje ekonomske aktivnosti. Većina država je razvila i

osloboditi zavisnosti od fosilnih goriva i ići putem dekarbonizacije i smanjenja ugljeničnog otiska. Trenutno, zahtevi za uvoz fosilnih goriva dovode do ekonomske i političke nestabilnosti, što može da uzrokuje lančane reakcije rasta cena i da ozbiljno ugrozi kompetitivnost i ekonomski razvoj.

Proizvodnja zelenog vodonika treba da postane stub decentralizacije i amortizer u “divljanju” cena energenta na svetskom tržištu jer redukuje potrebu za subvencijama i povlačenja iz deviznih rezervi radi uvoza struje ili energenata. Jedan od neodoljivih razloga koji ide u prilog zelenom vodoniku je njegov potencijal da, kod država koje nemaju dovoljno fosilnih rezervi-uglja, gasa, nafte, ali imaju dobr potencijal za OIE, omogući razvoj njihovog energetskog sistema i industrijskog sektora, istovremeno. To znači da zeleni vodonik može doprineti formiranju domaćeg, obnovljivog goriva koje zatim direktno utiče i doprinosi stvaranju novih poslova i socijalnih mogućnosti. Poslova vezanih za vodoničnu infrastrukturu, transport, poljoprivredu a sve to oslikava na stanovništvo- njihov standard i očuvanje životne sredine. Poljoprivredni sektor i energetski sektor mogu se prožeti kroz korišćenje vode i proizvodnju obnovljive struje za dobijanje zelenog vodonika koji se može koristiti i za sintezu amonijaka. Kako će cena elektrolize padati kao i troškovi vezani za OIE, bilo bi poželjno ulagati u budućnost u pravcu razvijanja vodoničnog tržišta, opcije koja bi mogla da transformiše ekonomije mnogih zemalja.

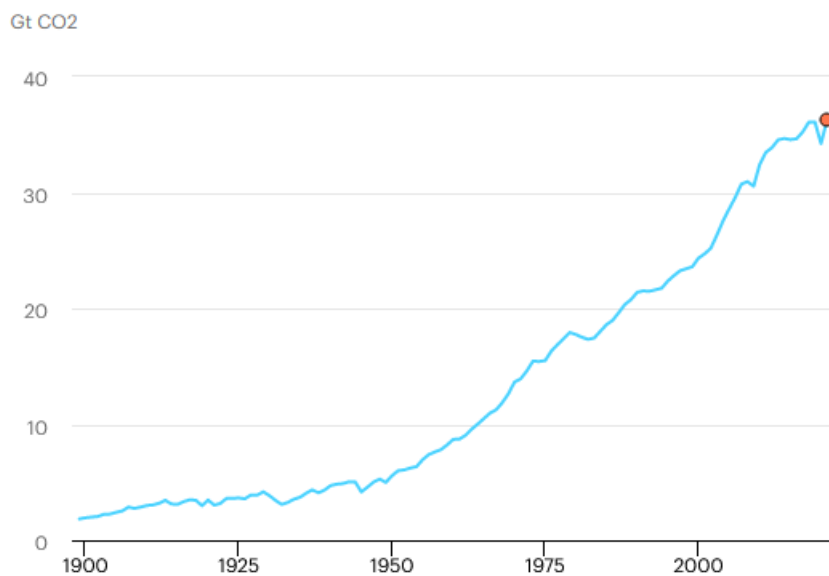
Globalna emisija ugljen-dioksida porasla je u 2021. godini za 6% i iznosila je 36,3 miliona tona, što je rekordni nivo, a posledica poljuljane ekonomije od strane Covid-19 krize [66]. Na slici 2.9. je prikazan porast emisije ugren-dioksida od početka XIX veka do danas.

Prihvatanje vodonične energije kao nove energetske osnove zahteva obimno i temeljno razumevanje svih njenih komponenti i interakcija kao i postojanje interventnih scenarija za iznenadne promene u sistemu. Ovo je novi domen sistematskog razmišljanja i sistemski dinamički pristup.

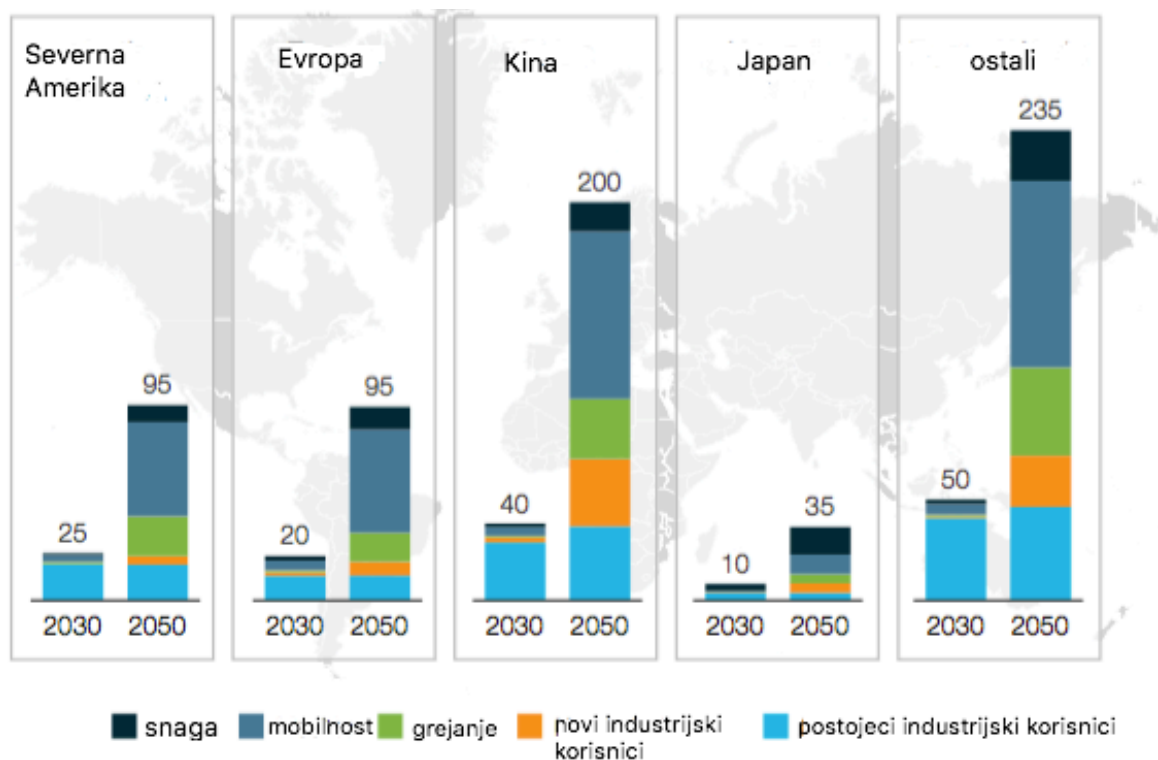
Istraživanja zasnovana na ovim principima, pokazala su da se globalna potreba za vodonikom povećava i da se za 2050. predviđa da će se kretati između 73Mt (najgora prognoza) i 568Mt (najbolja prognoza) [67].

Prema Hydrogen For Net Zero [69] studiji, potražnja za zelenim vodonikom za 2050. godinu, iznosila bi približno 660Mt, što bi činilo oko 22% ukupne globalne potražnje a emitovalo bi se 7 Gt manje ugljen-dioksida. Do 2050.godine, zeleni vodonik mogao bi da smanji zbirni učinak od 80 Gt ugljen-dioksida što je duplo veći iznos od sadašnje godišnje emisije.

Preoma izveštaju Evropske komisije [70], prognozira se da do 2030. godine treba da bude instalirano 40 GW elektrolizera koji će raditi na struju iz OIE. Time EU pretenduje da postane industrijski lider čistog vodonika. Na slici 2.10. prikazane su estimacije potrebe za zelenim vodonikom u različitim delovima sveta, odakle se vidi da spram broja stanovnika Evropa prednjači u poređenju sa ostalim državama i regionima.



Slika 2.9. Emisija ugljen-dioksida koja potiče od sagorevanja i industrijskih procesa, 1900-2021 (preuzeto i modificirano iz [68])



Slika 2.10. Prognoza potražnje za zelenim vodonikom od strane krajnjih korisnika za 2030. i 2050. godinu. (preuzeto i modificirano iz [69])

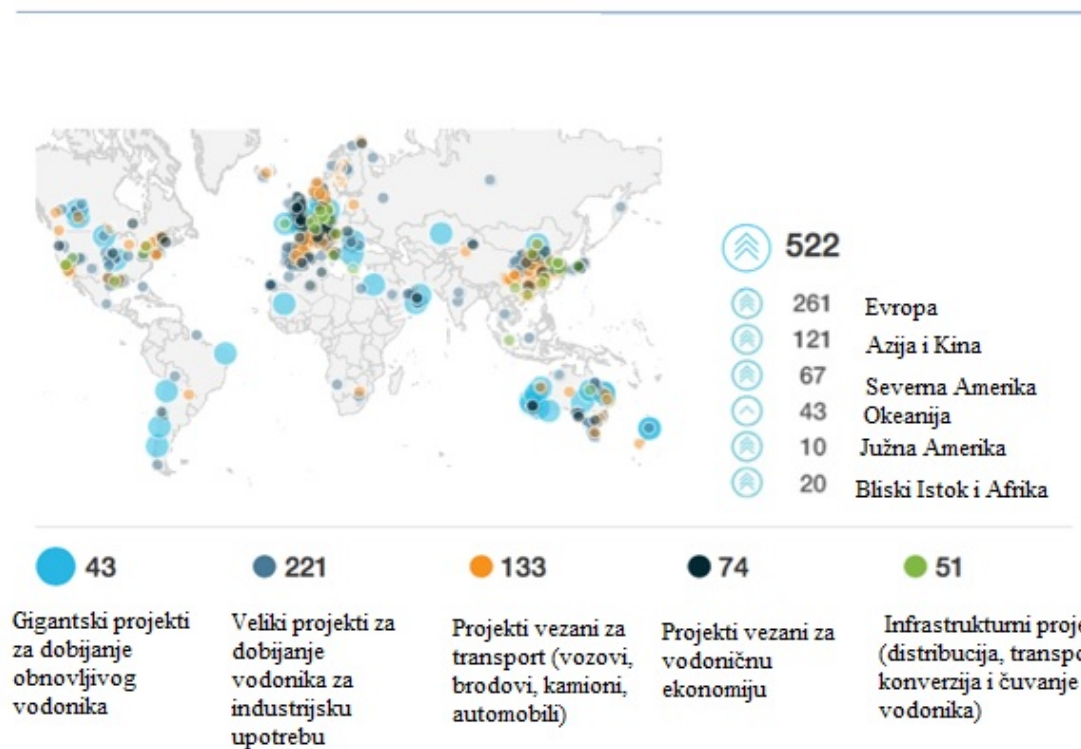
Krajem 2022. godine, u (probni) rad je pušten HySynergy pogon, elektrolizer kapaciteta 20 MW, koji trenutno predstavlja najveći elektrolizer u Evropi (slika 2.11.). Nosilac ovog projekta je Danska firma Everfuel koja planira da do polovine ove godine otpočne komercijalnu proizvodnju zelenog vodonika ovim postrojenjem [71].



Slika 2.11. Najveći elektrolizer na svetu (HySynergy, Everfuel, Danska)[72]

Još jedan od ključnih i veoma ambicioznih projekata vezanih za vodonik, u širem smislu, je European Hydrogen Backbone (EHB). EHB je inicijativa koju čini grupa od trideset i jednog operatera energetske infrastrukture, okupljenih oko zajedničke vizije, a to je klimatski neutralna Evropa. Ova inicijativa ima za cilj da ubrza evropski put dekarbonizacije definisanjem kritične uloge vodonične infrastrukture – zasnovane na postojećim i novim cevovodima – u omogućavanju razvoja konkurentnog, tečnog, panevropskog tržišta obnovljivog i niskougljeničnog vodonika. Inicijativa ima za cilj da podstakne tržišnu konkurenciju, sigurnost snabdevanja, sigurnost tražnje i prekograničnu saradnju između evropskih zemalja i njihovih suseda [73].

Na globalnom planu, za ulaganje u vodonične projekte do 2030. godine, procenjeno je da će se izdvojiti preko 160 milijardi USD, od čega je polovina ulaganja planirana za dobijanje vodonika elektrolizom u sprezi sa OIE [62]. Slika 2.12. prikazuje najavljene projekte širom sveta, vezane za vodonik i vodoničnu ekonomiju. Evropa je daleko iznad ostalih svetski regija, na putu da se što pre i potpunije prebaci na alternativni energetski poredak. Geopolitička situacija, vezana za sukob u Ukrajini, dodatno ubrzava potrebu Starog Kontinenta da promeni svoj energetski modus i da postane energetski nezavisna.



Slika 2.12. Najavljeni projekti širom sveta vezani za vodonik i vodoničnu ekonomiju.
(Preuzeto i modifikovano iz [62])

2.5. Vodonična ekonomija

Ekonomija zasnovana na vodoniku je imperativ društva i nauke kojom bi se odgovorilo na velike globalne potrebe za energijom koristeći vodonik kao gorivo u novom, čistom energetsom poretku.

Pojam “vodonična ekonomija” plasirao je svetski poznat naučnik Džon Bokris, sedamdesetih godina XX veka razvijajući koncept koji je uveo britanski naučnik Dž. B. S. Haldane [74], [75].

Za vodeće svetske zakonodavce, organizacije za zaštitu životne sredine, energetske analitičare i industrijske lidere, vodonik predstavlja gorivo budućnosti koje će napraviti revoluciju u načinu na koji dobijamo i koristimo energiju.

Na duge staze, oslanjanje na fosilne izvore energije koje je ustaljeno u svetskom energetsom poretku, čini se neodrživo, iz ekonomskih i ekoloških razloga. Cene fosilnih goriva koje su u poslednje vreme, izuzimajući Covid-19 krizu, u porastu, skrenule su pažnju na rizike koje njihovo korišćenje nosi. Postaje jasno da ponestaje jeftinih goriva i da se mora krenuti u pravcu novih, sigurnijih i čistijih energetske tehnologija. Vodonik se drži za najprobitačniji među tehnologijama koje bi ispunjavale ove kriterijume i koji može imati široku primenu u doglednoj budućnosti. Supstitucija fosilnih goriva vodonikom, na svim potrošačkim nivoima - industrija, saobraćaj, domaćinstva, doneće benefit u pogledu zaštite životne sredine i zato se permanentno radi na poboljšanju načina za njegovo dobijanje, transport i skladištenje, a paralelno i na obaranju cene kako bi zadovoljio i ekonomske aspekte i uklopio se u održivi razvoj.

Postoje dva osnovna motiva za pokretanje vodonične ekonomije. Prvi je želja da se redukuje emisija gasova staklene bašte i poboljša kvalitet života u urbanim sredinama, a drugi je da se obezbedi sigurnost napajanja energijom [76]. Tranzicija u vodoničnu ekonomiju može da obezbedi niskougljeni, održivi, reprezentativni sistemski pomak koji će pozitivno uticati na dugoročnu produktivnost i prilagodljivost u biznisu, na otvaranje novih ekonomskih mogućnosti i što je najbitnije, obezbediti socijalne benefite i benefite u oblasti zaštite životne sredine. Postoje mnoge barijere koje ometaju razvoj kako vodonične tako i cirkularne ekonomije, a najveće među njima su nedostatak interesa i svesti od strane konzumenata i kolebljiva poslovna kultura velikih korporacija [77].

Brižljive analize za koje se koristi SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) metoda, preporučuju se da bi pružile informacije prilikom izrade zakona koji bi olakšali tranziciju u vodoničnu ekonomiju.

Vodonična ekonomija podrazumeva dobijanje vodonika iz obnovljivih energetske izvora, kao energetske vektora koji će predstavljati medijum za skladištenje energije, njen transport i distribuciju. Ispravna implementacija vodonične ekonomije mora biti ispraćena razvijenom infrastrukturom za produkciju, skladištenje, distribuciju i njegovo korišćenje. Končno, vodonična ekonomija može imati glavnu ulogu u dostizanju the ciljeva Ujedinjenih nacija za održivi razvoj (eng. *United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs)*) [78].

Ukoliko se strateški razvija infrastruktura, vodonične tehnologije mogu da sačuvaju višak električne energije iz OIE i da se uključe u mrežu snabdevanja kroz korišćenje u gorivnim ćelijama u velikim postrojenjima i teškom saobraćaju.

Iz perspektive zakonodavaca, tranzicija ka vodoniku služi važnim ciljevima kao što su dekarbonizacija ekonomije, stvaranje novih poslova, ispunjavanje energetske potrebe koji se stalno povećavaju i očuvanju životne sredine. Nacionalne vodonične strategije imaju za cilj da identifikuju najprofitabilnije sektore, da investiraju u razvoj i inovacije i da nateraju zakonodavce da svojim postupcima ohrabre proizvodnju i upotrebu vodonika na svim nivoima [76].

Tranzicija na vodoničnu energiju predstavlja ultimativni korak koji vodi do promene i napuštanja puta fosilnih goriva. Svetski energetske sistem se vremenom menjao u pravcu korišćenja energenata koji su sve manji zagađivači - od uglja, preko nafte do neutralnog gasa. Naravno, potrebno je još tehnološkog razvoja, obrazovanja i smanjenja troškova koji će vodoničnu ekonomiju pretvoriti u realnost.

2.5.1. “Ecology, economy and environment”

Kroz istoriju, paralelno sa društvom razvijala se ekonomija, iz perspektive da je isključivo fokusirana da obezbedi materijalno blagostanje, do holističkog pristupa u kome postoji rastući broj uglova gledanja koji su među sobom povezani. U delima ekonomskih klasika glavni faktori proizvodnje su zemlja, rad i kapital. Razvojem ekonomske misli, do holističkog stupnja, prethodnim faktorima dodati su i organizacija i intelektualni kapital. U klasičnom ekonomskom diskursu, energija nije imala bitnu ulogu kao nosilac napretka, jer se na prirodu i prirodne resurse gledalo kao na neiscrpane izvore privrednih delatnosti. Takav stav dozvolio je ljudima da iscrpljuju resurse i da smatraju da priroda ima kapacitet da se sama obnovi kao i da neutrališe negativne efekte njihove delatnosti [79]. Dakle, ekonomska teorija bila je pobornik stava da je energija kojom raspolaže lokalna ekonomska zajednica, endogeno određena [80].

Vremenom, pokazalo se da je ovakav pristup neodrživ. Za promenu ovog stava odgovorna je prva energetska kriza 70-tih godina XX veka. Od tada je energija postala najvažniji faktor ekonomskog rasta, ona zatim ulazi i u savremenu ekonomsku teoriju, može se reći dobija centralno mesto koje i danas zauzima [79].

Sve je veći broj naučnih istraživanja iz oblasti ekonomskih nauka koji se odnosi se na ispitivanje uticaja energije, oblika energije i energetske resursa na ekonomiju, i to od lokalnog do globalnog nivoa. Kako slika postaje sve šira a problematika sve kompleksnija, u savremenu ekonomsku teoriju unosi se još jedan faktor, još jedna promenljiva - a to je ekologija. Tako prelazimo na 3E pristup životu. Od tog momenta stvari se sagledavaju još šire i dolazi se do zaključka da se privreda mora odrediti principima održivosti, da se njena zasnovanost na neobnovljivim izvorima energije mora barem smanjiti i tako se postulira novi stupanj, stupanj zelene ekonomije.

U naučnoj literaturi mogu se identifikovati mnogobrojni članci u kojima su odnosi između energije, ekonomije i životne sredine predstavljeni šifrom 3E (*ecology, economy and environment*). Početkom XXI veka UNDP (eng. United Nations Development Programme) je proklamovala/ponudila osam milenijumskih ciljeva - “Millennium Development Goals“, kojima

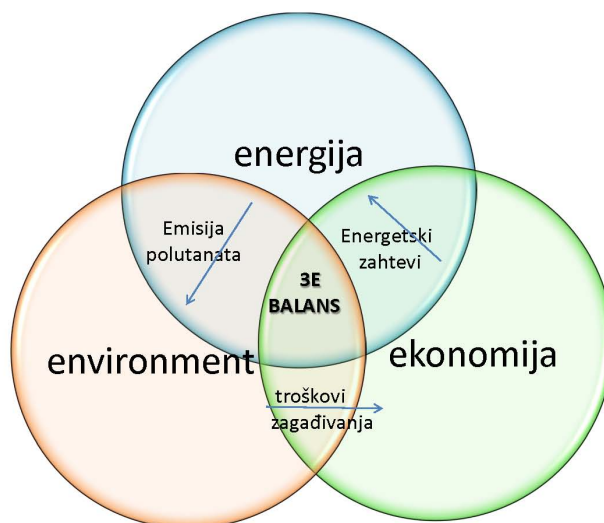
je pokazala važnost ovog tripheliksa u globalnom ekonomskom scenariju. Kako bi se osiguralo da korišćenje energije bude održivo treba zadovoljiti sledeće kriterijume: emisiju CO₂ i korišćenje vodnih resursa, iznad svega. Razvoj ovih kriterijuma proširiće značaj energije i zaštite životne sredine u sledećoj formi: dostupna i čista energija, održivi gradovi i zajednice i akcije vezane za klimatske promene. U ovom svetlu 3E principi su postali bliži nego ikad. Na slici 2.13. je predstavljen šematski prikaz 3E poretka.

U poslednje vreme, problemi vezani za 3E su proučavani i evaluirani na mnogo višem nivou nego ikad do sada. Akademska zajednica je uspela da poveže ova tri elementa bez obzira na njihovu divergentnost [81], [82].

Najbitnija stvar je da su 3E konačno “pomirene” i da je opšteprihvaćena činjenica da se priroda ne sme nemilosrdno izrabljivati i da potonjim generacijama treba da ostane barem onoliko prirodnih bogatstava i zdrave prirode, koliko su današnje generacije zatekle (nasledile od svojih predaka). Ekološki i energetske sektor sada imaju svoj najmanji zajednički sadržalac, svoje zajedničko jezgro, i aktivno učestvuju u zaštiti životne sredine (trećeg E) i borbi protiv klimatskih promena.

Nova “pravila” promovišu se na globalnom planu, ali važe i za svakog pojedinca i predstavljaju bon ton XXI veka. Štednja energije, reciklaža, odvajanje otpada, smanjeno zagađivanje, čuvanje prirode, borba protiv klimatskih promena.

Današnju privredu možemo posmatrati kao energetske sistem sa svojim tokovima i enegrijskim konverzijama koji imaju krajnji proizvod robu i usluge. Energija je ključni izvor ekonomskog rasta, industrijacije i urbanizacije [83].



Slika 2.13. Šematski prikaz 3E poretka

Ekonomski rast zahteva sve zeleniju industriju; višak, stabilnost i pristupačnost energije ga pojačava. Ipak, zarad ekonomskog rasta ne sme se žrtvovati životna sredina, njoj su potrebni

proces i aktivnosti koji su prilagođeni njenom održanju jer, u suprotnom, zagađena i devastirana životna sredina, sigurno, usporava ekonomiju.

2.5.2. Ekološki menadžment i održivi razvoj

2.5.2.1. Ekološki menadžment

Širenje koncepta zelenog vodonika zahteva veliko angažovanje, a najbolji put kojim ova napredna ideja treba da se trasira leži u ekološkom menadžmentu.

Ekološki menadžment je sistem upravljanja životnom sredinom. Upravljanje životnom sredinom podrazumeva sprovođenje strateških aktivnosti koje sadrže u sebi planiranje i kreiranje sistema zaštite, definisanje sredstava i nove pravce razvoja životne sredine. Ovaj vid menadžmenta predstavlja hibrid ekologije i menadžmenta koji je nastao iz potreba da se obezbedi opstanak čoveka na novi, širi/divergentniji način i da se definišu optimalni uslovi za zadovoljenje njegovih potreba a da se pri tom, na naruši prirodna ravnoteža. Može se reći da ekološki menadžment predstavlja mehanizam upravljanja kojim se donose odluke koje regulišu uticaj čoveka na životnu sredinu. On je deo svakog nivoa upravljanja od ličnog/pojedinačnog, preko porodice, kompanije, lokalnog, regionalnog i globalnog. Uz pomoć ekološkog menadžmenta, vrši se kontrola procesa donošenja odluka i uređuje antropogeni uticaj na životni prostor. Step en njegove primene obezbediće da sve komponente modernog društva funkcionišu u saglasnosti i da buduće generacije zateknu lepšu planetu [84].

U publikaciji prof. dr Slobodana Pokrajca [85] navedeni su principi na kojima je zasnovan ekološki menadžment, a to su: "zaštita biosfere, održivo korišćenje prirodnih resursa, smanjenje otpada, konzerviranje energije, proizvodnja ekološki i zdravstveno bezbednih proizvoda, obnova okoline, informisanje javnosti, društvena odgovornost menadžera, redovni nadzor i izveštavanje o radu preduzeća, smanjenje rizika u poslovanju ."

Ekomenadžment se može opisati kao antropocentrični način poslovnog ponašanja. Smatra se da je potpuno različit od ostalih oblasti menadžmenta i da se izdvaja svojom kompleksnošću. Predstavlja istinsku mogućnost prepoznavanja i postizanja ciljeva koji su krucijalni za opstanak ljudske vrste i koji doprinose njegovom kvalitetu. Ravnoteža u međusobnom odnosu principa efektivnosti i principa efikasnosti, pomena je daleko na stranu principa efektivnosti, što znači da ni jedna loša odluka (nehumana i neekološka) ne može biti kompenzovana efikasnošću koju bi proizvela.

Na globalnom nivou uvode se standardi za ekološki menadžment koji imaju ulogu u određivanju strateških i operativnih ekoloških ciljeva, identifikaciji i vrednovanju ekoloških efekata, uspostavljanju internih i eksternih provera (audit), uspostavljanju principa komuniciranja i obuka [85].

Standardi sistema ekološkog menadžmenta proistekli su iz Povelje za održivi razvoj (eng. *Business Charter for Sustainable Development*) koja je usvojena u okviru međunarodne trgovinske komore 1991. godine. Tom prilikom je istaknuto da je ekomenadžment centralni stub

održivog razvoja i da je njegovo prisustvo neophodno u funkcionisanju preduzeća, da se ona moraju permanentno unapređivati, da se posledice svakog procesa moraju evaluirati i usklađivati sa ekološkim standardima, da preduzeća imaju odgovornost i za svoje poslovne partnere, te da prema tim načelima vrše njihov izbor, da su otvoreni za saradnju na svim poljima vezanim za ekološke probleme i da utiču na unapređivanje ekološke svesti i informisanje zainteresovanih subjekata [85].

2.5.2.2. Koncept održivog razvoja

Kako je globalna ekološka kriza zahvatila celokupno čovečanstvo, teme vezane za njeno rešavanje su u žiži svetske javnosti. Do njene pojave, sada nam je kristalno jasno, doveo je čovek svojim dejstvom, zloupotrebljavajući prirodu, posmatrajući je kroz prizmu ostvarivanja dobiti, gomilanja kapitala i profita. Koncept takvog postupanja može se nazvati neodrživi razvoj, prava linija koja se ne uklapa u prirodne zakone.

U prirodi sve ima svoj tok. Kruženje materije osnovni je prirodni zakon, kome i čovek i njegovo dejstvo podležu. Samo ljudi nisu na vreme to prihvatili, ili su poneseni napretkom i bogaćenjem na to „zaboravili“. Kako bilo, cena takvog ponašanja, ispostavlja se, veoma je visoka i pitanje je da li će šteta, koja je učinjena, moći da se sanira.

Problem ekološke krize veoma je složen, njime se ne mogu baviti samo biolozi, u njegovo rešavanje uključuju se ekonomisti, sociolozi, psiholozi, inženjeri, lekari. Za njegovo rešavanje neophodno je uticati na svest i savest svakog pojedinca, učiti ljude, obrazovati ih, kako da postupaju da bi mogli da sačuvamo planetu za buduće naraštaje. Treba da prihvatimo da sa priridom živimo u harmoniji, jer mi sami od nje zavisimo a ne obrnuto.

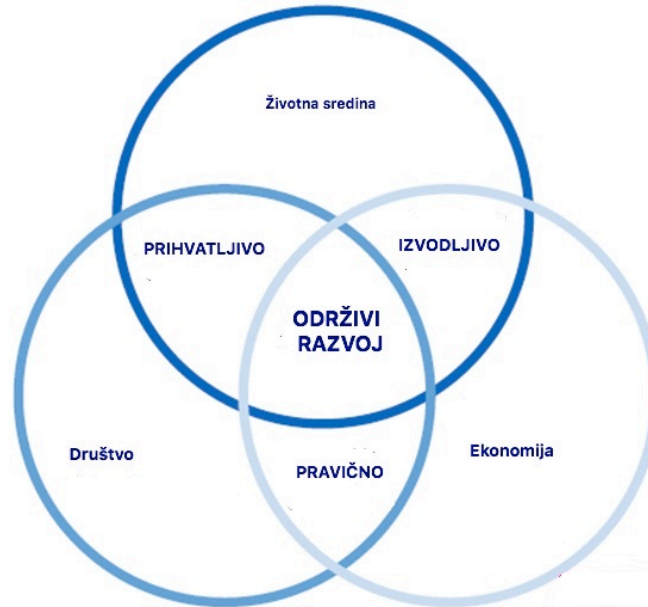
Održivi razvoj mora postati načelo, jer samo takav vid organizacije društva predstavlja siguran put za spas planete i civilizacije.

Čuvena Bruntland komisija, koja je utemeljila Koncept održivog razvoja, u izveštaju za UN, iz 1987. godine kaže: “U suštini, održivi razvoj je proces promena u kome eksploatacija resursa, usmerenost investicija, orijentacija tehnološkog razvoja i institucionalne promene bivaju u harmoniji i ubrzavaju trenutni budući potencijal da zadovolje ljudske potrebe i težnje” [86].

Da bi se omogućila zaštita životne sredine neophodno je obezbediti finansijske izvore. Izuzetnu ulogu u tom procesu imaju ekonomisti koji primenom koncepta održivog razvoja mogu da kanališu ulaganja u projekte koji imaju strateški značaj za životnu sredinu. Na slici 2.11. su šematski prikazana tri sastavna dela održivog razvoja. Osim toga ekonomisti zarad održivog razvoja, i njegove implementacije u realan život pribegavaju sledećim mehanizmima prikupljanja sredstava: uvođenjem naknada za korišćenje prirodnih vrednosti, planiranjem budžetskih sredstva i formiranjem fondova za zaštitu životne sredine i upotrebom podsticajnih mera (poreske i carinske olakšice) u adekvatnim slučajevima [87].

Zeleni vodonik nosi velika očekivanja za postizanje najznačajnijeg cilja održivog razvoja, a to je smanjenje emisije CO₂ do 2050. godine [67]. Njegovim korišćenjem može se postići drastično umanjeње emisije štetnih gasova i time doprineti zaštiti životne sredine i prirode

uopšte. On je nosilac novog energetskeg poretka i napretka, supstitucija za fosilna goriva a njegova održiva proizvodnja je globalni imperativ.



Slika 2.14. Šematski prikaz održivog razvoja i njegova tri sastvna dela

2.5.3. Misija i vizija

Još je Žil Vern anticipirao ovu temu davne 1874.godine. Vodoni je iz mašte umetničkog dela, preko fundamentalnih nauka fizike, hemije, biologije dospao do tehnoloških procesa, a zatim krenuo u polja ekonomije, biznisa i menadžmenta. Tolikim brojem glavnih uloga, retko koji glumac može da se pohvali. Veliki potencijal je prepoznat, nije lako pronaći najbolji i najpametniji scenario da se “glumac” stavi u pravi kontekst, i zato se moraju sagledati svi uglovi i izbalansirati sve *pro et contra*.

Mnoge svetske kompanije koje se bave inovacijama, konsaltingom i podrškom transformaciji preduzeća ističu vodonik u prvi plan, pogotovo zeleni vodonik koji je ekološki podoban. Jedna od takvih, koja je lider već 60 godina, istraživačka kompanija Frost & Sullivan je dala sledeće preporuke u cilju pospešenja rasta tržišta zelenog vodonika [88]:

- Zemlje treba da izrade strategije vezane za proizvodnju vodonika i ulažu u pilot projekte održivih tehnologija i energetskeg skladišta. Potrebna je snažna saradnja energetskeg, ekonomskog i ekološkog sektora kako bi se ova tehnologija podigla na viši nivo i implementirala u praksu.

- Evropske zemlje i SAD treba da dodaju vodonik smešama prirodnog gasa kako bi se smanjila emisija gasova koji imaju efekat staklene bašte, povećala efikasnost sistema i pospešila dekarbonizacija električne i toplotne energije, industrije i transportnog sektora.
- Kompanije koje se bave razvojem i proizvodnjom gorivnih ćelija treba da razviju male, modularne sisteme napajanja gorivnim ćelijama, koji mogu da se prilagode potrebama udaljenih zajednica ili kritičnim infrastrukturnim objektima.
- Kompanije koje se bave razvojem i proizvodnjom gorivnih ćelija treba da se fokusiraju na smanjenje troškova i podizanje efikasnosti, kako bi nadmašile svoje glavne konkurente - dobavljače litijum-jonskog sistema za skladištenje energije, i kako bi stekle tržišnu prednost.

Prema industrijskom analitičaru S. N. Manoharu, ukupna dekarbonizacija određenih sektora poput transporta i električne energije ne može da se postigne samo elektrifikacijom. Ovaj izazov se može rešiti zelenim vodonikom proizvedenim elektrolizom iz obnovljivih izvora energije, posebno vetra i Sunca. Trenutno zeleni vodonik čini manje od 1% od ukupno proizvedenog vodonika u svetu. Očekuje se da će se globalna potražnja za zelenim vodonikom i njegovim novim aplikacijama eksponencijalno povećati u narednih 20 godina, stvarajući potrebu za značajnom infrastrukturom koja će se baviti proizvodnjom i isporukom [89].

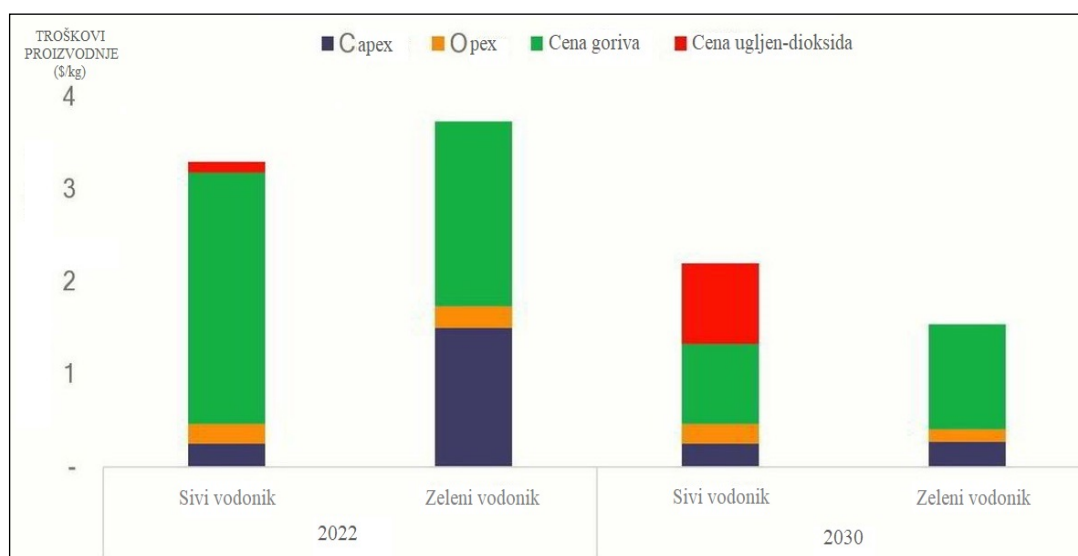
Tehnološke institucije u raznim zemljama (Nemačka, Velika Britanija, SAD i Australija) već su investirale u pilot projekte koji se odnose na proizvodnju, skladištenje, distribuciju i upotrebu vodonika u različitim poslovnim sferama. Da bi ekonomija zelenog vodonika postala stvarnost, potrebna su tehnološka i ekonomska dostignuća kako bi se smanjili troškovi povezani sa proizvodnjom, povećala promocija, i pospešili istraživanje i razvoj [88].

U današnje vreme treba insistirati na tome da se u što većem delu sveta implementira ekološka logika, kao osnova održivog razvoja, koja nije svuda prepoznata kao suštinska i ozbiljna, i koja zbog takvog stava ne može da vodi daljem globalnom napretku. Drugim rečima, održivi razvoj treba prihvatiti kao novu poslovnu paradigmu, kao novi razvojni okvir kojim čovečanstvo ide u sigurnu budućnost.

2.5.4. Teorijske pretpostavke o vodoničnoj ekonomiji

Vodonik (H_2) je čisto gorivo i u mnogome će promeniti globalne energetske sektore. Predviđa se da će H_2 igrati ključnu ulogu u pomeranju globalnog energetskog sistema (GES) ka održivom energetskom sistemu (SES) do 2050. godine [90]. Savet za vodonik [62] dokumentovao je da je upotreba vodonične energije drastično porasla u 2020. godini i ima potencijal da otključa još 8% globalne potražnje za energijom (GED) uz proizvodnu cenu od 2,50 USD/kg. Očekuje se da će do 2030. godine proizvodni trošak H_2 biti niži, tj. da će iznositi 1,80 USD/kg i činiti 15% globalne potražnje za energijom.

Do 2018. godine, skoro 99% vodonika se proizvodilo upotrebom fosilnih izvora energije jer je to bila najpovoljnija opcija. Od tada, pitanje isplativosti proizvodnje zelenog vodonika menja se u pozitivnom smeru, jer cene OIE stalno padaju. Uz to, cena alkalnih elektrolizera proizvedenih u Severnoj Americi i Evropi pala je za 40% u periodu od 2014. do 2019. godine, a u Kini je taj procenat još veći. Ako se proizvodnja elektrolizera bude povećavala, troškovi će nastaviti da padaju, što znači da bi obnovljivi vodonik mogao da se proizvodi za 0,7 do 1,6 USD/kg u većini delova sveta pre 2050 [64]. Ako se ove prognoze obistine, zeleni vodonik biće konkurentan sa cenama prirodnog gasa u Brazilu, Kini, Indiji, Nemačkoj i Skandinaviji i jeftiniji od vodonika koji se proizvodi iz prirodnog gasa ili uglja sa hvatanjem i skladištenjem ugljenika (eng. *Carbon Capture*), slika 2.15.



Slika 2.15. Troškovi proizvodnje vodonika (Preuzeto i modifikovano iz [91])

Prema Eurostat [92], korišćenje OIE je u konstantnom porastu i ako se uporedi sa 2005. godinom, kada je učešće obnovljivih izvora iznosilo svega 10,2%, 2020. godine taj procenat je dostigao nivo od 22,1%, što je više od 50% rasta tokom jedne dekade. Smanjenje investicionih troškova, usavršene tehnologije, pojačana logistika i podrška dovele su do ovog rezultata. Na osnovu ovog trenda može se predvideti da će do 2030. godine cilj od 32%, biti dostignut [92].

Prognozira se da će do 2050. godine, H₂ ispuniti čak 18% globalne potražnje za energijom (Global Energy Demand, GED). Veoma je jasno da će H₂ definitivno igrati vitalnu ulogu u svim energetske sektorima, zbog svoje gustine energije, niske cene proizvodnje i niskog sadržaja ugljenika koji se emituje njegovom upotrebom. U tabeli 2.2. sumirane su sve boje vodonika, tehnologije proizvodnje, sirovine za proizvodnju i ugljenični otisak koji ostavljaju na životnu sredinu.

Tabela 2.2. Vodonična duga - tabelarni prikaz terminologije, tehnologije i ugljeničnog otiska (preuzeto i modificirano iz [93])

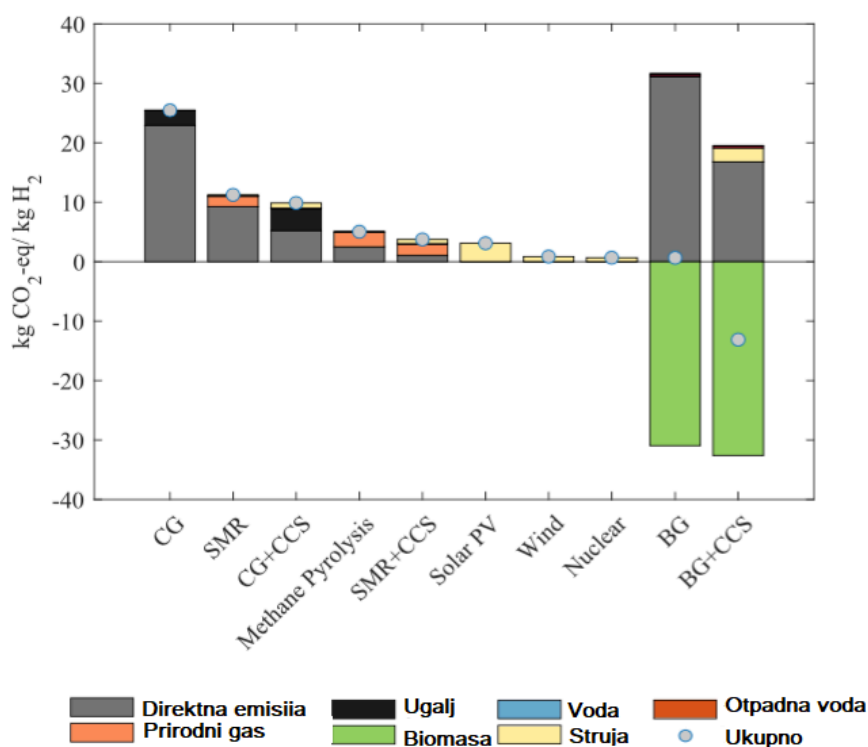
	Terminologija	Tehnologija	Sirovina/ izvor struje	Ugljenični otisak
Dobijanje električnom energijom	zeleni	elektroliza	OIE	minimalan
	ljubičasti		nuklearna	
	žuti		mrežni miks	srednji
Dobijanje iz fosilnih goriva	plavi	reforming+CC	prirodni gas/ugalj	nizak
	tirkizni	piroliza	prirodni gas	srednji
	sivi	reforming		
	smeđi	gasifikacija	lignit	visok
	crni		crni ugalj	

Opsežan pregled literature obavljen je na osnovu metodologije koju su predložili [94] za prikupljanje i analizu objavljenih skupova podataka iz *web of science*. Glavni cilj je pristup člancima i odabir onih članaka koji daju predstavu o tehno-ekonomskoj analizi različitih procesa proizvodnje H₂.

U radovima su analizirane zasluge alternativnih načina dobijanja vodonika uzimajući u obzir direktne troškove proizvodnje i emisije CO₂. I. Dincer and C. Acar [95], su upoređivali 19 različitih načina dobijanja vodonika uključujući i obnovljive i neobnovljive izvore energije, sagledavajući uticaj na životnu sredinu, analizirajući troškove i naravno, energetska efikasnost. Uspeli su da kvantifikuju društvenu cenu ugljenika i napravili procenu ekonomske posledice emisije CO₂. Njihova studija dovela ih je do zaključka da je hibrid nuklearne i termohemijske tehnologije onaj kandidat koji najviše obećava.

B. C. R. Ewan i R. W. K. Allen [96], u svom radu, upoređivali su 14 procesa kojim se vodonik dobija prateći kod svakog od njih kolika je emisija CO₂, gustina snage, korišćenje zemljišta, troškovi dobijanja. Prema njihovoj analizi tehnologije koje su koristile primarne izvore energije pokazale su se najefikasnijima, ali ovu analizu treba uzeti sa rezervom obzirom da datira iz 2005. godine od kada su se parametri vredovanja tehnologija drastično promenili.

Skorije analize koje su radili O. Machhammer, A. Bode, i W. Hormuth [97] u koje su uključili šest tehnologija za dobijanje vodonika, sagledavajući ih kroz prizmu koštanja i ugljeničnog otiska, pokazale su da je piroliza metana najefikasnija, najjeftinija i ekološki prihvatljiva (videti sliku 2.16).



Slika 2.16. Potencijal zagađivanja (tj. globalnog zagrevanja) od strane različitih tehnologija dobijanja vodonika (*preuzeto i modifikovano iz [94]*)

Gasifikacija biomase uz izdvajanje ugljenika (*Carbon Capture*) ima najmanji uticaj na globalno zagrevanje a za njom sledi čista gasifikacija biomase (bez CC), podaci koji slede potvrđuju ovaj zaključak: -13,11kgCO₂-eq/kg H₂; 0,65 kg CO₂-eq/kg H₂, redom [98].

Iza procesa gasifikacije biomase nalazi se elektrolizau sprezi sa nuklearnim izvorima, vetrom, solarnim izvorima 0,67 kg CO₂-eq/kg H₂, 0,86 kg CO₂-eq/kg H₂, 3,1 kg CO₂-eq/kg H₂, redom. U svim navedenim slučajevima, izvor struje za napajanje elektrolizera, određuje najveći udeo u globalnom zagrevanju [98].

Nakon ovih slede, SMR (*Steam Methan Reforming*) sa CC (*Carbon Capture*), piroliza metana, gasifikacija uglja sa CC, a zatim i nativna gasifikacija uglja i SMR, kao najveći emiteri tj. zagađivači. Gasifikacija uglja i SMR imaju najveći uticaj na globalno zagrevanje (25,24 kg i 11,24 kg CO₂-eq/kg H₂, redom) [99].

Da bi smo došli do TCH- *Total Cost of Hydrogen production*, što je ukupna cena proizvodnje vodonika, neophodno je izvršiti monetizaciju uticaja na životnu sredinu u kombinaciji sa prosečnom nivelisanom cenom vodonika, *LCOH- Levelized Cost Of Hydrogen*, za svaki proizvodni proces [99].

Najniža cena dobijanja vodonika je iz procesa koji kao polaznu sirovinu koristi prirodni gas, a takav vodonik etiketiran je kao plavi. Naravno, uz ovaj proces, ide velika emisija CO₂, u poređenju sa elektrolizom [98].

Cena zelenog vodonika je ključni faktor koji će odrediti njegovu rentabilnost i uspeh. Ukoliko troškovi ne budu u saglasnosti sa zadatim ciljevima, razvoj i širenje zelenog vodonika, u

smislu široke upotrebe, biće izvanredno izazovni. Prema podacima European Commission's hydrogen strategy [100], cena zelenog vodonika je trenutno između 2,5-5,5 €/kg, u zavisnosti od polazne sirovine i tehnologije dobijanja.

IEA takođe potvrđuje da se cena zelenog vodonika kreće između 3,5 - 5€/kg, što odgovara ceni kilovat časa, kWh, od 0,10 - 0,15€. Cena prirodnog gasa za industriju i ostale grane koje nisu domaćinstava u 2018. godini iznosila je 0.03€ za kWh u EU, što znači da je cena prirodnog gasa četiri puta manja od cene zelenog vodonika [92].

Kada se uporede troškovi dobijanja vodonika na bazi fosilnih goriva – sivi vodonik i zeleni vodonik, situacija je sledeća: cena sivog vodonika iznosi oko 1,5 €/kg, dok cena zelenog može biti i do 3,5 puta veća, u ovom trenutku.

Istraživačko-konsultantska kompanija Wood Mackenzie [101] je procenila da troškovi proizvodnje zelenog vodonika mogu pasti za 50% do 2030. godine. Veliki udeo u troškovima proizvodnje vodonika, pripadao je procesu elektrolize, koji je u poslednjih deset godina smanjen za 60% a u narednoj dekadi očekuje se smanjenje od još 50%.

Prema European hydrogen strategy, predviđa se da cena zelenog vodonika padne na 1,1 – 2,4 €/kg do 2030. što je u saglasnosti da padom od 56% za troškove dobijanja istog prema [100]. Publikacije istraživačkih agencija BNEF i IRENA pokazuju neke trendove na svetskom planu. Kina trenutno ima superiornu poziciju. Capex troškovi alkalnog elektrolizera iznose oko 0,18 €/W, dok u Zapadnom delu sveta ti troškovi iznose 1,1 €/W za 2019 [102]. Prema procenama pomenutih agencija, i same IEA pride, do kraja dekade troškovi Capex za AE u Kini iznosiće 0,10 €/W, dok će u Evropi iznositi 0,45 €/W [103].

Profitabilnost zelenog vodonika je uslovljena cenama drugih energenata/izvora energije, ali i cenom ugljen-dioksida/zagađivača, koja sve više raste što ide u korist vodoničnoj ekonomiji. Najkritičnija tačka u dobijanju zelenog vodonika je cena struje koja se u tom procesu koristi. Optimistične prognoze su stava da zeleni vodonik može postati konkurentan najranije 2030. godine. Ako se uporedi sa cenom sivog vodonika, konkurentnost u ovoj sferi će doći dosta kasnije. Međutim, pošto se ne gleda iz jednog ugla- ekonomskog, već, prvenstveno iz drugog- ekološkog i trećeg- energetskog, vodonik je na putu dominacije nad svim ostalim energentima, posebno što uz dekarbonizaciju, može da obezbedi energetsku nezavisnost, pa samim tim ima i geopolitičku vrednost, kao dodatni kriterijum za vrednovanje.



Slika 2.17. Ciklus zelenog vodonika (preuzeto i modificirano iz [104])

Ciklus zelenog vodonika (slika 2.17.) za dobijanje struje je osmišljen tako da se obnovljiva energija pretvara u vodonik procesom elektrolize a zatim se on ponovo pretvara u električnu energiju. Glavna prednost ovog procesa je ta što se višak energije iz obnovljivih izvora može iskoristiti u procesu elektrolize, a dobijeni vodonik se može upotrebiti i kada postoji velika potražnja za električnom energijom. Na taj način, moguće je balansirati energetski sistem a višak energije može se sačuvati i iskoristiti po potrebi.

Ako uporedimo sa baterijama, može se reći da baterije uspešno konvertuju hemijsku energiju u električnu i funkcionišu kao kratkotrajan depo energije, dok je kapacitet vodonika neuporedivo veći i čini ga jedinstvenim i nenadmašnim skladištem, što je još jedna prednost u ciklusu njegovog korišćenja. Zeleni vodonik biće značajno uspešniji od baterija u kopnenom saobraćaju, naročito u sektoru teških vozila. Ova prognoza podržana je od strane 2020 Global Gas Report-a, koji predviđa da će ova vozila do 2031. godine postati znatno isplativija i u odnosu na dizelaše [102].

Jedini energent, koji je suštinska konkurencija vodoniku, u procesu dobijanja električne energije je prirodni gas. Za proizvođače struje, važno je da prepoznaju moment kada zeleni vodonik postaje ravan prirodnom gasu. Dakle, glavni konkurent zelenom vodoniku je prirodni gas, i prognoze su da će njegova cena uvek biti povoljnija. Međutim, celokupna ekonomija i energetika u sprezi sa ekologijom, nisu jednostavne i nisu pravolinijski parametri. Prema Eurostat, zavisnost od prirodnog gasa u zemljama EU iznosila je 89,5% za 2019.godinu, od čega se 40% uvezlo iz Rusije [92].

U ovom geopolitičkom trenutku, bolja energetska samodovoljnost je osobina koja bi popravila regionalnu bezbednost i ekonomiju. Početkom 2023. godine, ova osobina je od neprocenjivog značaja. Ako bi se zeleni vodonik proizvodio lokalno, u Evropi, i zamenio potrebu za prirodnim gasom, zavisnost Evrope bi se značajno smanjila.

3. Ciljevi istraživanja

Cilj ove doktorske disertacije je da doprinese popularizaciji vodonika kao goriva budućnosti i naglasi njegove prednosti, da približi akademskoj javnosti značaj vodonične ekonomije, da sublimira ekologiju, energetiku i ekonomiju i da istakne da je njihov cilj zajednički i da kao takav može pomoći očuvanju planete i napretku civilizacije.

Da bi se poboljšala energetska efikasnost u procesu dobijanja vodonika, potrebno je inovirati i unapređivati proces njegovog dobijanja. Vodeći motiv ovog istraživanja je pronalaženje metoda poboljšanja efikasnosti procesa alkalne elektrolize radi dobijanja vodonika visoke čistoće, čime bi se shodno tome postigla veća energetska efikasnost.

U istraživanju je ispitivano kako se menja (unapređuje) efikasnost elektrolitičkog dobijanja vodonika *in situ* dodavanjem jonskih aktivatora na bazi hroma i kobalta direktno u standardni alkalni elektrolit tokom procesa elektrolize.

In situ aktivacija je proces koji je poznat još od osamdesetih godina XX veka [105]. Međutim, njegovo intenzivno proučavanje počelo je u skorije vreme nakon što je publikovan naučni rad u kome je dokazana uštede energije u procesu *in situ* aktivacije sa različitim kombinacijama jonskih aktivatora na bazi Co i Mo [106]. Prema podacima iz literature za jonsku aktivaciju najčešće su se koristili dvokomponentni sistemi sa molibdatima i volframatima kombinovani sa tris-etilendiaminskim kompleksima nikla i kobalta [107],[108]. Najvažniji cilj ove doktorske disertacije bio je i ispitivanje kombinacija jonskih aktivatora na bazi kobalta i hroma.

Zarad primene u industriji najviše su ispitivane legure na bazi kobalta i hroma koje se dobijaju procesom elektrohemijskog kataloženja u citratnom elektrohemijskom kupatilu. Da bi se dobile legura kobalta i hroma željenih karakteristika moraju se menjati parametri procesa i sastav kupatila [109],[110], što je detaljno opisano u velikom broju radova [111],[112].

Raniji radovi [113],[114],[108], ukazivali su na mogućnost povećanja efikasnosti produkcije vodonika putem dodavanja adekvatno izabраниh jonskih aktivatora. Radna hipoteza osmišljena je tako da se na osnovu nje dokaže da postoji bolja aktivnost ispitivanih katalitičkih materijala za reakciju izdvajanja vodonika (HER – *hydrogen evolution reaction*) u odnosu na komercijalno dostupne i tako elektrolizu, kao ekološki najpodobniji proces za dobijanje vodonika, učini ekonomski opravdanom.

U nastavku disertacije opisan je naš eksperimentalni dizajn i uslovi pri kojima je praćena potrošnja energije i efikasnost elektrolitičkog procesa u elektrohemijskim ćelijama posebno kreiranim za potrebe eksperimenata. Dobijeni rezultati su zatim predstavljeni, analizirani i interpretirani. Teorijska znanja i zakoni elektrohemije, takođe su obuhvaćeni u daljem izlaganju, radi lakšeg razumevanja ukupnog procesa. Na kraju je istaknut značaj postignutog pozitivnog efekta na smanjenje potrošnje energije za proces dobijanja vodonika. Da bi se uticaj jonskih aktivatora mogao sistematski i analitično proučavati, osmišljene su i izvedene grupe eksperimenata, pomoću kojih se pratila potrošnja energije za elektrolitičko dobijanje vodonika i ispitivala kinetika elektrodnih procesa primenom fundamentalnih elektrohemijskih tehnika. kao što su Tafelova analiza i elektrohemijska impedansna spektroskopija (EIS).

U poslednjim poglavljima dat je pregled ekonomskih faktora i analiza mogućih scenarija vezanih za tranziciju na novi energetska poredak.

3.1. Cilj studije

Cilj ove studije su da se dokaže pozitivan efekat *in situ* dodavanja *j.a.* na energetska efikasnost reakcije izdvajanja vodonika, i to aktivnih supstanci na bazi kobalta i hroma.

U toku eksperimenata praćene su promene potencijala katode u odnosu na anodu ili referentnu elektrodu (u zavisnosti od toga da li je korišćena dvoelektrodna ili troelektrodna ćelija), kao i promena temperature, gustine struje i sastav elektrolita.

Elektrohemijska karakterizacija katoda u elektrolitićkom procesu vršena je primenom voltometrije sa sporom linearnom promenom potencijala polarizacije. Ova metoda je omogućila proučavanje mehanizma HERreakcije na katodi u osnovnom elektrolitu i u prisustvu odabranih jonskih aktivatora, odnosno proučavanje njihovih elektrokatalitićkih efekata.

Za potrebe ovog rada, kao katoda korišćena je niklena elektroda, a kao jonski aktivator upotrebljene su male kolićine kompleksa kobalta i soli hroma, dodatih direktno u vodeni rastvor kalijum hidroksida (KOH) kao osnovnog elektrolita. Reakcija elektrolitićke disocijacije vode se odigravala u uslovima rada koji se primenjuju u industrijskim elektrolizerima.

Poboljšanje efikasnosti elektrolitićkog procesa dobijanja vodonika može se postići dodavanjem *d*-metala, u vidu kompleksa, u radni elektrolit. Uloga metala se ogleda u smanjenju energije ukupnog procesa dobijanja vodonika putem smanjivanja nadnapona reakcije nakon deponovanja metalnih jona na površini katode [115]. Dakle, jonski aktivatori su kompleksi metala koji u rastvoru disosuju na jone. Kompleksni jon ispoljavaju katalitićke efekte i prilikom procesa elektrolize u prisustvu ovih kompleksa dolazi do formiranja finog, depozita na površini katode, koji praktićno postaje radna površina. Ovaj nagrađeni sloj ćini metal iz katjonskog dela kompleksa koji se deponuje na elektrodnu površinu [115].

Još jedan mehanizam kojim se objašnjava katalitićka aktivnost određenih kompleksa prelaznih metala je njihova uloga “mosta” za prenos protona iz elektrolita do površine metala.

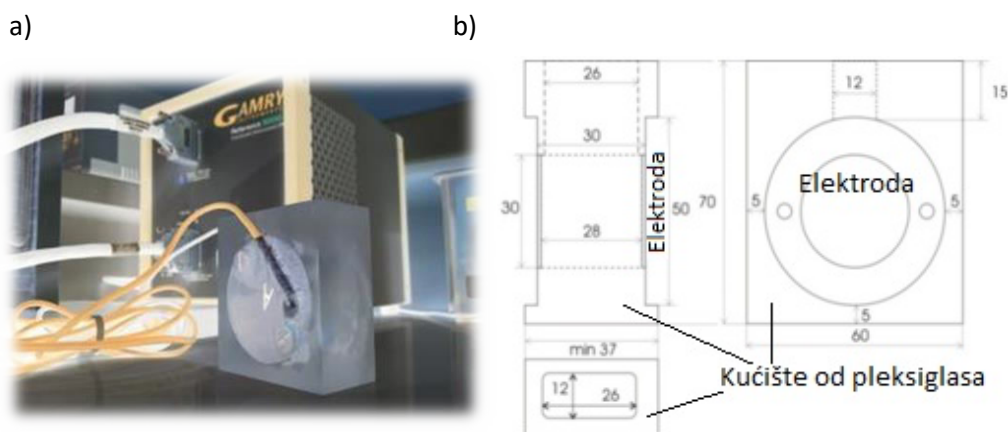
Kompleksi kobalta u kombinaciji sa natrijum-hromatom, takođe dovode do katalitićkog efekta kod procesa elektrolitićkog izdvajanja vodonika. Ovako zajednićko delovanje kombinacije metala Co-Cr, kao jonskog aktivatora, se još naziva sinergetskim dejstvom *d*-metala.

U nastavku sledi detaljan opis eksperimenta kao i dobijeni rezultati i diskusija. Potom je dat pregled ekonomskih faktora i analiza mogućih scenarija vezanih za tranziciju na novi energetska poredak.

4. Eksperimentalni dizajn

Svi eksperimenti su izvedeni na aparaturi koja je dizajnirana i konstruisana u Laboratoriji za fizičku hemiju Instituta "Vinča". Korišćena su dva tipa elektrolitičkih ćelija- prvi tip (tip I) za merenje ukupne potrošnje energije prilikomelektrolitičkog dobijanja vodonika, a drugi tip (tip II) ćelije korišćen je za elektrohemijska ispitivanja.

Prvi tip elektrolitičke ćelije je izrađen od pleksiglasa sa tačno definisanom geometrijom i elektrodama u obliku diska (slika 4.1.). Pre svakog merenja elektrode su prolazile specijalnu pripremu koja obuhvata: poliranje do ogledalskog sjaja, mehaničko čišćenje, tretman hlorovodoničnom kiselinom HCl (1:5 v/v), pranje u apsolutnom etanolu i ispiranje destilovanom vodom.



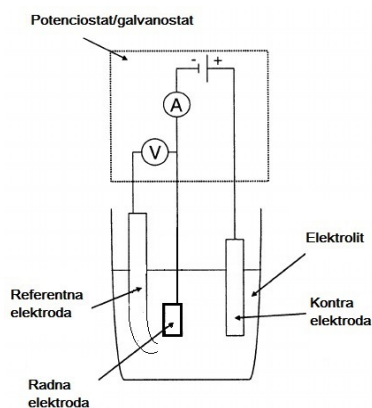
Slika 4.1. a) Elektrolitička ćelija za merenje potrošnje energije b) šematski prikaz iste ćelije (tip I) (preuzeto i modifikovano od [45] [48])

Drugi tip ćelije (tip II), predstavlja troelektrodnu ćeliju napravljenu od vatrostalnog stakla. Referentna elektroda, u ovom sistemu je Hg/HgO, pomoćna elektroda je Pt mrežica znatno veće površine u odnosu na ispitivane radne elektrode, slika 4.2. Za pravljenje radnih elektroda korišćen je nikl čistoće 99,95%, koji se najviše koristi u industriji. Radna površina elektrode je pre upotrebe dobro očišćena, prvo mehanički, a onda tretirana hemijski, sa HCl. Mehanički tretman prvo počinje poliranjem "purol" pastom, zatim polir-papirom 600 i 2000, i ispiranjem destilovanom vodom i alkoholom.

a)



b)



Slika 4.2. a) Fotografija troelektrodne ćelije; b) njen šematski prikaz (tip II)
(preuzeto i modificirano od [45] [48])

Korišćene su različite koncentracije *tris*-(etilendiamin)-kobalt(III) hlorida ($[Co(en)_3]Cl_3$) i natrijum hromata (Na_2CrO_4). Kao osnovni elektrolit u svim eksperimentima korišćen je 6M kalijum hidroksid (**KOH**), uvek sveže napravljen rastvaranjem čistog KOH u dejonizovanoj vodi. Sve hemikalije su analitičkog stepena čistoće proizvođača Merck.

Elektrolitičke ćelije su termostatisane variranjem temperature $\pm 0,1^\circ C$ primenom ultratermostata (Thermo Scientific Haake).

Sva elektrohemijska merenja (kvazi-potenciostatska i galvanostatska) i merenja potrošnje energije izvršena su instrumentom *Gamry 750 Potentiostat/galvanostat/ZRA*.

4.1. Potrošnja energije

Da bi se odredila specifična potrošnja energije za dobijanje vodonika elektrolizom, pri datim uslovima (temperatura, gustina struje), neophodno je meriti napon na elektrodama, struju, kao i vreme potrebno da izdvojeni vodonik ispuni merni sud, istiskujući iz njega vodu. Poznavajući te tri veličine moguće je izračunati utrošenu energiju (jednačina 8) po datoj

zapremeni, tj masi. Eksperimenti su rađeni tako da se pomoću potencioštata zada određena struja, za koju se onda mere napon i vreme izdvajanja gasa.

$$Q = U \cdot I \cdot t \quad (8)$$

Q predstavlja utrošenu energiju [J mol^{-1}], U ukupan napon elektrolize [V], I ukupnu struju [A], a t vreme u sekundama za koje se razvije 1 mol vodonika.

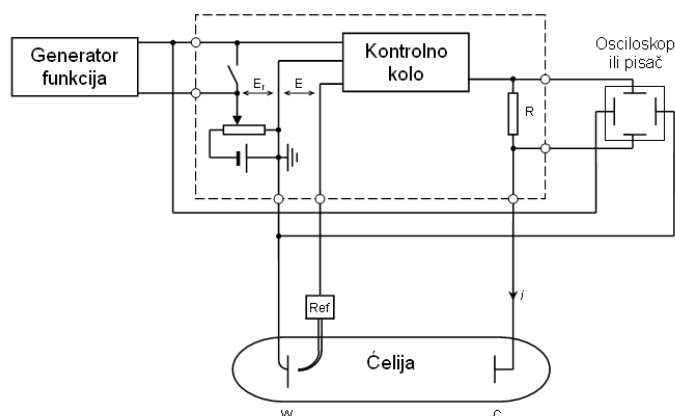
Prva grupa eksperimenata, vezana za ispitivanje potrošnje energije, podrazumevala je ispitivanje energijske potrošnje u elektrolitičkoj ćeliji sa standardnim industrijskim rastvorom elektrolita (6M KOH), dok je druga grupa eksperimenata pratila potrošnju energije u istoj ćeliji u kojoj su standardnom rastvoru elektrolita dodavani jonski aktivatori na bazi hroma (Cr) i kobalta (Co) u različitim koncentracionim odnosima. Koncentracioni odnosi korišćeni u ovim eksperimentima prikazani su u tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Koncentracije jonskog aktivatora kompleksa kobalta ($[\text{Co}(\text{en})_3]\text{Cl}_3$) i soli hroma ($[\text{Co}(\text{en})_3]\text{Cl}_3$ bakra ($\text{K}_2[\text{Cu}(\text{ox})]$) rastvorenih u 6M KOH.

br. rastvora	$c(\text{KOH})/\text{M}$	$c([\text{Co}(\text{en})_3]\text{Cl}_3)/\text{M}$	$c(\text{Na}_2\text{CrO}_4)/\text{M}$
1	6	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
2	6	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
3	6	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$
4	6	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$

4.2. Elektrohemijska ispitivanja

Druga grupa eksperimenata, tzv. elektrohemijska ispitivanja, rađena su u ćeliji tip II, i predstavljaju ispitivanje kinetike reakcija koje se odvijaju na elektrodama. Ovo podrazumeva eksperimentalno određivanje polarizacionih krivih, snimanje impedansnih spektara i njihovo teorijsko tumačenje. Šematski prikaz ovog seta eksperimenata prilazan je na slici 4.3.



Slika 4.3. Šematski prikaz potenciostatskog uređaja za ispitivanje kinetike elektrodnih reakcija

Uz pomoć potenciostata, podešava se jačina struje između radne i referentne elektrode, čime se postiže zadata vrednost napona između istih. Referentna elektroda je nepolarizujuća, a otpor dela električnog kola u kojem se ona nalazi je tako veliki, da kroz nju ne prolazi struja koja bi unosila grešku merenja prilikom očitavanja polarizacionog potencijala. Očitana polarizaciona kriva predstavlja vrednost polarizacionog napona u funkciji gustine struje.

Metoda merenja elektrodnog potencijala uključuje upotrebu referentne elektrode sa elektrolitičkim mostom (Luggin-ova kapilara) koji sadrži elektrolit identičan onome u elektrolitičkoj ćeliji, kao što je prikazano na slici 4.2. Luggin-ovom kapilaram je smanjen tzv. omski otpor elektrolita. Na taj način je izbegnut progresivni porast nagiba Tafelove prave pri merenju nadnapona na višim gustinama struje, koji bi dao lažnu sliku približavanja graničnoj struji [19, 20].

Elektrokatalitička aktivnost različitih aktivacionih rastvora Co-Cr za reakciju izdvajanja vodonika (HER) je izučavana putem sledećih kinetičkih parametara: Tafelov nagib (b_c), razmenjana gustina struje (j_o), nadnapon potreban za konstantnu stopu proizvodnje vodonika, energija aktivacije (E_a).

Potenciostatske polarizacione krive su beležene prilikom merenja potencijala elektrode od -1.50 V do -0.9 V prema Hg/HgO referentnoj elektrodi i brzinom snimanja od 1mV/s.

Opseg frekvencija u kome su snimani impedansni spektri je od 50 kHz do 50 mHz, na nadnaponima od -35 mV do -300 mV. Amplituda naizmeničnog signala je bila 10 mV. Temperatura rastvora u elektrohemijskoj ćeliji je varirana od 303 do 343K.

Pre svakog merenja radna elektroda je bila kondicionirana na -1,3 V u odnosu na Hg/HgO referentnu elektrodu tokom 15s.

5. Rezultati eksperimenata i diskusija

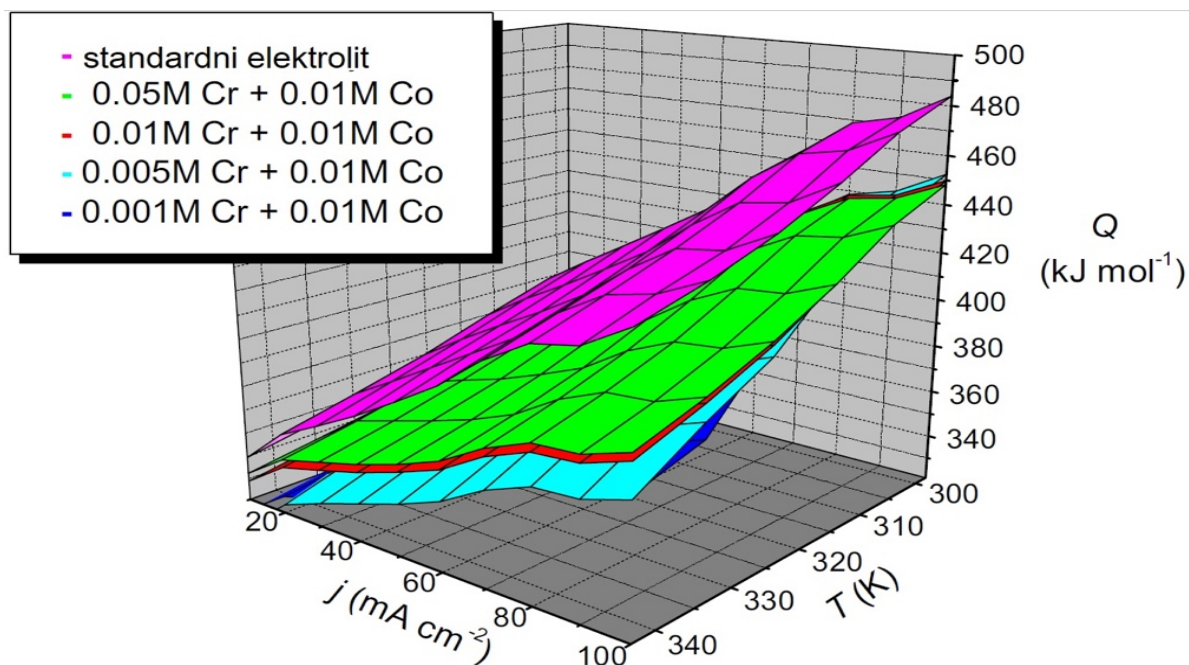
U ovom poglavlju biće prikazani rezultati ispitivanja uticaja jonskih aktivatora, na bazi kobalta i hroma, na smanjenje potrošnje energije u procesu proizvodnje vodonika iz alkalnih rastvora, odnosno njihov uticaj na efikasnost procesa elektrolize. Jonski aktivatori koji su korišćeni predstavljaju mešavinu *tris-(etilendiamin)-kobalt(III) hlorida* ($[Co(en)_3]Cl_3$) i *natrijum hromata* (Na_2CrO_4) u različitim koncentracionim odnosima.

5.1. Rezultati i diskusija merenja potrošnje energije

Proučavana je zavisnost potrošnje energije od sledećih parametara:

- 1) temperature,
- 2) gustine struje i
- 3) koncentracije *in situ* dodatih jonskih aktivatora u osnovnom elektrolitu

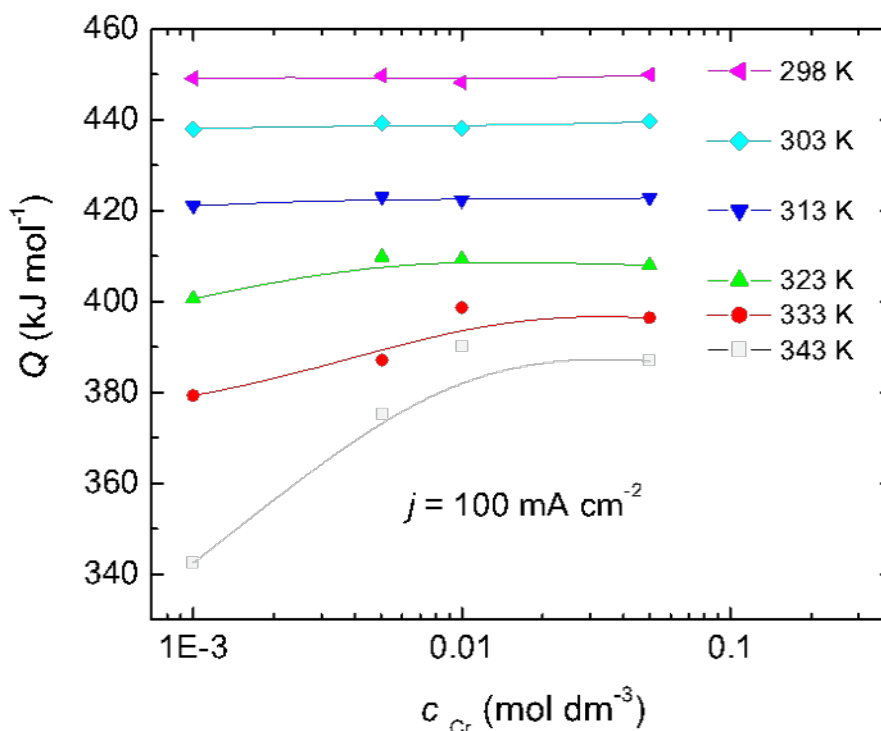
Energetski bilans procesa elektroize predstavljen je potrošnjom energije po molu dobijenog vodonika u zavisnosti od temperature i gustine struje. Dobijeni rezultati su prikazani 3D dijagramom na slici 5.1.



Slika 5.1. Komparativna trodimenzionalna prezentacija potrošnje energije u funkciji temperature i gustine struje, za standardni elektrolit ($-6M KOH$), i *in situ* jonske aktivatore ($-0.05 M Cr + 0.01 M Co$; $-0.01 M Cr + 0.01 M Co$; $-0.005 M Cr + 0.01 M Co$; $-0.001 M Cr + 0.01 M Co$)

[116]

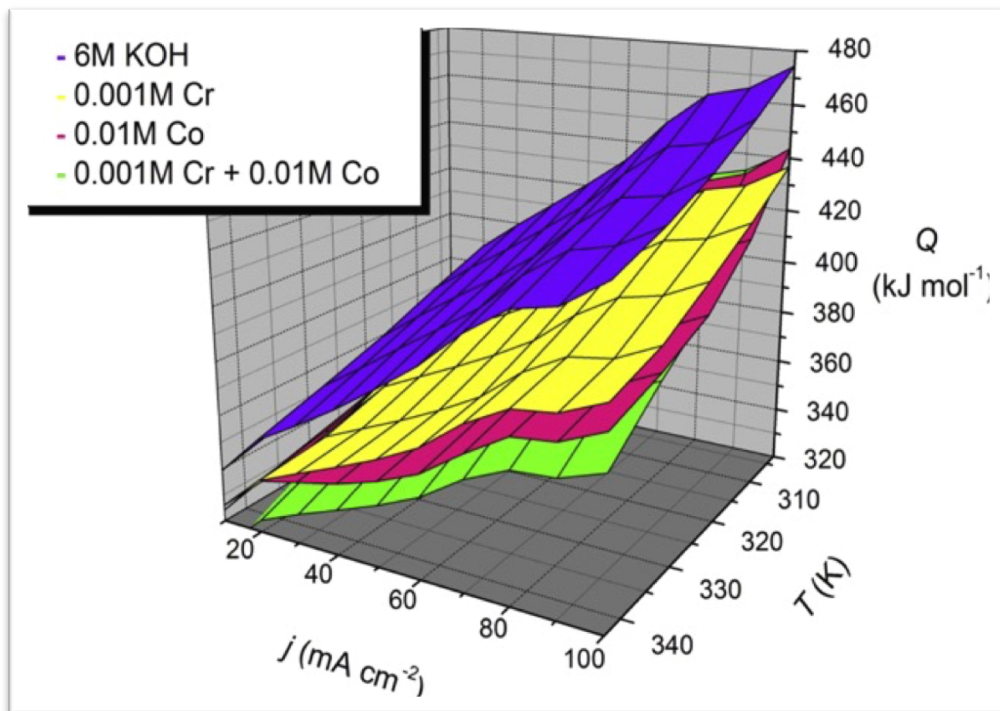
Koncentracija kobaltovih jona je bila konstantna i iznosila 0,1M, dok je koncentracija jona hroma varirana. Iz dobijenih i prikazanih rezultata može se zaključiti da je ušteda energije veća na višim temperaturama, pri većim gustinama struje, i pri nižoj koncentraciji natrijum-hromata, što je predstavljeno i na slici 5.2. Iz tog razloga svi dalji eksperimenti rađeni su koristeći aktivaciju sa ovim odnosom prelaznih metala, 0,001 M Cr i 0,01 M Co.



Slika 5.2. Potrošnja energije alkalnog elektrolizera u funkciji koncentracije in situ dodatih j.a. na različitim temperaturama pri konstantnoj gustini struje od 100 mA cm^{-2} [116]

Ovaj rezultat ima veliki značaj, obzirom da su male količine soli hroma potrebne za optimalnu potrošnju energije. Iz dobijenih podataka određena je relativna ušteda energije pri dodatku jonskih aktivatora, u poređenju sa standardnim elektrolitom, što je opisano u daljem tekstu.

Sledeći korak u istraživanju bio je dokazivanje postojanja sinergetskog efekta odabranih jonskih aktivatora. Dodavanjem samo natrijum-hromata u 6M KOH dovelo je do blagog poboljšanja u potrošnji energije u poređenju sa standardnim elektrolitom. **Najveća ušteda energije** uočena je kada su korišćena oba jonska aktivatora u kombinaciji, slika 5.3.:



Slika 5.3. Komparativna trodimenzionalna prezentacija potrošnje energije u funkciji temperature i gustine struje, za standardni elektrolit (6M KOH), i in situ jonske aktivatore (0.001 M Cr; 0.01 M Co; 0.001 M Cr + 0.01 M Co) [116]

U tabeli 5.1. prikazane su izmerene vrednosti potrošnje energije osnovnog elektrolita i elektrolita sa *j.a.*, izražene u SI jedinicama kJ mol^{-1} i u procentima ($\text{HHV}=\text{efikasnost}$)[116]. Tabela prikazuje energetska efikasnost, η_{HHV} , na 298 K, koja se definiše kao viša toplotna vrednost (HHV - *Higher Heating Value*) vodonika podeljena sa energijom koja se potroši u procesu elektrolize, po kilogramu ili molu proizvedenog vodonika[117][118], jednačina 9:

$$\eta_{\text{HHV}} = \frac{283,3 \text{ kJ mol}^{-1}}{U \cdot I \cdot t} \quad (9)$$

Tabela 5.1. Uporedni prikaz η_{HHV} vrednosti za standardni i za in situ aktiviran elektrolit

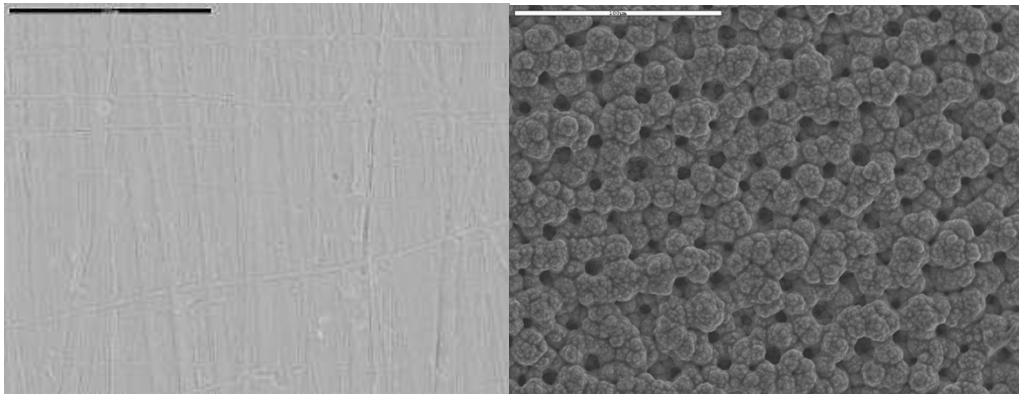
	6M KOH standardni elektrolit	0.01M Co u standardnom elektrolitu	0.001M Cr + 0.01M Co u standardnom elektrolitu
Q kJ mol^{-1}	432.41	395.68	386.54
η_{HHV}(%)	60	73	75

Iz svega prikazanog može se zaključiti da se upotrebom jonskih aktivatora odnosno, njihovim *in situ* dodavanjem standardnom elektrolitu, **povećava energetska efikasnost elektrolize** i da je vrednost njenog povećanja oko **15%**. Ovaj rezultat je izuzetno dobar i značajan za primenu u industriji.

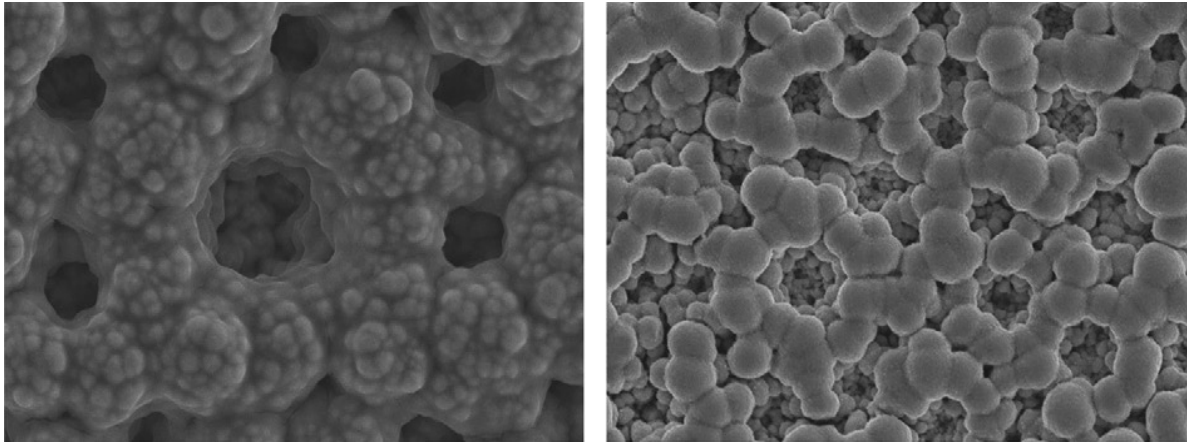
Mehanizam kojim *j.a.* utiču na povećanje elektrolitičke efikasnosti je veoma kompleksan. Bez detaljnijih istraživanja možemo samo reći da na efikasnost prvenstveno utiče elektrokatalitički efekat jednog ili kombinacija dva prelazna metala, koji se deponuju na površini elektrode. Na taj način obezbeđuje se velika, novonastala, površina sa mnogobrojnim aktivnim mestima koja pogoduju evoluciji vodonika.

Osim toga, ligandi kompleksnih jedinjenja ispitivanih metala koja se dodaju u standardni elektrolitički rastvor pomažu da se metali bolje deponuju na elektrodama. Čini se da ligandi imaju ulogu u uklanjanju oksida koji nastaju na katodi, sklanjaju ih sa njene površine i na taj način omogućavaju permanentno taloženje metala i razvoj aktivne površine katode koja dovodi do smanjenja nadnapona za reakciju izdvajanja vodonika, što smo ranije prikazali. Stoga se može reći da poboljšanju elektrokatalitičkog efekata doprinose i metali i kompleksi liganda.

Uloga *j.a.* je dokazana i prilikom ispitivanja morfoloških karakteristika nastalih naslaga na katodi. Skeniranje iste, uz pomoć skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM), urađeno je pre i posle izlaganja procesu elektrolize uz dodavanje *j.a.* Takođe, poređenja radi prikazane su i elektrode koje su taložene samo tris-etilendiamin kobalt-tri hloridom u standardnom elektrolitu, slika 5.4.



Slika 5.4. Čista niklena elektroda (levo) i elektroda sa tris-etilendiamin kobalt-tri hloridom (desno)[116]



Slika 5.5. Fotografije dobijene SEM tehnikom, na kojima se vidi površina niklene katode nakon elektrolitičkog *in situ* procesa (Levo: 0.01M Co kompleks, desno: 0.01M Co kompleks +0.001M Cr so) na uvećanju od 2000 puta [116]

Evidentno je da se dodavanjem *j.a.* u standardni elektrolitički rastvor u toku samog procesa elektrolize, formiraju njihovi depoziti na glatkoj površini niklene katode.

Pod istim uslovima, fotografije dobijene SEM analizom ukazuju na to da se izgled i veličina čestica depozita veoma razlikuju za tris-etilendiamin kobalt-tri hloriddodat samostalno, u odnosu na kombinaciju sa natrijum-hromatom, slika 5.5.

Analizom gore predstavljenih SEM fotografija može se zaključiti da *in situ* dodavanje jonskih aktivatoru u toku elektrolitičkog procesa dobijanja vodonika rezultuje bolje razvijenoj površini, kompleksnijoj strukturi depozita sa česticama manjih dimenzija. Formirani depoziti na elektrodama imaju odlično razvijenu površinu sa ujednačenom raspodelom pora i potencijalnih aktivnih mesta za nastajanje vodonika.

5.2. Rezultati i diskusija elektrohemijskih merenja

U okviru prvog dela vršena su istraživanja vezana za zavisnost potrošnje energije od koncentracije dodatih jonskih aktivatora na različitim temperaturama i gustinama struje. Na osnovu tih merenja zaključeno je da je najefikasnija elektrodepozicija i najniža potrošnja energije dobijena za odnos koncentracija 0.001 M Cr +0.01 M Co u vodenom rastvoru 6M KOH. Uzimajući ovo u obzir svi dalji eksperimenti rađeni su koristeći aktivaciju sa ovim odnosom prelaznih metala.

5.2.1. Polarizaciona merenja, nadnapon HER-reakcije stvaranja vodonika i stvarna energija aktivacije Co-Cr katalizatora

Postoje dva primarna tipa industrijske katalize, heterogena i homogena. Homogena kataliza predstavlja skup reakcija reaktanata, katalizatora i produkata koji su u istom agregatnom stanju, najčešće tečnom. U heterogenoj katalizi, reaktanti i katalizatori nisu u istom agregatnom

stanju, najčešće je katalizator u čvrstom a reaktanti u gasovitom ili tečnom stanju, što dodatno usložnjava proces i njegovo tumačenje. U našem slučaju radi se upravo o ovakvoj situaciji.

Elektrohemijska ispitivanja, snimanjem $I-E$ krivih, odnosno određivanjem gustine struje u zavisnosti od potencijala polarizacije, vršena su voltometrijskom metodom sa linearnom promenom potencijala. Elektroda se polarizuje naponskim signalom koji je pravolinijska, linearno rastuća, funkcija vremena. Pri tome, potencijal se menjao zadatom brzinom od 1 mV s^{-1} . Upoređene su $I-E$ krive dobijene u osnovnom elektrolitu bez i u prisustvu jonskog aktivatora. S obzirom da su gustina struje izmene i nagib Tafelovih pravih osnovni kinetički parametri kojima se klasifikuju elektrode sa elektrokatalitičke tačke gledišta, rezultati su tako obrađeni i prikazani da daju uvid u ova dva parametra.

Opšta jednačina koja povezuje gustinu struje i potencijal je Batler-Folmerova jednačina:

$$j = j_0 \left[e^{-\beta n F \eta / RT} - e^{(1-\beta) n F \eta / RT} \right] \quad (10)$$

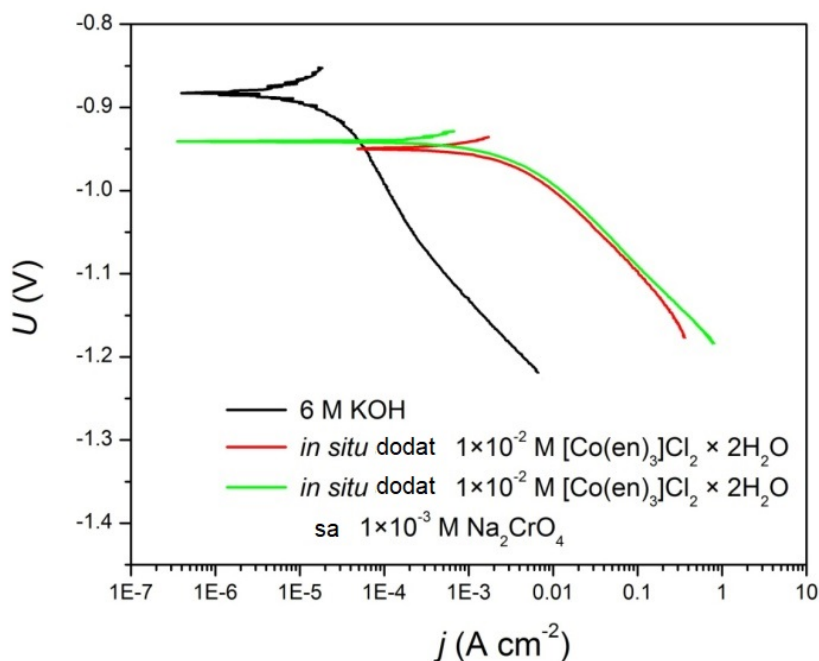
Ova jednačina opisuje strujno - naponske karakteristike elektrohemijske reakcije u kojoj je razmena elektrona odlučujući stupanj. Poreklo Batler-Folmerove jednačine (10) je zapravo isto kao i Tafelova jednačina:

$$\eta = a + b \log j \quad (11)$$

Parametri j_0 i b su poznati kinetički parametri elektrohemijske reakcije koji proizilaze iz Tafelove jednačine gde $\eta(\text{V})$ predstavlja primenjen nadnapon, $j(\text{mA/cm}^2)$ je dobijena gustina struje, $b(\text{V/dec})$ je nagib Tafelove krive i $a(\text{V})$ je odsečak na Tafelovoj krivoj. Odsečak je u relaciji sa gustinom struje prema jednačini $\frac{2,3 \cdot RT}{\beta \eta F} \cdot \log j_0$, gde R predstavlja gasnu konstantnu ($8,314 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), dok je β faktor simetrije.

Elektrokataliza je efekat uticaja elektrodnog materijala na stopureakcije[119]. Ona je veoma značajna za industriju jer omogućava prirast produkcije a smanjenje troškova. Efekat elektrodnih materijala može biti stvaran ili prividan. Ukoliko je poreklo posmatranog efekta proizašlo iz površinske strukture i hemijskog sastava elektrodnog materijala, to je stvarna elektrokataliza. Ako se efekat ogleda samo u povećanju površinske zone elektrodnog materijala, to predstavlja prividnu elektrokatalizu[54].

Prema generalnom modelu mehanizma reakcije za stvaranje vodonika u alkalnoj sredini [120], ako je Folmerov stupanj, odnosno adsorpcija vodonika, odlučujući reakcioni stupanj, dobijene Tafelove krive mogu dati nagib oko 0.120 V/dec na 25°C (298K). U slučaju da je to elektrohemijska desorpcija, tj. Hejrovski reakcioni stupanj, Tafelov nagib u tom slučaju može dostići vrednosti 0.040 ili 0.030 V/dec .



Slika 5.6. Tafelova polarizaciona kriva za reakciju izdvajanja vodonika u 6M KOH i polarizacione krive nakon *in situ* dodatog Co-Cr aktivatora u razlicitim odnosima pri temperaturi od 333K [54]

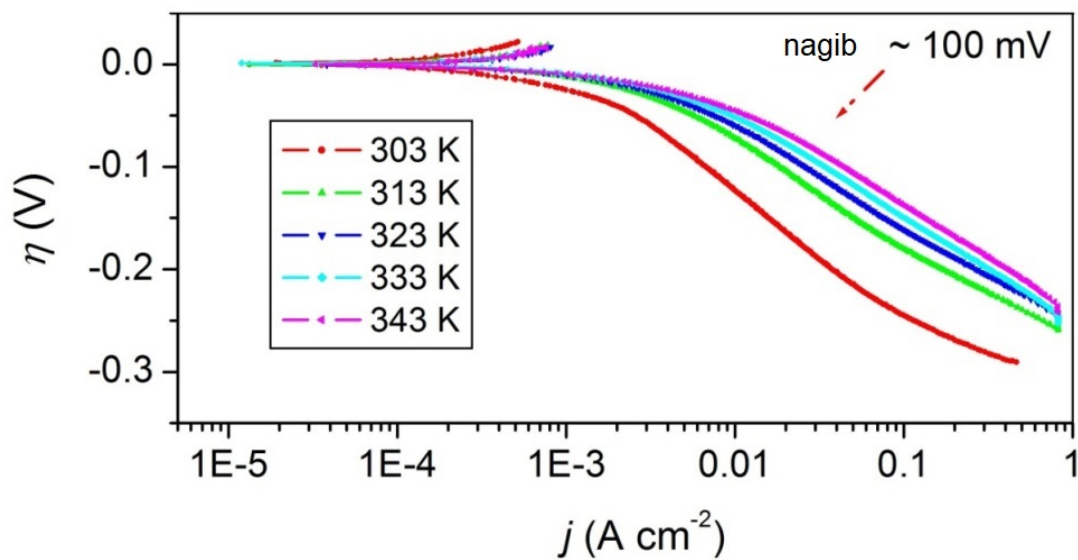
Ponašanje elektrolitičkog sistema 6M KOH i sistema *sain situ* dodatim Co-Cr aktivatorom ispitano je i prikazano na slici 5.6. Jasno se može uočiti da je kriva polarizacije sistema sa dodatim jonskim aktivatorima pomerenka ka manje negativnoj vrednosti potencijala, u odnosu na krivu čistog elektrolita.

Praćenje promene Tafelovog nagiba polarizacionih krivih na razlicitim temperaturama pokazalo je da se on kreće i opsegu od 98 mV/dec do 123 mV/dec, što ukazuje da je prenos naelektrisanja (Folmerov stupanj) odlučujući stupanj u HER. Dobijene vrednosti Tafelovog nagiba i gustine struje izmene prikazani su u tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Kinetički parametri dobijeni iz polarizacionih krivih za reakciju izdvajanja vodonika pri razlicitim temperaturama u sistemu sa *in situ* dodatim jonskim aktivatorom [54]

T (K)	- b / mV dec ⁻¹	j ₀ /A cm ⁻²
303	116	0.9 x10 ⁻³
313	102	1.9 x10 ⁻³
323	101	2.3 x10 ⁻³
333	99	3.4 x10 ⁻³
343	98	4.1 x10 ⁻³

Kinetički parametri iz prethodne tabele dobijeni su Tafelovom analizom polarizacionih krivih za različite vrednosti temperature. Vrednost nagiba i gustine struje izmene određeni su iz linearnog dela semilogaritamske zavisnosti. Gustina struje izmene dobija se ekstrapolacijom Tafelove krive do preseka sa Y-osom. Polarizacione krive iz kojih su dobijeni prethodni podaci prikazane su na sledećoj slici, slika 5.7.:



Slika 5.7. Tafelove polarizacione krive za reakciju dobijanja vodonika sa Co-Cr katalizatorom dodatim in situ u 6M KOH na različitim vrednostima temperature [54]

Ovom vrstom eksperimentalnog ispitivanja, potvrđeno je da temperatura sistema ima značajan uticaj na vrednost Tafelovog nagiba i gustine struje izmene. Za Co-Cr katalizator, nedvosmisleno se pokazalo da sa porastom temperature raste i vrednost gustine struje izmene. Kada se uporede vrednosti gustine struje izmene čistog elektrolita, na istim temperaturama, jasno se zaključuje da se prilikom dodavanja katalizatora vrednost gustine struje izmene povećava što znači da se uticaj katalizatora ogleda upovećanju aktivnost procesa. Sve ovo dovodi do rasta brzine reakcije izdvajanja vodonika HER, što ovaj katalizator čini kandidatom za industrijska ispitivanja.

5.2.2. Elektrohemijaska impedansna spektroskopija (EIS)

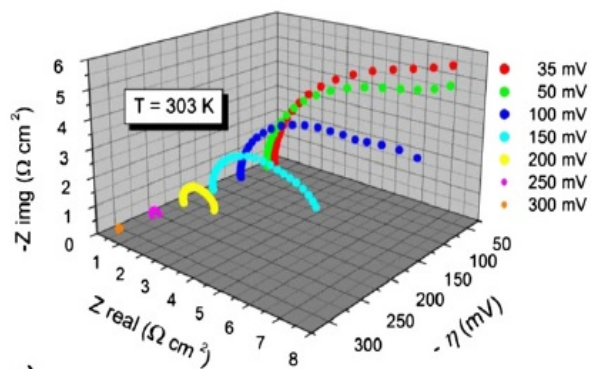
Različiti elektrohemijski procesi, sistemi i materijali mogu se detaljno proučavati elektroanalitičkom tehnikom impedansne spektroskopije (EIS). Ova tehnika omogućava merenje otpora, tj. impedanse, elektrohemijskih ćelija u zavisnosti od frekvencije primenjene naizmenične struje.

EIS merenja se vrše primenom sinusnog signala niske amplitude na elektrodu i merenjem odziva sistema u frekvencijskom domenu. Na osnovu analize impedansnih spektara dobijenih u ovom procesu moguće je izvući informacije o fizičkim i hemijskim karakteristikama sistema, kao što su površinska otpornost, kinetika elektrohemijskih procesa, elektronska provodljivost, difuzioni koeficijenti i sl.

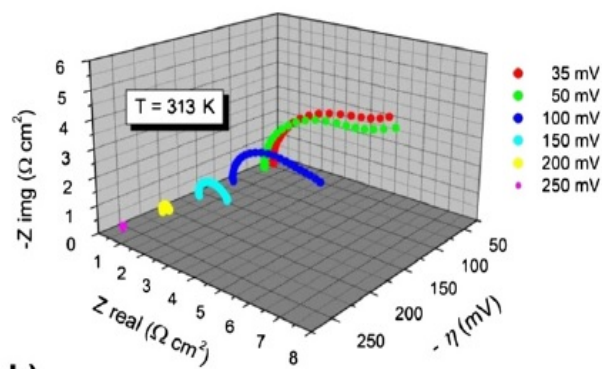
Impedansa je mera sposobnosti sistema da spreči protok struje i predstavlja kompleksan broj: $Z = Z' + iZ''$ koji sadrži realnu (Z_{re}) i imaginarnu komponentu (Z_{im}) [121]. Podaci dobijeni primenom ove tehnike prikazuju se Nyquist-ovim i Bode-ov dijagram i dalje se mogu simulirati primenom različitih metoda fitovanja podataka u zavisnosti od elektrohemijskog sistema koji se ispituje. Analiza dobijenih podataka vrši se primenom ekvivalentnog kola, koje predstavlja kolo koje je ekvivalentno sistemu u elektrohemijskoj ćeliji, gde je svaki efekat ili doprinos ukupnoj impedansi zamenjen električnom komponentom ispitivanog sistema.

U ovom radu merenja metodom impedansne spektroskopije su izvođena korišćenjem troelektrodnog sistema identičnog kao i u prethodnim merenjima. Snimljeni spektri impedanse predstavljeni Niquist-ovim dijagramima dati su na slici 5.8. (a-f).

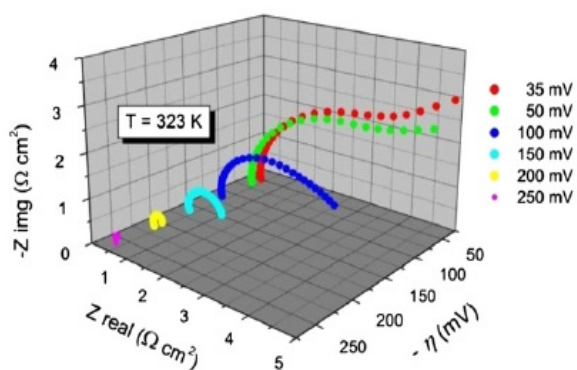
Vrednosti parametara očitanih sa impedansnih spektara dobijeni su fitovanjem eksperimentalnih podataka ispitanog sistema pri različitim nadnaponima i uz korišćenje Randelsovog ekvivalentnog kola kod koga je kapacitet dvojnog sloja zamenjen konstatnim faznim elementom (CPE). Dobijeni podaci su prikazani u tabeli 5.3.



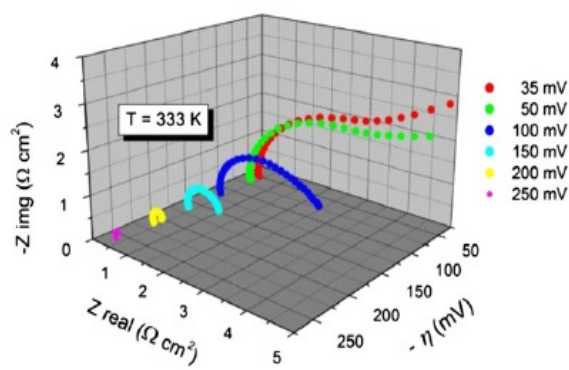
a)



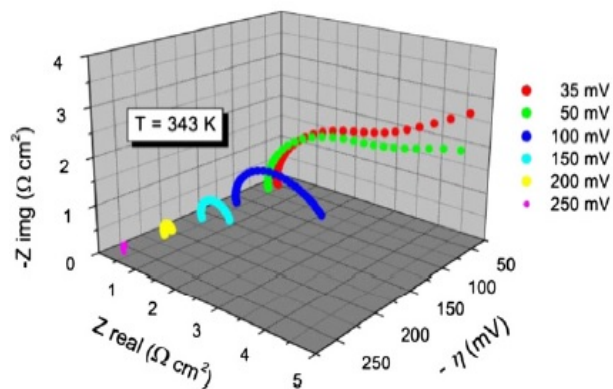
b)



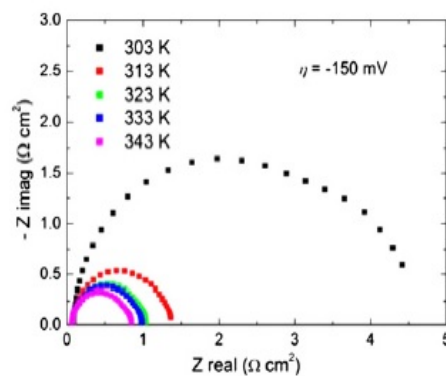
c)



d)



e)



f)

Slika 5.8. 3D spektri impedanse snimljeni na različitim temperaturama predstavljani Nyquist-ovim dijagramima (a-e) i uporedni prikaz Nyquist-ovih dijagrama na nadnaponu od -150 mV (f)

[54]

Tabela 5.3. Parametri dobijenih fitovanjem eksperimentalnih podataka snimljenim na različitim nadnaponima za sistem sa in situ dodatim Co-Cr aktivatorom [54]

T (K)	- η (mV)	R_e (Ω cm ²)	R_{ct} (Ω cm ²)	Y_0	α	C_{dl} (F cm ⁻²)	τ (s)	σ
303	35	0.0815	9.762	0.0713	0.941	0.0697	0.680	3485
	50	0.0833	7.960	0.0543	0.953	0.0521	0.415	2605
	100	0.0810	5.528	0.0443	0.957	0.0416	0.230	2080
	150	0.0875	3.331	0.0413	0.971	0.0389	0.130	1945
	200	0.0910	1.344	0.0412	0.967	0.0373	0.050	1865
	250	0.1006	0.389	0.0471	0.949	0.0380	0.015	1900
	300	0.1194	0.148	0.0705	0.892	0.0406	0.006	2030
313	35	0.0720	5.678	0.0639	0.944	0.0602	0.342	3010
	50	0.0735	5.358	0.0569	0.946	0.0532	0.285	2660
	100	0.0764	2.998	0.0514	0.959	0.0475	0.142	2375
	150	0.0814	1.177	0.0506	0.956	0.0444	0.052	2220
	200	0.0887	0.361	0.0508	0.945	0.0403	0.015	2015
	250	0.1004	0.124	0.0633	0.911	0.0394	0.005	1970
	300							
323	35	0.0673	4.614	0.0555	0.936	0.0506	0.233	2530
	50	0.0670	4.312	0.0479	0.942	0.0435	0.188	2175
	100	0.0704	2.409	0.0422	0.953	0.0377	0.091	1885
	150	0.0756	0.898	0.0418	0.951	0.0353	0.032	1765
	200	0.0850	0.277	0.0417	0.949	0.0328	0.009	1640
	250	0.0944	0.099	0.0540	0.916	0.0334	0.003	1670
	300							
333	35	0.0320	4.532	0.0545	0.886	0.0455	0.206	2275
	50	0.0336	4.244	0.0442	0.899	0.0366	0.155	1830
	100	0.0584	2.222	0.0337	0.943	0.0288	0.064	1440
	150	0.0678	0.855	0.0322	0.954	0.0271	0.023	1355
	200	0.0750	0.283	0.0372	0.940	0.0277	0.008	1385
	250	0.0826	0.085	0.0581	0.890	0.0300	0.003	1500
343	35	0.0190	4.056	0.0551	0.863	0.0434	0.176	2170
	50	0.0151	4.002	0.0479	0.860	0.0366	0.146	1830
	100	0.0373	2.033	0.0373	0.897	0.0277	0.056	1385
	150	0.0602	0.731	0.0304	0.949	0.0248	0.018	1240
	200	0.0681	0.241	0.0379	0.931	0.0268	0.006	1340
	250	0.0739	0.076	0.0701	0.861	0.0301	0.002	1505

Iz prethodno iznetih rezultata može se zaključiti da više vrednosti nadnapona koji se dovode sistemu, utiču na smanjenje otpora prilikom prenosa naelektrisanja, R_{ct} . Ova pojava ukazuje da se na taj način poboljšava kinetika HER.

Osim toga, više vrednosti nadnapona dovode do pada vrednosti kapaciteta dvojnog električnog sloja, C_{dl} , na svim radnim temperaturama. Ovaj fenomen objašnjava se zatvaranjem pora na elektrodi koje nastaje usled aktivnog izdvajanja mehurova gasovitog vodonika.

Katalitička aktivnost direktno je zavisna od površine elektrode a ova zavisnost može se utvrditi preko faktora hrapavosti σ koji je u direktnoj vezi sa kapacitetom dvojnog električnog sloja, C_{dl} .

Na kraju elektrolitičkog procesa i formiranja depozita na bazi Co i Cr, elektroda dobija novu površinsku strukturu koja dovodi do porasta vrednosti faktora hrapavosti σ . Vrednost C_{dl} za čiste, glatke niklene elektrode iznosi $\sim 20 \mu F cm^{-2}$ [125]. Iz ovih podataka može se izračunati faktor hrapavosti ispitivane elektrode deljnjem vrednosti C_{dl} za istu sa vrednošću za glatku elektrodu. Na osnovu dobijenog rezultata zaključuje se da poboljšanje katalitičke aktivnosti zavisi i od aktivne površine elektrode.

5.3. Rezultati analize ekonomskih scenarija za zeleni vodonik

Najznačajniji benefit zelenog vodonika u sektoru električne energije je njegova osobina da može biti dugotrajno skladište energije i da se iz njega generiše struja tokom pikova visoke potrošnje i poboljšava bezbednost električnog napajanja. U ovom delu teze, dat je pregled scenarija kojim će se pokazati koliko je zeleni vodonik perspektivan. Međutim, pre ovog izlaganja treba istaći da je proces prelaska na novi energetska poredak veoma složen. Faktori koji utiču na prelazak na vodoničnu energiju su mnogobrojni i ne mogu se svi uzeti u obzir ali se osnovne varijable mogu predvideti, razmotriti i proračunati [126]. Na osnovu ovakve analize mogu se prgnozirati određeni trendovi.

Analiza scenarija sastoji se od tri različite konfiguracije varijabli (promenljivih) za proučavanje svakog faktora koji utiče na cenu struje dobijene iz zelenog vodonika. Ovi scenariji uključuju dobijanje vodonika iz OIE, transport vodonika, skladištenje i krajnju upotrebu u proizvodnji električne energije. Na sledećem spisku mogu se videti vrednosti koje ostaju konstantne i one koje su promenljive. Takođe, da bi se pojednostavila kalkulacija, postoji i lista faktora koji su izuzeti iz računice.

Konstantne vrednosti:

1. Opex troškovi elektrolizera = 0,17 €/ kgH ₂
2. Gubici prilikom transporta = 2 %
3. 1 kg vodonika = 33,33 kWh
4. Gubici prilikom skladištenja = 3 %
5. Opex troškovi gorivnih ćelija = 0,17 €/ kgH ₂

Promenljive vrednosti:

1. Cena struje (€/MWh)
2. Efikasnost elektrolizera (%)
3. Cena transporta (€/kgH ₂ /1000 km)
4. Efikasnost gorivnih ćelija (%)
5. Cena skladištenja (€/kg)
6. Cena ugljenika (€/CO ₂ ton)

Izuzeti faktori:

1. Capex elektrolizera i gorivnih ćelija
2. Cena održavanja istih

Tumačenje:

Gubitak prilikom transporta smatra se da iznosi 2% [127], on je posledica dijametra cevovoda, razdaljine i drugih faktora. Za grejnu vrednost, u proračun je uzeta niža vrednost, koja iznosi 33,33 kWh/kg H₂ (energetski sadržaj vodonika). Gubici prilikom skladištenja vodonika procenjeni su na 3%, prema [128].

Opex (Operating expenses-operativni troškovi) troškovi elektrolizera i gorivnih ćelija, procenjuju se na oko 5 €/MWh, što odgovara ceni od 0,17 €/kgH₂ [129].

Efekat promene parametara na krajnju cenu je opserviran. Što troškovi OIE budu niži, kompetitivnost ovakvog načina dobijanja struje biće veća.

Osnovni scenario prikazuje vrednosti promenljivih parametara i cenu struje dobijenu tehnologijom gorivnih ćelija. Prema [130], vrednost od 30 – 50 €/MWh, je procenjena za energiju koja se dobija iz “onshore” vetra. Pošto je ovaj izvor energije uzet u proračun, odabrana je vrednost od 35 €/MWh. Ova vrednost se uklapa u trenutno stanje jer je prosečna vrednost energije dobijene iz vetra u EU od 30-40 €/MWh [131].

Prema IRENA, procenjena efikasnost elektrolizera dostići će 68% do 2030. godine, a u proračun je za sadašnji momenat uzeta vrednost od 65% [129]. Osim troškova vezanih za dobijanje električne energije iz OIE, unapređivanje tehnologije elektrolize je ključno za izvodljivost, implementaciju i prelazak na zeleni vodonik.

Rezultati naših fundamentalnih istraživanja potpuno su u skladu sa prethodnim zaključkom.

Kada vodonik nije moguće koristiti momentalno i na mestu proizvodnje, potrebna je mreža za njegov transport. Srednja vrednost transporta vodonika, kroz gasovod, iznosi 0,13€/kg, iskazano na 1000km.

Cena skladištenja vodonika u solanama, varira u rasponu od 0,1 €/kg to 0,1 €/kg prema Bloomberg NEF (2020), pa je u proračun ušla vrednost od 0,15 €/kg [64].

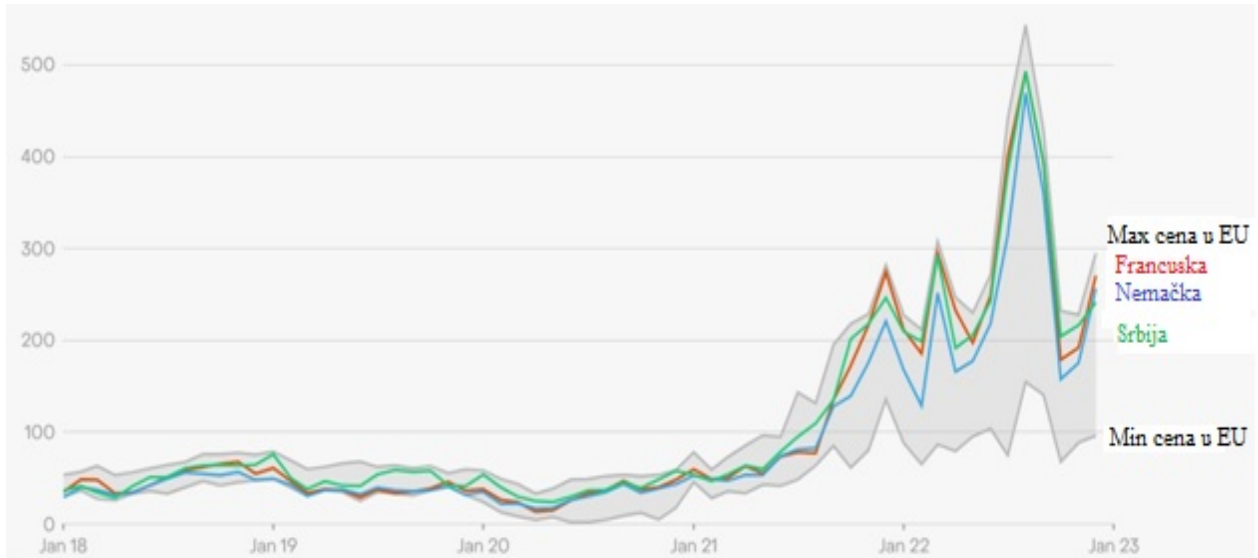
Efikasnost gorivnih ćelija predstavlja jednu od ključnih tačaka u formiranju cene struje dobijene iz vodonika, kao što je slučaj i sa procesom elektrolize. U zavisnosti od toga koliko će njihova efikasnost nepredovati, zavisi i to da li će cena “zelene” struje opadati ili ne, i koliko.

Osnovni scenario za proces proizvodnje vodonika i korišćenje u tehnologiji gorivnih ćelija za proizvodnju električne energije, a na osnovu prethodnih estimacija, može se prikazati uz pomoć tabele 5.4.

Tabela 5.4.: Prikaz osnovnih parametara koji utiču na cenu električne energije pri korišćenju vodoničnih gorivnih ćelija

Promenljiva	Vrednost	Jedinica	Cena vodonika €/kg
Cena struje (OIE)	35	€/MWh	1.17
Efikasnost elektrolizera	65	%	1.79
OPEX elektrolizera	0.17	€/kgH ₂	1.96
Troškovi transporta (nivelisani)	0.13	€/kgH ₂ /1000km	2.09
Gubici prilikom transporta	2.2	%	2.14
Troškovi skladištenja	0.15	€/kg	2.29
Gubici skladištenja	3	%	2.36
Efikasnost gorivnih ćelija	55	%	4.29
OPEX gorivnih ćelija	0.17	€/kgH ₂	4.46
Cena ukupnog procesa prelaska na gorivne ćelije	134 €/MWh		

Ovaj scenario pokazuje cenu struje koja je formirana, najviše na osnovu troškova obnovljive struje, efikasnosti tehnologije gorivnih ćelija i elektrolizera. Ukoliko na cenu struje koju dobijamo iz OIE ne može da se utiče, ključni razvojni elementi su elektroliza i gorivne ćelije. Cena od 134 €/MWh, smatra se nedovoljno niskom, ali iz sledećeg trenda cena električne energije u Evropi, može se zaključiti da postaje konkurentna, slika 5.9.



Slika 5.9. Veleprodajne cene struje u Evropi (preuzeto i modifikovano iz [132])

U poređenju sa cenama struje koje imaju rastući trend u poslednjih godinu dana, možemo da zaključimo da je zeleni vodonik veoma perspektivno gorivo.

Prema izveštaju IRENA iz 2020. godine [129], efikasnost elektrolize može se podići sa 65% na 75% do 2050. godine, što automatski menja cenu električne energije sa 134 €/MWh na 126 €/MWh.

U ovaj scenario uklapaju se naša istraživanja i eksperimentalni rezultati *in situ* unapređene elektrolize.

6. Zaključak

Vodonik kao energetska medijum je primarni fokus današnjice. U kombinaciji sa obnovljivim izvorima energije daje najbolje rezultate, jer ispunjava sve zahteve ekološke proizvodnje u procesu elektrolize, efikasnog skladištenja, transporta i efikasne upotrebe.

Elektroliza je proces kojim se dobija najčistiji vodonik i koji ima najmanji ugljenični otisak u poređenju sa svim ostalim tehnologijama proizvodnje. Zbog takvih svojih osobina, elektroliza je postala predmet velikog interesovanja i ulaganja, kako bi se njena efikasnost poboljšala i troškovi vodonika koji se pomoću nje dobija smanjili.

Sa ciljem utvrđivanja mogućnosti uštede energije u procesu dobijanja vodonika alkalnom elektrolizom, u okviru ove disertacije rađeni su setovi eksperimentalnih laboratorijskih ispitivanja i analiza globalnih trendova na polju vodonične ekonomije.

Nakon eksperimentalnog rada i opsežne analize, izvodi se zaključak da se ušteda energije u procesu proizvodnje vodonika alkalnom elektrolizom postiže mehanizmom aktivacije katode. Eksperimenti su zasnovani na Brojerovoj teoriji intermetalnih veza, koja predviđa pojavu sinergetskog efekta između dva prelazna metala. Na osnovu ove teorije, odabrana su jedinjenja sa prelaznim metalima Co i Cr u odgovarajućim odnosima, koji su ispitivani.

Primenom *in situ* aktivatora na bazi Co i Cr došlo je do promene u potrošnji energije u pravcu sniženja za preko **15%**.

Može se zaključiti da je povećanje energetske efikasnosti postignuto i da je ono rezultat više efekata:

- Katalitičkog efekta - sinergetskog dejstva dva prelazna metala
- Efekta površine - formiranje depozita velike aktivne površine
- Efekat liganda - pretpostavlja uklanjanje viška kompleksa metala sa aktivne površine i njeno stalno napredovanje

Polarizaciona merenja pokazala su da je u širokom strujnom opsegu nadnapon za reakciju izdvajanja vodonika manji za *in situ* aktiviranu elektrodu u poređenju sa čistom niklenom elektrodom u standardnom 6M KOH elektrolitu, i da je sa povećanjem temperature elektrolitičkog rastvora nadnapon takođe manji. Prilikom ispitivanja mehanizma reakcije izdvajanja vodonika pokazalo se da je u ispitivanom sistemu jonskih aktivatora Co-Cr odlučujući stupanj reakcije prenos naelektrisanja, tj. reakcija Folmera. Morfološkim ispitivanjem površine elektrode skenirajućom elektronskom mikroskopijom utvrđeno je da se pored reakcije izdvajanja vodonika odvija paralelno i proces elektrohemijskog taloženja legure prisutnih *d* metala u elektrolitu.

Zbog potrebe za dekarbonizacijom sve je veći udeo obnovljivih vidova energije u svetskom energetskom sistemu, što je otvorilo prostor da se zeleni vodonik nametne kao novi i obećavajući nosioc energije. Povećana potražnja za vodonikom, dovodi do sve veće potrebe da se

tehnologije elektrolize, kao jedine ekološke, sve višesusavršavaju. Proizvodnja vodonikaelektrolizom i njegovo korišćenje za proizvodnju električne energije putem gorivih ćelija su primeri tehnologija koje mogu pomoći da se napravi prelazak na održivu energiju i goriva.

Troškovi zelenog/elektrolitičkog vodonika rapidno padaju. Troškovi elektrolizera su već smanjeni za 60% u poslednjih deset godina, a očekuje se da će se prepoloviti 2030. godine u poređenju sa trenutnom cenom. Prema izveštaju IRENA iz 2020. godine, efikasnost elektrolize može se podići sa 65% na 75% do 2050. godine, što automatski menja cenu električne energije sa 134 €/MWh na 126 €/MWh. U regionima gde je obnovljiva struja jeftina, elektrolizeri su konkurentni sa vodonikom dobijenim iz fosilnih goriva. Zeleni vodonik je opcija koja će nas dovesti do klimatske neutralnosti i cilja nultog zagađenja. Pored ekoloških benefita ovakav vodonik se uklapa u integrisani energetska sistem, cirkularnu ekonomiju i stvaranje novih radnih mesta.

Iz perspektive zakonodavaca, tranzicija ka vodoniku služi važnim ciljevima kao što su dekarbonizacija ekonomije, stvaranje novih poslova, ispunjavanje energetska zahteva koji se stalno povećavaju i očuvanju životne sredine. Nacionalne vodonične strategije imaju za cilj da identifikuju najprofitabilnije sektore, da investiraju u razvoj i inovacije i da nateraju zakonodavce da svojim postupcima ohrabre proizvodnju i upotrebu vodonika na svim nivoima [76].

Momentum je jak, veliki industrijski igrači su voljni i željni da investiraju u vodonik, dok vlade širom kontinenta sve više prepoznaju kritični doprinos vodonika mitigaciji efekta klimatska promena.

Ako želimo da dekarbonizujemo ekonomije i ograničimo globalno zagrevanje na 1,5-1,8 stepeni Celzijusa do 2050. godine, akcije se moraju preduzeti u ovoj deceniji. Smanjenje emisije CO₂ od 80 GT ne mogu se ostvariti osim ako se temelji ne postave danas. Na temeljima stoje tri stuba koja će budućnost vodonika podržati, a to su: ulaganja, usklađivanje politike i stvaranje tržišta.

7. Literatura

- [1] T. F. Stocker *et al.*, *Climate change 2013 the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. 2013.
- [2] A. El-kharouf and H. S. Soyhan, *Renewable Energy - Resources, Challenges and Applications*. London: INtechOpen, 2020.
- [3] Energy Report, “Statistical Review of World Energy 2020 - 69th Edition,” 2020.
- [4] British Petroleum, “Statistical Review of World Energy 2021,” 2021.
- [5] G. Sekulić, D. Dimović, Z. Kalmar Krnajska Jović, and N. Todorović, *Procena ranjivosti na klimatske promene –Srbija*. 2012.
- [6] L. A. Greene, “United nations framework convention on climate change,” *Environmental Health Perspectives*, vol. 108, no. 8, pp. 1–8, 2000, doi: 10.35935/edr/31.2513.
- [7] F. B. Dragoljub Belić, “Globalno zagrevanje i gasovi staklene bašte,” 2006.
- [8] I. A. WGI, “Climate Change 2021 The Physical Science Basis WGI,” *Bull. Chinese Acad. Sci.*, vol. 34, no. 2, 2021.
- [9] D. Reay, C. Sabine, P. Smith, and G. Hymus, “Intergovernmental Panel on Climate Change: Fourth Assessment Report,” 2007. doi: 10.1038/446727a.
- [10] “EU ’s Global Leadership in Renewables: Final synthesis report,” 2021.
- [11] “Geotermalna energija,” *Pristupljeno 23.juna 2022. u 14:05.* <http://dept.uns.ac.rs/geotermalna-energija/>.
- [12] M. S. Z. Stipić, S. Vidović, “Potencijali Obnovljivih Izvora Energije U Republici Srbiji Sa Detaljnim Prikazom Eksploatacije Geotermalnih Izvora U Autonomnoj Pokrajini Vojvodini.”, 2010.
- [13] M. Гајић, С. Вујадиновић, “Размештај и могућности коришћења термалних и термоминералних вода у мачви,” 2009.
- [14] “Хидроелектране у Србији,” *Pristupljeno 24.juna 2022. u 18:30.* https://sr.m.wikipedia.org/sr-ec/Хидроелектране_у_Србији.

- [15] Slobodan Milutinović, *Upravljanje prirodnim resursima*. 2020.
- [16] A. Ž. Snežana Drndarević, *Osnovi energetike*. Fizički fakultet, 2014.
- [17] B. Udovičić, “Energija i okolina,” p. 190, 1989.
- [18] C. Baker, “Tidal power,” in *Marine Pollution Bulletin*, 1990, vol. 21, no. 3, pp. 160–161, doi: 10.1016/0025-326x(90)90555-m.
- [19] A. K. Furundzic, V. Kosoric, and K. Golic, “Potential for reduction of CO 2 emissions by integration of solar water heating systems on student dormitories through building refurbishment,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 2, no. 1, pp. 50–62, 2012, doi: 10.1016/j.scs.2011.10.005.
- [20] IEA, “<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/wind-power-generation-in-the-net-zero-scenario-2010-2030-2>,” *Pristupljeno 20.februara 2023. u 23:45, 2022.* .
- [21] International Renewable Energy Agency (IRENA), “World energy transitions outlook 2022,” 2022., *Pristupljeno 17.februara 2023.u 11:15*
- [22] Д. А. Барјактаревић, „Усклађивање прописа републике србије са прописима европске уније у области енергетике и заштите животне средине“, Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Правни факултет, 2018.
- [23] E. Vasseur, “United Nations Conference on the Human Environment. Stockholm, 5-16 June 1972,” *Water Res.*, vol. 7, no. 8, pp. 1227–1233, 1973, doi: 10.1016/0043-1354(73)90077-8.
- [24] UNEP, “73_06_GC1_report_ K7309025.pdf,” New York, 1973. *Pristupljeno 10.aprila 2022. 10:00*
- [25] R. De Janeiro, “The United Nations Conference on Environment and Development,” *J. Archit. Educ.*, vol. 46, no. 3, pp. 197–198, 1993, doi: 10.1080/10464883.1993.10734558.
- [26] Oebs, *Arhuska konvencija u pravu i praksi RS*, 2012.
- [27] T. Gerden, “The adoption of the kyoto protocol of t he united nations framework convention on climate change,” *Prisp. za Novejso Zgodovino*, vol. 58, no. 2, 2018, doi: 10.51663/pnz.58.2.07.
- [28] “Протокол из Кјота,” *Pristupljeno 18.septembra 2022. u 11:10.* https://sr.wikipedia.org/sr-el/Протокол_из_Кјота.
- [29] D. Todić, *Vodič kroz EU politike – Životna sredina*. 2011.
- [30] H. E. O. Sebastian Oberthür, *The Kjøto Protocol, International Climate Policy for the 21st*

Century. 2000.

- [31] W. Obergassel *et al.*, “Phoenix from the ashes: An analysis of the Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change - Part II,” *Environ. Law Manag.*, vol. 28, no. 1, pp. 3–12, 2016.
- [32] Đ. J. Larisa Jovanović, Vladan Joldžić, *Arhuska konvencija i demokratizacija u oblasti zaštite životne sredine*. 2015.
- [33] “Службени гласник РС”, бр. 40 од 22.4.2021.
- [34] “Оквир за управљање утицајима на животну средину и друштво,” pp. 1–173, 2021.
- [35] Y. Anouti, S. Elborai, R. Kombargi, and R. Hage, *The Dawn of Green Hydrogen*. 2020, p. 16.
- [36] United Nations Environment Programme, “The hydrogen economy: A non-technical review,” UNEP DTIE Energy Branch, 2006.
- [37] J. Ivy, “Summary of electrolytic hydrogen production,” *Small*, no. September, p. 27, 2004.
- [38] M. Martino, C. Ruocco, E. Meloni, P. Pullumbi, and V. Palma, “Main hydrogen production processes: An overview,” *Catalysts*, vol. 11, no. 5, 2021, doi: 10.3390/catal11050547.
- [39] NIREX, A. J. Blazer, M. Fishedick, K. Arnold, D. Schüwer, and A. Pastowski, “ENERGY OF THE FUTURE? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H₂,” 2017.
- [40] M. K. Helmut Eichseder, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*. 2012.
- [41] M. T. Manfred Fishedick, Klaus Görner, *CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung*, 8-3-642-19527-3, 2015.
- [42] M. Jotanovic, V. Micic, and S. Pavlovic, “Hydrogen production by biomass gasification,” *Zast. Mater.*, vol. 58, no. 2, pp. 228–234, 2017, doi: 10.5937/zasmat1702228j.
- [43] FNR, “Priručnik o biogasu,” 2016.
- [44] V. Radak, *Opšti kurs fizičke hemije za biologe*. 1992.
- [45] Ivana M. Perović, “Uticaj primene jonskih aktivatora na bazi d-metala Zn, Co, Cu, Ni, Mo i laserskog zračenja na energetske efikasnost procesa dobijanja vodonika alkalnom elektrolizom,” Univerzitet u Beogradu, 2018.
- [46] F. M. Sapountzi, J. M. Gracia, C. J. K. Weststrate, H. O. A. Fredriksson, and J. W. H. Niemantsverdriet, “Electrocatalysts for the generation of hydrogen , oxygen and synthesis

- gas,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 58, pp. 1–35, 2017, doi: 10.1016/j.pecs.2016.09.001.
- [47] G. Schiller, “Überblick über die Verfahren der Wasserelektrolyse und Forschungsergebnisse sowie Forschungsbedarf bei der alkalischen Elektrolyse,” 2012.
- [48] G. S. Tasić, “Primena novih katodnih materijala za izdvajanje vodonika dobijenih elektrohemijskim taloženjem Ni i Co sa Mo i W i ispitivanje uticaja mikrotalasnog polja na njihova fizičkohemijska svojstva Doktorska disertacija,” Univerzitet u Beogradu, 2013.
- [49] K. Zeng and D. Zhang, “Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, pp. 307–326, 2009, doi: 10.1016/j.pecs.2009.11.002.
- [50] F. Li, P. Bertoncello, I. Ciani, G. Mantovani, and P. R. Unwin, “Incorporation of functionalized palladium nanoparticles within ultrathin nafion films: A nanostructured composite for electrolytic and redox-mediated hydrogen evolution,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 18, no. 11, pp. 1685–1693, 2008, doi: 10.1002/adfm.200701447.
- [51] L. Brewer, *Chemical bonding theory applied to metals*. New York: ASM International, 1988.
- [52] F. Technology, “A D V A N C E S IN ELECTROCATALYSIS FOR H Y D R O G E N EVOLUTION IN,” vol. 12, no. I, 1987.
- [53] Leo Brewer, “*History of the application of the generalized lewis acid-base theory to metals*”, 1942.
- [54] M. P. Marčeta Kaninski, M. M. Seović, S. M. Miulović, D. L. Žugić, G. S. Tasić, and D. P. Šaponjić, “Cobalt-chrome activation of the nickel electrodes for the HER in alkaline water electrolysis-Part II,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 4, pp. 1758–1764, 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.11.117.
- [55] S. Mentus, *Elektrohemija*, Beograd: Fakultet za fizičku hemiju, 2008.
- [56] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. <https://www.perlego.com/publisher/9574/wileyieee-press>, 2013.
- [57] L. Fan, Z. Tu, and S. H. Chan, “Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 8421–8446, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.08.003.
- [58] V. Nikolić, “Uticaj volfram-karbidnih i ugljeničnih nosača anodnih katalizatora na karakteristike PEM gorivne ćelije,” Univerzitet u Beogradu, 2013.

- [59] M. Della Vigna and D. R. Bingham, “Carbonomics,” 2022. [Online]. Available: <https://www.goldmansachs.com/insights/pages/gs-research/carbonomics-affordability/report.pdf>.
- [60] “What is hydrogen?,” *Pristupljeno 03.oktobra 2022. u 12:20.* <https://www.theworldofhydrogen.com/gasunie/what-is-hydrogen/>.
- [61] J. Delbeke, A. Runge-Metzger, Y. Slingenberg, and J. Werksman, “The paris agreement,” *Towar. a Clim. Eur. Curbing Trend*, pp. 24–45, 2019, doi: 10.4324/9789276082569-2.
- [62] Hydrogen Council and McKinsey & Company, “Hydrogen for Net-Zero: A critical cost-competitive energy vector,” *Hydrog. Counc.*, no. November, 2021.
- [63] I. E. Agency and W. E. Outlook, “World Energy Outlook 2019,” *World Fig.*, pp. 32–32, 2019.
- [64] Bloomberg NEF, “Hydrogen Economy Outlook,” *Bloom. New Energy Financ.*, p. 12, 2020.
- [65] US DOE, “Report to Congress on the status and progress of the DOE Hydrogen Program,” 1999.
- [66] “Global Hydrogen Review 2021,” *Glob. Hydrog. Rev. 2021*, 2021, doi: 10.1787/39351842-en.
- [67] T. Yusaf *et al.*, “Hydrogen Energy Demand Growth Prediction and Assessment (2021–2050) Using a System Thinking and System Dynamics Approach,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 2, 2022, doi: 10.3390/app12020781.
- [68] I. E. Agency, “Global Energy Review : CO2 Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level INTERNATIONAL ENERGY,” 2021.
- [69] Hydrogen Council, “Hydrogen for Net-Zero: A critical cost-competitive energy vector,” *Hydrog. Counc.*, no. November, 2021.
- [70] D.G. for C. European Commission, “The EU in 2021 : general report on the activities of the European Union,” 2022. doi: 10.2775/379018.
- [71] “Najveći elektrolizer u Evropi počeo da proizvodi zeleni vodonik,” *Pristupljeno 18.januara 2023. u 11:50.* <https://balkangreenenergynews.com/rs/najveci-elektrolizer-u-evropi-poceo-da-proizvodi-zeleni-vodonik/>.
- [72] “HySynergy,” *Pristupljeno 18.januara 2023. u 12:15.* <https://www.everfuel.com/projects/hysynergy/>.

- [73] A. Wang, K. Van der Leun, D. Peters, and M. Buseman, “European Hydrogen Backbone,” 2020. [Online]. Available: <https://transparency.entsog.eu/>.
- [74] J. Bockris, *Energy: The Solar-Hydrogen Alternative*. Architectural Press, 1976.
- [75] M. Pandev, P. Lucchese, C. Mansilla, A. Le Duigou, B. Abrashev, and D. Vladikova, “Hydrogen Economy: the future for a sustainable and green society,” *Bulg. Chem. Commun.*, vol. 49, no. C, pp. 84–92, 2017.
- [76] F. Elmanakhly, A. DaCosta, B. Berry, R. Stasko, M. Fowler, and X. Y. Wu, “Hydrogen economy transition plan: A case study on Ontario,” *AIMS Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 775–811, 2021, doi: 10.3934/ENERGY.2021036.
- [77] J. Kirchherr *et al.*, “Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU),” *Ecol. Econ.*, vol. 150, no. December 2017, pp. 264–272, 2018, doi: 10.1016/j.ecolecon.2018.04.028.
- [78] P. M. Falcone, M. Hiete, and A. Sapio, “Hydrogen economy and sustainable development goals: Review and policy insights,” *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 31, p. 100506, 2021, doi: 10.1016/j.cogsc.2021.100506.
- [79] B. Ilić, “Ekološka ekonomija i održivi razvoj”, pp. 305–311.
- [80] M. Paolo, A. Kander, and P. Warde, “The Role of Energy in Twentieth-Century Economic Growth,” *Power to People*, no. October, 2014, doi: 10.23943/princeton/9780691143620.003.0010.
- [81] J. Uribe-Toril, J. L. Ruiz-Real, J. Milán-García, and J. D. P. Valenciano, “Energy, economy, and environment: A worldwide research update,” *Energies*, vol. 12, no. 6, 2019, doi: 10.3390/en12061120.
- [82] T. Nakata, “Energy-economic models and the environment,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, no. 4, pp. 417–475, 2004, doi: 10.1016/j.peccs.2004.03.001.
- [83] P. Ekins, “The economic growth engine: how energy and work drive material prosperity,” *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 3, no. 3, p. 228, Sep. 2010, doi: 10.1080/19397031003775653.
- [84] G. Jovanović and S. Božilović, “Ekološki Menadžment U Funkciji Održivog Razvoja,” vol. 2018, pp. 629–633, 2018, doi: 10.31410/eman.2018.629.
- [85] S. Pokrajac, “Održivi Razvoj I Ekološka Ekonomija Sustainable Development and Ecological,” pp. 21–30.
- [86] B. R. Keeble, “The Brundtland Report: ‘Our Common Future,’” *Med. War*, vol. 4, no. 1, pp. 17–25, 1988, doi: 10.1080/07488008808408783.

- [87] R. Damnjanović, M. Bešlin-Feruh, and A. Rajković, “Sustainable development marketing and ecological management,” *Odrziv. Razvoj*, vol. 2, no. 2, pp. 31–40, 2020, doi: 10.5937/odrraz2002031d.
- [88] “Global green hydrogen production set to reach 5.7 million tons by 2030 Powered by decarbonization,” *Pristupljeno 25.januara 2023. u 18:20.* <https://www.frost.com/news/global-green-hydrogen-production-set-to-reach-5-7-million-tons-by-2030-powered-by-decarbonization/>.
- [89] C. Acar and I. Dincer, “Review and evaluation of hydrogen production options for better environment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 218, pp. 835–849, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.046.
- [90] I. Staffell *et al.*, “The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 12, no. 2, pp. 463–491, 2019, doi: 10.1039/c8ee01157e.
- [91] “Energy transition,” *Pristupljeno 28.januara 2023. u 15:30.* <https://www.rechargenews.com/energy-transition/opinion-why-market-dynamics-will-reduce-the-average-price-of-green-hydrogen-to-1-50-kg-by-2030/2-1-1292801>.
- [92] Eurostat, *Sustainable Development in the European Union: Monitoring report on progress towards the SDGs in an EU context*, 2022.
- [93] “Hydrogen data telling a story,” *Pristupljeno 10.januara 2023. u 11:35.* <https://globalenergyinfrastructure.com/articles/2021/03-march/hydrogen-data-telling-a-story/>.
- [94] M. Thürer, I. Tomašević, M. Stevenson, T. Qu, and D. Huisingsh, “A systematic review of the literature on integrating sustainability into engineering curricula,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 181, pp. 608–617, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.130.
- [95] I. Dincer and C. Acar, “Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 34, pp. 11094–11111, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.035.
- [96] B. C. R. Ewan and R. W. K. Allen, “A figure of merit assessment of the routes to hydrogen,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 30, no. 8, pp. 809–819, 2005, doi: 10.1016/j.ijhydene.2005.02.003.
- [97] O. Machhammer, A. Bode, and W. Hormuth, “Financial and Ecological Evaluation of Hydrogen Production Processes on Large Scale,” *Chem. Eng. Technol.*, vol. 39, no. 6, pp. 1185–1193, 2016, doi: 10.1002/ceat.201600023.
- [98] A. Al-Qahtani, B. Parkinson, K. Hellgardt, N. Shah, and G. Guillen-Gosalbez, “Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation,”

Appl. Energy, vol. 281, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115958.

- [99] B. Parkinson, P. Balcombe, J. F. Speirs, A. D. Hawkes, and K. Hellgardt, “Levelized cost of CO₂ mitigation from hydrogen production routes,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 19–40, 2019, doi: 10.1039/c8ee02079e.
- [100] EU Monitor, “Communication COM/2020/301: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe,” *Communication From Comm. To Eur. Parliam. Counc. Eur. Econ. Soc. Comm. Comm. Reg.*, vol. 53, no. 9, 2020.
- [101] Wood Mackenzie, “Can Green Hydrogen Compete On Cost?,” *Pristupljeno 12.12.2022. 10:30*, 2022. <https://www.woodmac.com/news/opinion/can-green-hydrogen-compete-on-cost/>.
- [102] M. Alvera, “Global Gas Report 2020,” *Glob. Gas Rep. 2020*, p. 76, 2020.
- [103] Agora Energiewende, “EU-wide innovation support is key to the success of electrolysis manufacturing in Europe BACKGROUND,” *Report*, no. November, pp. 1–6, 2019.
- [104] Michael Kobina Kane and S. Gil, “<https://blogs.worldbank.org/ppps/green-hydrogen-key-investment-energy-transition>,” *Pristupljeno 12.12.2022. 13:30*.
- [105] C. M. Lacnjevac and M. M. Jaksic, “Synergetic Electrocatalytic Effects of d-Metals on The Hydrogen Evolution Reaction in Industrially Important Electrochemical Processes,” *J. Res. Inst. Catal. Hokkaido Univ.*, vol. 31, no. 1, pp. 7–33, 1983.
- [106] D. L. Stojić, M. P. Marčeta, S. P. Sovilj, and Š. S. Miljanić, “Hydrogen generation from water electrolysis - Possibilities of energy saving,” in *Journal of Power Sources*, May 2003, vol. 118, no. 1–2, pp. 315–319, doi: 10.1016/S0378-7753(03)00077-6.
- [107] M. P. M. Kaninski, A. D. Maksić, D. L. Stojić, and Š. S. Miljanić, “Ionic activators in the electrolytic production of hydrogen - Cost reduction-analysis of the cathode,” *J. Power Sources*, vol. 131, no. 1–2, pp. 107–111, May 2004, doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.01.005.
- [108] A. D. Maksic, S. M. Miulovic, V. M. Nikolic, I. M. Perovic, and M. P. Marceta Kaninski, “Energy consumption of the electrolytic hydrogen production using Ni-W based activators - Part i,” *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 405, no. 1–2, pp. 25–28, 2011, doi: 10.1016/j.apcata.2011.07.017.
- [109] E. Pellicer, E. Gómez, and E. Vallés, “Use of the reverse pulse plating method to improve the properties of cobalt-molybdenum electrodeposits,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 201, no. 6, pp. 2351–2357, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.04.011.
- [110] P. Berthod, “Chromium Deposition on Cobalt-Based Alloys by Pack-Cementation and Behaviour of the Coated Alloys in High Temperature Oxidation,” *Open Corros. J.*, vol. 4,

- no. 1, pp. 27–33, 2011, doi: 10.2174/1876503301104010027.
- [111] A. Dolgov, N. T. Dikova, D. Dzhendov, D. Pavlova, and M. Simov, “Mechanical properties of dental Co-Cr alloys”, *Sci. Proc. Ii Int. Sci. Conf. "Innovations Eng. 2016*, vol. 33, no. 3, pp. 29–33, 2016.
- [112] G. Gavaille, S. Durupt, and J. Hubsch, “Magnetic behaviour of Co-Cr alloys above the critical concentration for ferromagnetism”, *J. Phys. Paris*, vol. 43, no. 5, pp. 773–777, 1982, doi: 10.1051/jphys:01982004305077300.
- [113] M. P. Marceta Kaninski, D. P. Saponjic, V. M. Nikolic, D. L. Zugic, and G. S. Tasic, “Energy consumption and stability of the Ni-Mo electrodes for the alkaline hydrogen production at industrial conditions,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 15, pp. 8864–8868, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.04.144.
- [114] M. P. Marceta Kaninski, S. M. Miulovic, G. S. Tasic, A. D. Maksic, and V. M. Nikolic, “A study on the Co–W activated Ni electrodes for the hydrogen production from alkaline water electrolysis – Energy saving,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 5227–5235, May 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.02.046.
- [115] M. M. Jakšić, “Electrocatalysis of hydrogen evolution in the light of the brewer-engel theory for bonding in metals and intermetallic phases,” *Electrochim. Acta*, vol. 29, no. 11, pp. 1539–1550, 1984, doi: 10.1016/0013-4686(84)85007-0.
- [116] S. M. Miulovic, S. L. Maslovara, M. M. Seovic, B. B. Radak, and M. P. Marceta Kaninski, “Energy saving in electrolytic hydrogen production using Co-Cr activation - Part i,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 22, pp. 16770–16775, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.08.075.
- [117] J. Ivy, “Summary of Electrolytic Hydrogen Production: Milestone Completion Report,” 2003, Accessed: Aug. 29, 2017. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>.
- [118] D. Barreca *et al.*, “Supported metal oxide nanosystems for hydrogen photogeneration: Quo vadis?,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 21, no. 14, pp. 2611–2623, 2011, doi: 10.1002/adfm.201100242.
- [119] Allen J. Bard, Larry R. Faulkner, *Electrochemical methods fundamentals and application.*, John Wiley& Sons, Inc., 2001.
- [120] J. Garche, Ed., *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. Elsevier Ltd., 2009.
- [121] E. Barsoukov and J. R. (James R. Macdonald, *Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications.* . John Wiley& Sons, Inc., 2005.

- [122] M. Sluters-Rehbach, “Impedances of electrochemical systems: Terminology, nomenclature and representation-Part I: Cells with metal electrodes and liquid solutions (IUPAC Recommendations 1994),” *Pure Appl. Chem.*, vol. 66, no. 9, pp. 1831–1891, 1994.
- [123] J. Homo, A. A. Moya, and C. F. Gonzfilez-Femfindez, “Simulation and interpretation of electrochemical impedances using the network method,” *J. Electroanal. Chem.*, vol. 402, pp. 73–80, 1996, Accessed: Oct. 10, 2017.
- [124] G. J. Brug, A. L. G. van den Eeden, M. Sluyters-Rehbach, and J. H. Sluyters, *Journal of electroanalytical chemistry and interfacial electrochemistry.*, vol. 176, no. 1–2. Elsevier Sequoia, 1984.
- [125] D. Stolten and B. Emonts, *Hydrogen science and engineering: materials, processes, systems and technology.* John Wiley & Sons, 2016.
- [126] D. J. Jovan and G. Dolanc, “Can Green Hydrogen Production Be Economically Viable under Current Market Conditions,” 2020.
- [127] A. J. M. van Wijk, G. R. Arvind, M. P. C. Weijnen, and Z. Lukszo, “Hydrogen . The bridge between Africa and Europe,” no. 2, 2019.
- [128] Z. Shi, K. Jessen, and T. T. Tsotsis, “Impacts of the subsurface storage of natural gas and hydrogen mixtures,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 15, pp. 8757–8773, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.044.
- [129] IRENA, “Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5⁰C Climate Goal,” Abu Dhabi, 2020.
- [130] ICCT, “Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe,” *Int. Counc. Clean Transp.*, pp. 1–73, 2020.
- [131] E. Sesto and N. H. Lipman, “Wind energy in Europe,” 1992.
- [132] “Ember,” *Pristupljeno 30.01.2023. 09:50.* <https://ember-climate.org/data/data-tools/europe-power-prices/>.