

# Analiza proizvodnje plave energije korištenjem plinske infrastrukture na eksploatacijskim poljima sjevernog Jadrana

---

Klabučar, Boris

Master's thesis / Diplomski rad

2018

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:377729>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-24**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**ANALIZA PROIZVODNJE PLAVE ENERGIJE  
KORIŠTENJEM PLINSKE INFRASTRUKTURE NA  
EKSPLOATACIJSKIM POLJIMA SJEVERNOG JADRANA**

Diplomski rad

Boris Klabučar

N255

Zagreb, 2018.

ANALIZA PROIZVODNJE PLAVE ENERGIJE KORIŠTENJEM PLINSKE  
INFRASTRUKTURE NA EKSPLOATACIJSKIM POLJIMA SJEVERNOG JADRANA

BORIS KLABUČAR

Diplomski rad je izrađen : Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10 000, Zagreb

Sažetak

Plava energija predstavlja obnovljiv i još neiskorišten resurs sjevernog Jadrana. Pod plavom se energijom podrazumijeva proizvodnja električne energije na moru pomoću energije vjetra, valova, plime i oseke. Proizvodnju energije iz obnovljivih izvora karakterizira isprekidanost i nepredvidivost. Proizvodnja se često ne poklapa s potrošnjom što rezultira viškovima ili manjkovima električne energije u elektroenergetskom sustavu. Neravnoteže su opasne i moraju se izbjegavati jer mogu prouzročiti pad ili trajno oštećenje energetske sustava. Tehnologija kemijske konverzije predstavlja obećavajuće rješenje efikasnog skladištenja viškova električne energije te time omogućuje izgradnju značajnih kapaciteta obnovljivih izvora energije (OIE) bez negativnih utjecaja na energetske sustav. Pad proizvodnje plina na poljima sjevernog Jadrana otvara mogućnost budućeg korištenja postojeće plinske infrastrukture u sinergiji s vjetroelektranama u proizvodnji plave energije i balansiranju elektroenergetskog sustava.

Ključne riječi: plava energija, električna energija, plinska infrastruktura, sjeverni Jadran, kemijska konverzija

Diplomski rad sadrži: 47 stranica, 2 tablice, 20 slika i 31 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta,  
Pierottijeva 6, Zagreb.

Voditelj: dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, izvanredna profesorica RGNF

Ocjenjivači: dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, izvanredni profesor RGNF

dr. sc. Luka Perković, docent RGNF

dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF

Datum obrane: 20. srpnja 2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

ANALYSIS OF BLUE ENERGY PRODUCTION USING NATURAL GAS  
INFRASTRUCTURE IN THE NORTHERN ADRIATIC

BORIS KLABUČAR

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Blue energy is a renewable and still untouched resource in the Northern Adriatic. The term itself refers to all energy generated by offshore wind, wave and tidal energy. Energy production from renewable resources is intermittent and unpredictable; thus, energy production from these sources is rarely balanced with actual demand, often creating excess or lack of electricity in the system. Such imbalance is dangerous since it can result in power outages, blackouts and even permanent damage to the electrical power system and must be avoided. Chemical conversion is a part of an integrated Power-to-Gas process, a promising solution for effective, large-scale excess electricity storage. Using this kind of technology, major renewable energy projects become achievable without the negative effects on the electrical power system. By decreasing natural gas production in the Northern Adriatic, it becomes possible to use the existing natural gas infrastructure in synergy with offshore wind farms. In this way, blue energy production and effective balancing of the electricity power system can be achieved.

Key words: blue energy, electricity, natural gas infrastructure, Northern Adriatic, chemical conversion

Master's thesis contains: 47 pages, 2 tables, 20 pictures, 31 references.

Original language: Croatian.

Thesis archived at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Reviewers: Associate Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Assistant Professor Luka Perković, PhD

Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Date of defense: July 20, 2018, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
University of Zagreb

*Zahvaljujem se mentorici dr. sc. Darii Karasalihović Sedlar, izvanrednoj profesorici  
RGNF-a na pomoći pruženoj tijekom izrade ovog rada.*

*Hvala Dubravki.*

## Sadržaj

POPIS TABLICA .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS OZNAKA .....	III
1. Uvod.....	1
2. Hipoteza .....	3
3. Predviđanje proizvodnje prirodnog plina na eksploatacijskim poljima sjevernog Jadrana.....	5
4. Pregled mogućih načina prenamjene plinske infrastrukture .....	7
5. Kemijska konverzija električne energije (P2G) .....	10
5.1. Zašto P2G postrojenje na moru?.....	10
5.2. Efikasnost P2G, proizvodnja i prijenos električne energije.....	11
5.3. Proizvodnja vodika elektrolizom .....	13
5.4. Proizvodnja metana Sabatierovim procesom.....	19
5.5. Transport vodika i metana infrastrukturom za transport prirodnog plina.....	20
6. Umjetni morski greben.....	22
7. Potencijal korištenja plave energije na sjevernom Jadranu.....	24
7.1. Analiza brzine vjetra .....	24
7.2. Analiza proizvodnje električne energije vjetroelektranom .....	27
7.3. Analiza proizvodnje vodika elektrolizom.....	29
7.4. Analiza proizvodnje električne energije iz vodika.....	34
7.5. Analiza proizvodnje metana procesom metanacije .....	37
7.6. Analiza proizvodnje električne energije iz metana.....	39
8. Zaključak.....	42
9. Popis literature.....	44

## **POPIS TABLICA**

Tablica 5-1. Efikasnosti nekih P2G sustava.....	13
Tablica 5-2. Usporedba glavnih tehnologija elektrolize s AEM elektrolizom.....	18

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Shematski prikaz prenamjene plinske infrastrukture u sinergiji s elektroenergetskim sustavom sa stajališta najveće energetske učinkovitosti.....	4
Slika 3-1. Kretanje rezervi prirodnog plina na eksploatacijskim poljima sjevernog Jadrana u razdoblju od 2006. do 2017. godine.....	5
Slika 3-2. Očekivani pad proizvodnje prirodnog plina prikazan je eksponencijalnom funkcijom.....	6
Slika 4-1. Raspodjela plinskih platformi, plinovoda i eksploatacijskih polja na hrvatskom strani sjevernog Jadrana.....	9
Slika 5-1. Shematski prikaz PEM i elektrolize lužnate vodeneotopine.....	15
Slika 0-2. Shematski prikaz AEM elektrolize.....	17
Slika 0-3. Prikaz ovisnosti konverzije CO <sub>2</sub> u CH <sub>4</sub> o tlaku i temperaturi.....	19
Slika 6-1. Načini prenamjene nekorištenih platformi u umjetne morske grebene.....	22
Slika 7-1. Iznosi srednjih mjesečnih brzina vjetra. Brzine su izmijenjene prema radnom rasponu izabrane vjetroelektrane.....	25
Slika 7-2. Prikaz satne distribucije brzine vjetra u prosječnom danu. Brzine su izmijenjene prema radnom rasponu izabrane vjetroelektrane.....	26
Slika 7-3. Prikaz srednje mjesečne proizvodnje el. energije i prosjeka na godišnjoj razini...	28
Slika 7-4. Iznosi srednje satne proizvodnje el. energije i dnevnog prosjeka u prosječnom danu.....	28
Slika 7-5. Grafički prikaz zavisnosti izlaznog tlaka o prosječnoj mjesečnoj proizvodnji vodika [MWh <sub>t</sub> ].....	31
Slika 7-6. Grafički prikaz zavisnosti izlaznog tlaka o prosječnoj mjesečnoj proizvodnji vodika [tona].....	32
Slika 7-7. Grafički prikaz zavisnosti izlaznog tlaka o satnoj proizvodnji vodika [kWh <sub>t</sub> ]....	33
Slika 7-8. Grafički prikaz zavisnosti izlaznog tlaka o satnoj proizvodnji vodika [kg].....	34
Slika 7-9. Usporedba proizvodnje el. energije vjetroelektrane s kontinuiranom proizvodnjom gorive ćelije.....	36
Slika 7-10. Prikaz mjesečne proizvodnje i potrošnje tvari u procesu metanacije [tona].....	38
Slika 7-11. Prikaz satne proizvodnje i potrošnje tvari u procesu metanacije [kg].....	38
Slika 7-12. Usporedba u proizvodnji el. energije raznim tehnologijama; vjetroelektranom, gorivim ćelijama i plinskom termoelektranom [MWh <sub>e</sub> ].....	40



## POPIS OZNAKA

$A$  - površina kretanja lopatica, [ $m^2$ ]

$C_p$  - koeficijent pretvorbe, bezdimenzionalno (0,4)

$E$  – količina utrošene električne energije, [kWh]

$H$  – proizvedeni vodik, [kg]

$LHV_{H_2}$  – donja ogrjevna vrijednost vodika (33,32 kWh/kg)

$LHV_m$  – donja ogrjevna vrijednost metana (13,89 kWh/kg)

$v$  - brzina vjetra, [ $m/s$ ]

$t$  - proteklo vrijeme, [ $h$ ]

$m(H_2)$  – količina potrošenog vodika, [kg]

$m(CO_2)$  – količina potrošenog ugljičnog dioksida, [kg]

$m(CH_4)$  – količina proizvedenog metana, [kg]

$m(H_2O)$  – količina proizvedene vode, [kg]

$\eta_E$  – efikasnost procesa elektrolize, [%]

$\eta_G$  – efikasnost gorive ćelije, (60%)

$\eta_p$  – efikasnost plinske termoelektrane, (60%)

$\rho$  - gustoća zraka, [ $kg/m^3$ ] (1,23  $kg/m^3$ )

$Nm^3$  – Standardni metar kubni

el. energija – Električna energija

OIE – Obnovljivi izvori energije

## 1. Uvod

Proizvodnja prirodnog plina na poljima sjevernog Jadrana svoj vrhunac je dosegla 2010. godine i od tada je u kontinuiranom padu. Zbog stalnog povećanja troškova i smanjenja dobiti (Noujeim 2015b), naftna se industrija na Sjevernom moru i sjevernom Jadranu priprema za dekomisiju odobalne plinske infrastrukture, što je veliki izazov s financijskog i tehničkog stajališta. Prema zakonu o postupanju s objektima na otvorenom moru (United Nations 1982), nakon prestanka aktivnosti pripadajuća se infrastruktura mora odstraniti i dotegnuti na kopno (Brown 1982; Narodne Novine 2000). Ipak, nastavak korištenja postojeće infrastrukture dozvoljen je ukoliko joj se nađe neka druga legitimna svrha (United Nations 1982).

Kako bi se ispunio cilj Europske unije smanjenja emisija stakleničkih plinova od 80% do 2050. u odnosu na emitirane količine iz 1990. godine (European Commission 2011), pokrenute su intenzivne promjene u energetske sustavima zemalja članica u vidu povećanja obnovljivih izvora energije.

Hrvatski energetske sustav bilježi nagli porast proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, posebno iz energije vjetra. S druge strane, proizvodnja prirodnog plina na sjevernom Jadranu oštro opada, zbog čega se u skoroj budućnosti predviđa završetak proizvodnje. Nakon kraja financijski opravdane proizvodnje prirodnog plina, postojeća plinska infrastruktura na sjevernom Jadranu može se nastaviti koristiti u sinergiji s elektroenergetskim sustavom, odnosno odobalnom farmom vjetroelektrana. Problem obnovljivih izvora je u njihovoj ovisnosti o nepredvidivim atmosferskim uvjetima, što se odražava promjenjivom proizvodnjom električne energije koja može biti nedostatna za potrebe stvarne potrošnje. Zbog ovih problema, svaki energetske sustav sa značajnim udjelom obnovljivih izvora mora na praktičan i efikasan način riješiti problem skladištenja viškova električne energije i balansiranje sustava.

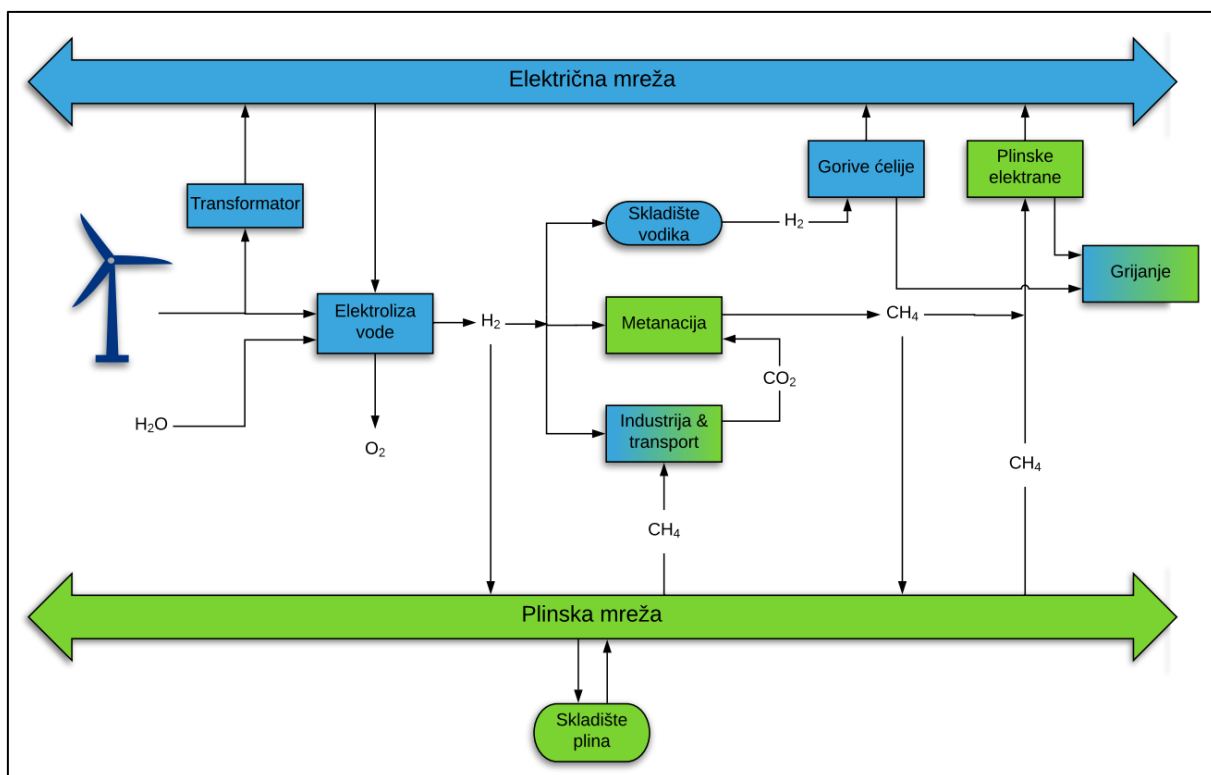
U suradnji s INA-Industrijom nafte, d.d. (INA, d.d.), s platforme „Annamaria A“ na sjevernom Jadranu prikupljeni su neobrađeni podaci o brzini vjetra u vremenskom razdoblju od dvije godine. Obradom podataka u *MS Excelu* prikazan je dnevni i mjesečni karakter brzine vjetra (vidi poglavlje 7.1.). Opisane su karakteristike proizvodnje vodika elektrolizom, metana Sabatierovom reakcijom te proizvodnja električne energije vjetroelektranom, gorivim ćelijama i plinskom termoelektranom.

U kontekstu rastućeg udjela obnovljivih izvora u proizvodnji energije i pada proizvodnje prirodnog plina, ovaj rad prikazuje mogućnosti prenamjene postojeće plinske infrastrukture na sjevernom Jadranu u sinergiji s elektroenergetskim sustavom, odnosno vjetroelektranama. Električni i plinski sektor zajedno mogu dati cjelovito rješenje balansiranja električne mreže, efikasnim skladištenjem viška električne energije, nastalim zbog povećanja udjela obnovljivih izvora (Noujeim 2015b). Takvo rješenje bi se sastojalo od postrojenja za kemijsku konverziju (*engl. Power-to-Gas, P2G*), skladišnih kapaciteta za proizvedeni plin na kopnu ili u iscrpljenim plinskim ležištima sjevernog Jadrana te proizvodnje električne energije iz kemijske energije (*engl. Gas-to-Power, G2P*) pomoću tehnologije gorivih ćelija ili termoelektrane na plin.

## 2. Hipoteza

Odstranjivanje plinske infrastrukture predstavlja značajan tehnički i financijski problem te negativno utječe na stanište morskih organizama na lokaciji. Hipoteza ovog rada je da se po kraju financijski opravdane eksploatacije prirodnog plina na poljima sjevernog Jadrana prenamjenom postojeće plinske infrastrukture može postići pozitivan utjecaj na gospodarstvo, bioraznolikost Jadrana, energetske sigurnost i smanjenje ugljične intenzivnosti energetskega sektora.

Farme odobalnih vjetroelektrana mogu proizvoditi velike količine električne energije, a povezivanjem s bivšim plinskim platformama opremljenima tehnologijom kemijske konverzije (*engl. Power-to-Gas, P2G*), rješava se problem balansiranja energetskega sustava, odnosno uskladištenja viška električne energije u obliku vodika ili metana. Tako je moguće riješiti najveći problem obnovljivih izvora energije i omogućiti značajnu izgradnju njihovih kapaciteta. Optimalno rješenje, sa stajališta energetske učinkovitosti, je opremiti platforme s visokonaponskim transformatorima i sustavom za konverziju električne u kemijsku energiju. Na taj se način omogućuje transport električne energije dalekovodima do kopna kada se proizvodnja poklapa s potrošnjom i njena konverzija i skladištenje u obliku kemijske energije (metan ili vodik) kada se električna energija proizvodi, ali se ne može potrošiti unutar mreže. Postoji mnogo mogućnosti prenamjene plinske infrastrukture u sinergiji s elektroenergetskim sustavom. Slika 2-1. prikazuje optimalno rješenje sa stajališta energetske učinkovitosti.

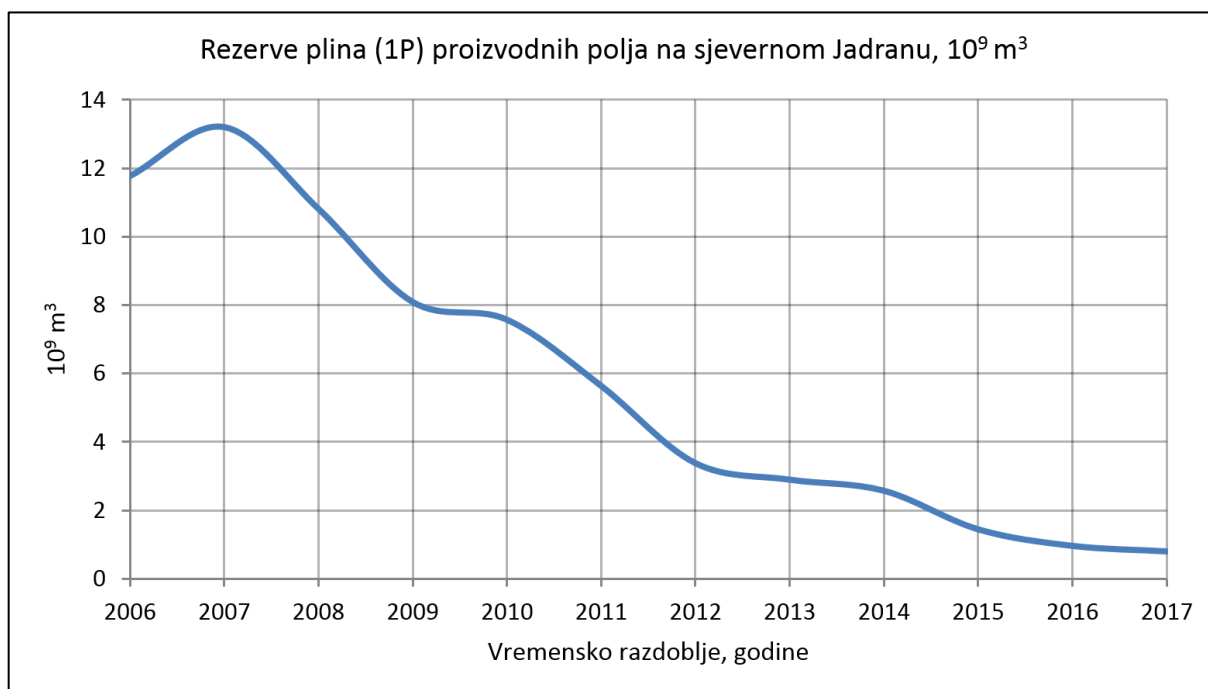


Slika 2-1. Shematski prikaz prenamjene plinske infrastrukture u sinergiji s elektroenergetskim sustavom sa stajališta energetske učinkovitosti (Klabučar i Aščić 2018).

### 3. Predviđanje proizvodnje prirodnog plina na eksploatacijskim poljima sjevernog Jadrana

Eksploatacija prirodnog plina na sjevernom Jadranu počela je 1998. godine, te se trenutno provodi na tri eksploatacijska polja iz 51 proizvodne bušotine spojene na 19 platformi i jednu kompresorsku stanicu. Maksimum proizvodnje dosegnut je 2010. godine s proizvodnjom od  $1,3 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/god, a 2007. godine je zabilježen vrhunac dokazanih rezervi (1P) od  $12,85 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, koje su od onda u oštrom padu. Godišnja izvješća kompanije INA-Industrija nafte, d.d. (INA, d.d.) korištena su kao izvor za podatke o rezervama i proizvodnji (INA-Industrija nafte 2006-2017).

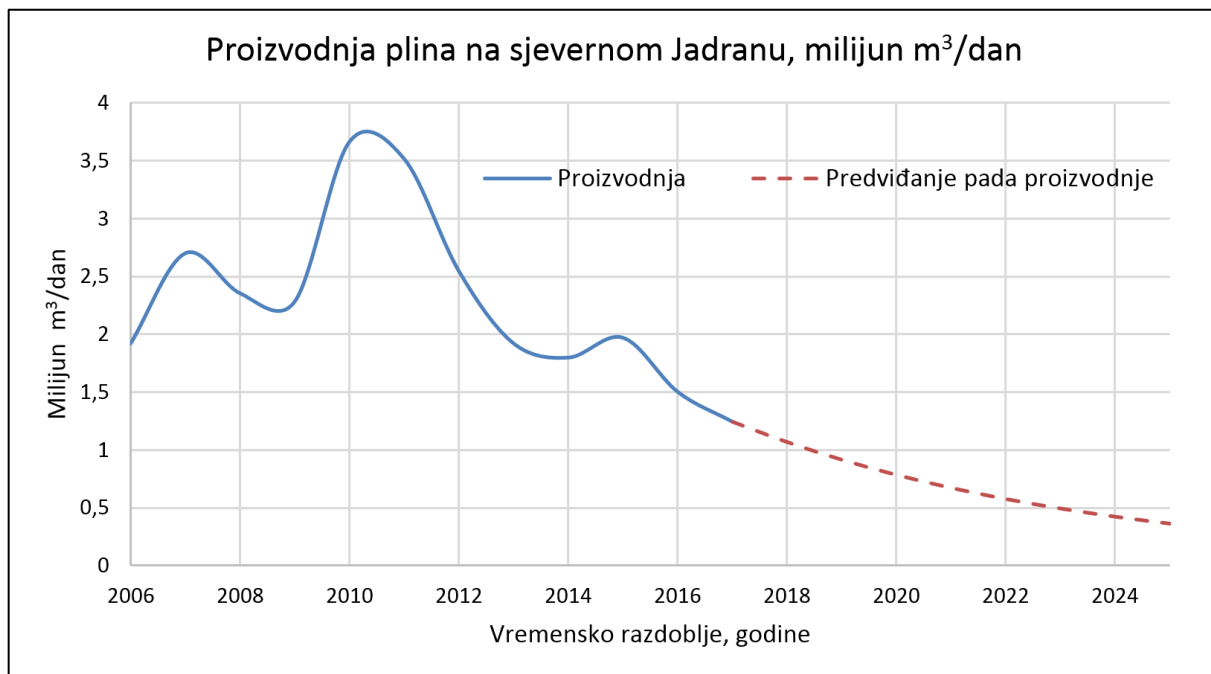
Slike 3-1. i 3-2. prikazuju oštar pad rezervi i proizvodnje prirodnog plina. Opadanje ležišnog tlaka i konusiranje vode u ležištu u proteklih je nekoliko godina uzrokovalo povećanu proizvodnju vode. Prisustvo vode mijenja relativnu propusnost pojedinih faza u ležištu te sprječava pridobivanje prirodnog plina iz zavodnjenih bušotina.



Slika 3-1. Kretanje rezervi prirodnog plina na eksploatacijskim poljima sjevernog Jadrana u razdoblju od 2006. do 2017. godine

Ukoliko se ne provedu radnje kojima je za cilj povećanje pridobivih količina plina, kao što su privođenje novih plinskih ležišta proizvodnji (npr. polje *Irena*) ili izrada bušotina

u nezavodnjeni dio ležišta, pad proizvodnje prirodnog plina će se nastaviti te će uskoro postati financijski neisplativa. Očekivani pad i kraj financijski opravdane proizvodnje oko 2024. godine prikazan je na slici 3-2.



Slika 3-2. Očekivani pad proizvodnje prirodnog plina prikazan je eksponencijalnom funkcijom

Predviđanje kretanja buduće proizvodnje opisano je krivuljom dobivenom prilagodbom eksponencijalne funkcije proizvedenim količinama prirodnog plina u periodu pada od 2010. do 2017. godine. Analiza krivulje pada i proračun buduće proizvodnje napravljeni su pomoću softverskog paketa *MBAL*. Prognoza podrazumijeva neprovođenje radova kojima bi se povećao iscrpak i trenutne rezerve, odnosno neprivođenje novih polja proizvodnji. Utjecaj proizvodnje vode i pada tlaka na pojedinim bušotinama nisu razmatrani u prikazanoj analizi, te stoga ova analiza predstavlja grubu procjenu vremenskog razdoblja u kojem se može očekivati završetak financijski opravdane proizvodnje prirodnog plina na poljima sjevernog Jadrana.

Svrha ovog predviđanja nije odrediti egzaktnu godinu završetka proizvodnje, već prikazati trend koji ukazuje na brzi završetak proizvodnje prirodnog plina na eksploatacijskim poljima sjevernog Jadrana ukoliko se ne krene s radovima koji bi za cilj imali obnovu rezervi i povećanje pridobivih količina ugljikovodika.

## 4. Pregled mogućih načina prenamjene plinske infrastrukture

Kompanije INA-Industrija nafte, d.d. i INAgip, d.o.o. se trebaju pripremiti za situaciju u kojoj će eksploatacija prirodnog plina na sjevernom Jadranu prestati biti profitabilna. Takva situacija će zahtijevati nedvosmisleno i brzo djelovanje jer ukoliko infrastruktura aktivno ne služi svrsi, mora se ukloniti u kratkom roku. Aktivnosti vezane uz dekomisiju moraju biti unaprijed poznate i prihvaćene.

Sljedeće aktivnosti su moguće u slučaju nastavka korištenja odobalne plinske infrastrukture:

### 1) **Proizvodnja električne energije**

Farma odobalnih vjetroelektrana mogu se izgraditi u blizini plinskih polja te se priključiti na plinske platforme na kojima su instalirani transformatori koji pomoću visokonaponskih dalekovoda transportiraju električnu energiju do obale.

### 2) **Proizvodnja vodika**

Korištenjem električne energije koju proizvodi farma odobalnih vjetroelektrana na platformama je moguća proizvodnja vodika procesom elektrolize vode.

### 3) **Proizvodnja električne energije i vodika**

Spoj prve i druge opcije. Ova opcija podrazumijeva izgradnju vjetroelektrane, transformatorske jedinice, dalekovoda i procesnog postrojenja za elektrolizu. Električna se energija dalekovodima i transformatorima transportira do kopna u trenucima kada postoje proizvodnja i potrošnja. Kada se proizvode viškovi koje potrošači ne mogu potrošiti, el. energiju je moguće kemijskom konverzijom prevesti u vodik, transportirati cjevovodima do kopna ili skladištiti u bivšim ležištima plina.

### 4) **Proizvodnja sintetskog prirodnog plina**

Metan (*engl. synthetic natural gas, SNG*) je moguće proizvesti Sabatierovom reakcijom pomoću ugljikovog dioksida i vodika u egzotermnoj reakciji. Ova tehnološka opcija iziskuje dobavu ugljikovog dioksida, izgradnju vjetroelektrane te procesne jedinice za elektrolizu i metanaciju.

### 5) **Skladištenje plina u starim plinskim ležištima**

Iskorištena ležišta mogu se prenamijeniti u sezonska plinska skladišta. Većina potrebne infrastrukture već postoji što značajno smanjuje kapitalna ulaganja.

### 6) **Umjetni morski greben**

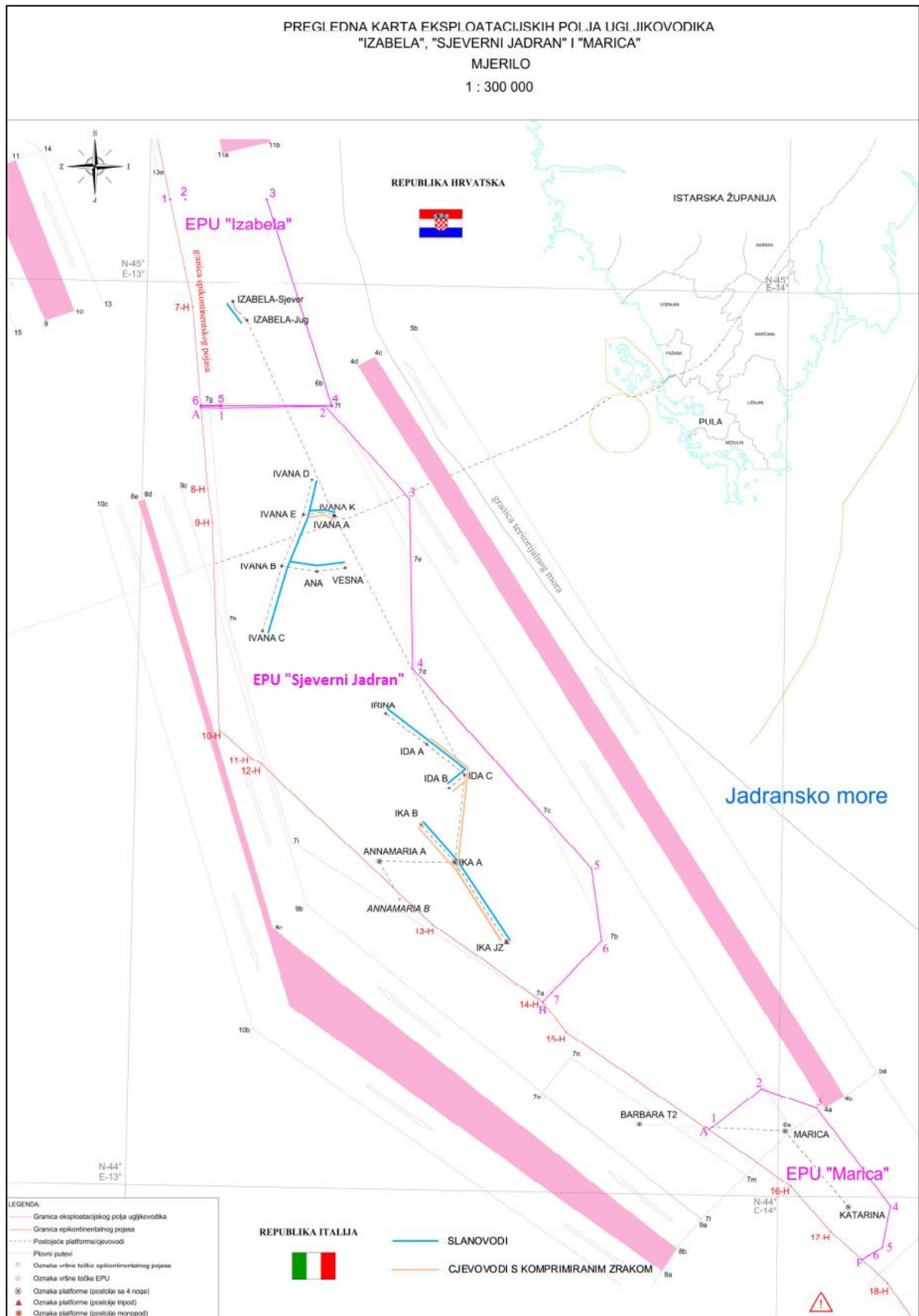


Stare naftne i plinske platforme se prenamijenjuju u umjetne morske grebene (*engl. Rigs-to-Reef*). Na taj bi se način platforme u preinačenoj formi ostavile na lokaciji, izbjegla bi se većina troškova vezana uz potpuno uklanjanje, a platforme bi nastavile osiguravati stanište morskoj flori i fauni na otvorenom moru.

#### **7) Potpuna dekomisija**

Plinske platforme, pripadajući cjevovodi i ostala oprema je uklonjena i odložena na kopnu.

Po završetku financijski opravdane eksploatacije prirodnog plina, sjeverni Jadran može postati energetska centar za proizvodnju plave energije i ispunjavanje ključne uloge u balansiranju elektroenergetskog sustava implementacijom tehnologija kemijske konverzije (*engl. Power-to-Gas, P2G*) na bivšim plinskim platformama. Postojeće instalacije se mogu prenamijeniti na niz načina kojima će Republika Hrvatska povećati energetska neovisnost i sigurnost. Zbog pogodnih uvjeta sjevernog Jadrana za konverziju viška električne u kemijsku energiju, moguća je izgradnja značajnog proizvodnog kapaciteta vjetroelektrana, što bi za elektroenergetski sustav značilo povećanu stabilnost i fleksibilnost u podmirivanju domaćih potreba i izvoza energije. Plinske platforme povezane su razgranatom mrežom cjevovoda, što dopušta prilagodljivost u postavljanju procesnih jedinica za elektrolizu ili metanaciju te skladištenja proizvedenog plina u ležištu ili njegovog transporta do obale. Razmještaj cjevovoda i platformi na sjevernom Jadranu prikazan je na slici 4-1.



Slika 4-1. Razmještaj plinskih platformi, plinovoda i eksploatacijskih polja na hrvatskoj strani sjevernog Jadrana. Modificirano iz: INA-Industrija nafte 2018. (Klabučar i Ašćić 2018)

## 5. Kemijska konverzija električne energije (P2G)

### 5.1. Zašto P2G postrojenje na moru?

Noujeim (2015a) razmotrio je sljedeće pitanje: zašto izgraditi sustav za konverziju električne u kemijsku energiju (*engl. Power-to-Gas, P2G*) na odobalnim postrojenjima kada je jeftinije i tehnološki jednostavnije izgraditi ga na kopnu? Doista, kada bi svrha gradnje ovakvih sustava bila samo povećati otpornost energetskeg sustava na neočekivane disbalanse, njihova izgradnja na moru ne bi imala smisla. Ipak, postoji niz argumenata zbog kojih je racionalno razmotriti instalaciju takvih procesnih jedinica na plinskim poljima sjevernog Jadrana. Neki od njih su:

- Odlaganje dekomisije plinske infrastrukture samo će od sebe stvarati financijsku vrijednost zbog diskontiranja vrijednosti novca koji je pripremljen za plaćanje dekomisije, a ne mora se potrošiti sada već u nekom trenutku u budućnosti. Financijska dobit ostvarena diskontiranjem može se pokazati dostatnom da sama od sebe presudi u korist izgradnje na moru.
- Proizvedeni plinovi ili tekućine mogu se transportirati do kopna postojećom mrežom cjevovoda i plinovoda.
- Zbog potencijalnog rizika po zdravlje, eksplozije i rasprostranjenog NIMBY (*engl. Not In My Back Yard*) stajališta javnosti, javno mnijenje je primarna prepreka svakoj većoj energetskeg aktivnosti. Ova se prepreka može djelomično ili u cijelosti eliminirati ukoliko su procesne jedinice instalirane na odobalnoj lokaciji.
- Za izgradnju vjetroelektrana na kopnu potrebna je velika površina. Javno prihvaćanje projekta i koncesija nad prostorom je vjerojatnija ukoliko su elektrane stacionirane na odobalnoj lokaciji.
- Plinska polja sjevernog Jadrana poželjno je istražiti s ciljem procjene skladišnog potencijala za plin. Ekonomičnost cjelokupnog projekta će se povećati ukoliko se takvo skladištenje pokaže prihvatljivim.

Iako je financijski povoljnije izgraditi procesna postrojenja kemijske konverzije na kopnu, lokacije na moru posjeduju niz inherentnih prednosti koje se trebaju razmotriti tijekom donošenja odluke o smjeru u kojem će se kretati projekt prenamjene odobalne plinske infrastrukture (Noujeim 2015a).

## 5.2. Efikasnost P2G, proizvodnja i prijenos električne energije

Dio budućih potreba za električnom energijom može se zadovoljiti iz obnovljivog izvora energije vjetra izgradnjom odobalnih vjetroelektrana. Uzevši u obzir radni raspon vjetroelektrana od 10,8 km/h do 90 km/h, vjetar na moru je ekonomski najisplativiji oblik plave energije te ga karakterizira veća brzina i konzistentnost od onoga na kopnu (Astariz et al., 2015).

U kontekstu pada proizvodnje prirodnog plina, ovaj rad analizira potencijal kojeg bi imale odobalne vjetroelektrane u neposrednoj blizini hrvatskih eksploatacijskih plinskih platformi na sjevernom Jadranu. Električna energija proizvedena vjetroelektranama, ovisno o izabranom načinu dekomisije, može se u potpunosti ili djelomično konvertirati u kemijsku energiju (*engl. Power-to-Gas, P2G*) i, kao takva (u obliku metana ili vodika) transportirati cijevovodima do kopna ili uskladištiti u iscrpljenim plinskim ležištima na moru ili posebno izgrađenim skladištima za plin. Također, električna se energija može direktno transportirati na kopno. Proizvedena električna energija se u potpunosti može transportirati na kopno ukoliko se izgrade pripadni dalekovodi i transformatori na platformama koji će transformirati električnu energiju u izmjeničnu (*engl. High Voltage Alternating Current, HVAC*) ili istosmjernu struju (*engl. High Voltage Direct Current, HVDC*) visokog napona (npr. platforma Borkum 2 na Sjevernom moru). Isto tako, postoji mogućnost ujedinjenja opcija transporta dalekovodima i kemijske konverzije. Takva opcija pretpostavlja izgradnju procesnih jedinica na platformama koje su sposobne transformirati električnu u kemijsku energiju, procesima koji su detaljnije opisani poglavljima 5.3. i 5.4., i platforme spojene s podvodnim dalekovodima i instaliranim transformatorima koji omogućavaju direktan transport električne energije od obale do kopna. Kada se potrošnja električne energije na kopnu podudara s proizvodnjom vjetroelektrana, el. energija se transportira na kopno kao visokonaponska struja. Kada se pak proizvodi el. energija, ali se ne poklapa s potrošnjom, nastaje višak el. energije koji se procesom kemijske konverzije prevodi u kemijsku energiju (*engl. Power-to-Gas, P2G*), te se u formi plina skladišti u plinskim skladištima ili transportira do obale.

Opremanje platformi samo kemijskim konverzijskim jedinicama pokazuje prednost u potpunom korištenju postojeće plinske infrastrukture, čime skladištenje viška električne energije postaje ostvarivo te plan gradnje značajnih kapaciteta obnovljivih izvora postaje

tehnološki izvediv. Mana ove tehnološke opcije je razina energetske učinkovitosti, koja je zbog velikog broja energetske transformacije relativno niska.

Prednost instaliranja transformatora na platforme je visoka energetska učinkovitost. Nedostaci su ograničena upotreba platformi i pripadajućih plinskih sustava, trošak gradnje dalekovoda i nesposobnost skladištenja viška električne energije – što za sobom povlači nemoguću instalaciju značajnih kapaciteta vjetroelektrana.

Opremanje platformi kemijskim konverzijskim jedinicama i transformatorima predstavlja najskuplju i najkompliciraniju opciju. Njena prednost je potpuno korištenje postojeće plinske infrastrukture, otvaranje mogućnosti instalacije velikog kapaciteta obnovljivih izvora, optimalno iskorištavanje električne energije proizvedene iz vjetroelektrana, značajno poboljšanje sigurnosti energetske opskrbe i skladištenje viškova električne energije.

Svaki proces teži što manjem broju energetske transformacije zbog smanjivanja gubitaka odnosno, povećanja učinkovitosti, a time i ekonomičnosti. Na efikasnost, osim tehnologije i broja transformacije, značajno utječe i korištenje otpadne topline i predviđen tlak izlaznog plina. Tablica 5-1. prikazuje energetske efikasnosti nekih P2G sustava obzirom na rubne uvjete.

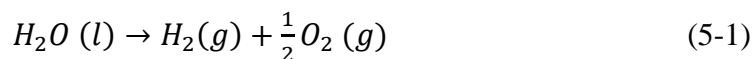
Tablica 5-1. Efikasnosti nekih P2G sustava (Sterner et al., 2011; Noujeim 2015a).

Proces	Efikasnost [%]	Rubni uvjeti
<b><i>Električna u kemijsku energiju</i></b>		
El. energija → Vodik	54-72	Stlačivanje na 20 MPa (utiskivanje u ležište)
El. energija → Metan (SNG)	49-64	
El. energija → Vodik	57-73	Stlačivanje na 8 MPa (predaja u plinovod)
El. energija → Metan (SNG)	50-64	
El. energija → Vodik	64-77	Bez stlačivanja
El. energija → Metan (SNG)	51-65	
<b><i>Električna u kemijsku pa u električnu energiju</i></b>		
El. energija → Vodik → El. energija	34-44	Efikasnost konverzije: 60%, stlačivanje na 8 MPa
El. energija → Metan → El. energija	30-38	
<b><i>Električna energija u kogeneraciji (CHP)</i></b>		
El. energija → Vodik → CHP	48-62	40% električna i 45% toplinska energija, stlačivanje na 8 MPa
El. energija → Metan → CHP	43-54	

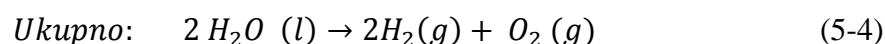
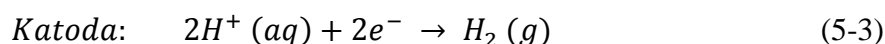
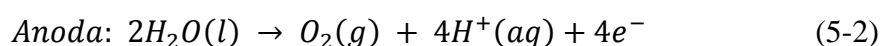
Efikasnost pojedinog procesa nije jedini čimbenik kod odabira tehnologije. Za najbolji odabir, uz efikasnost, potrebno je procijeniti prihvaćenost pojedine tehnologije od strane široke zajednice kao i sve ekonomske i tehnološke faktore (Noujeim 2015a).

### 5.3. Proizvodnja vodika elektrolizom

Elektroliza vode je prvi put provedena od strane William Nicholson i Johann Wilhelm Ritter 1800. godine. Radi se o postupku koji koristi rad istosmjernje električne struje kako bi se voda razložila na temeljne elemente kisik (O<sub>2</sub>) i vodik (H<sub>2</sub>).



Minimalni teoretski napon koji je potreban za proces elektrolize vode pri standardnim uvjetima je 1,23V, no u praksi se pokazalo da je 1,48V najmanja vrijednost napona pri kojem se događa proces elektrolize. Prenapon (*engl. overpotential*) predstavlja razliku u teoretskom i stvarnom potencijalu koji je potreban za izlučivanje tvari na elektrodama u stvarnim uvjetima. Prenapon označava povećanu potrošnju energije elektrolize u realnim uvjetima u odnosu na teoretski slučaj te ovisi o tlaku, temperaturi, materijalu elektrode i gustoći struje. Upotrebom elektroda izrađenih od plemenitih metala kao što su platina (Pt) i zlato (Au) te provođenjem procesa u uvjetima niskog tlaka, povišene temperature i korištenjem niske gustoće struje umanjuje se vrijednost prenapona i posljedično povećava efikasnost samog procesa (Sveshnikova 2015; Klabučar i Aščić 2018). Oksidacija kisika na anodi i redukcija vodika na katodi predstavlja cjelovitu reakciju elektrolize vode:



Efikasnost napona (*engl. voltage efficiency*) je najmanja vrijednost napona pri kojem dolazi do elektrolize u eksperimentalnim uvjetima (1,48V) podijeljena sa stvarnim naponom elektrolize u nekom procesu. Efikasnost napona pokazuje koliki je gubitak energije uzrokovan prenaponom (Harrison et al., 2010; Klabučar i Aščić 2018).

$$\text{Efikasnost napona} = \frac{1,48\text{V}}{\text{stvarni napon elektrolize}} [\%] \quad (5-5)$$

Električnu efikasnost (*engl. electrical efficiency*) predstavlja ogrjevna vrijednost proizvedenog vodika podijeljena s iznosom potrošene električne energije tijekom procesa elektrolize (Harrison et al., 2010).

$$\text{Električna efikasnost} = \frac{\text{Ogrjevna vrijednost proizvedenog vodika}}{\text{potrošena električna energija}} [\%] \quad (5-6)$$

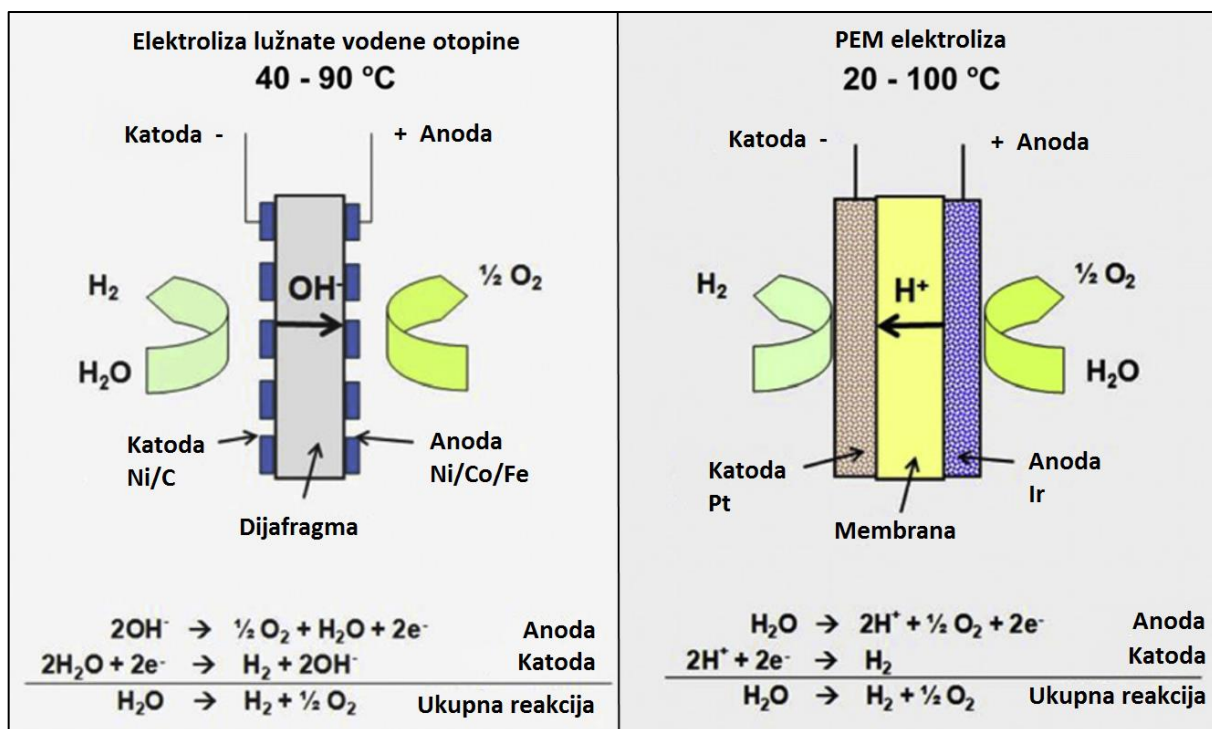
Alternativni način kojim se često opisuje efikasnost elektrolize je kilovatsat po standardnom metru kubnom proizvedenog vodika (kWh/Nm<sup>3</sup>). Komercijalni uređaji

trenutno posjeduju efikasnost od 4-6 kWh/Nm<sup>3</sup>, dok bi se u idealnim uvjetima električne efikasnosti od 100% proizvodilo 2,79 kWh/Nm<sup>3</sup>.

### Metode elektrolize vode:

#### 1) Elektroliza lužnate vodene otopine (*engl. alkaline electrolysis*)

Ova tehnološka opcija predstavlja najstariji i najčešći način proizvodnje vodika u komercijalnim namjenama. Između elektroda je postavljena polupropusna membrana koja djelomice sprječava miješanje stvorenih plinova te omogućuje prolazak hidroksidnim ionima ( $OH^-$ ) i molekulama vode. Elektroliza se provodi u lužnatoj vodnoj otopini pri atmosferskim uvjetima i temperaturi otopine u rasponu od 40 do 90 °C. Elektroliza lužnate vodene otopine shematski je prikazana na slici 5-1 (Carmo et al., 2013; Klabučar i Aščić 2018).



Slika 5-1. Shematski prikaz PEM i elektrolize lužnate vodene otopine (modificirano iz izvora Carmo et al., 2013)

Ograničenja ovog načina elektrolize su niska gustoća struje pri kojoj je proces profitabilan, nužnost atmosferskog radnog tlaka i neupotrebljivost pri promjenjivom



opterećenju. Proces nije moguć kod varijabilnog opterećenja zbog povećanog miješanja proizvedenih plinova, koje kod niskih opterećenja može rezultirati stvaranjem eksplozivne atmosfere. Kako je područje interesa ovog rada električna energija iz obnovljivih izvora čiju proizvodnju karakterizira nepredvidivost, promjenjivost i isprekidanost, sposobnost rada elektrolizera pri promjenjivom opterećenju je uvjet koji se mora ispuniti. U ovom radu, sukladno tome, neće se daljnje razmatrati elektroliza lužnate vodene otopine (Chakik et al., 2017; Carmo et al., 2013; Klabučar i Aščić 2018).

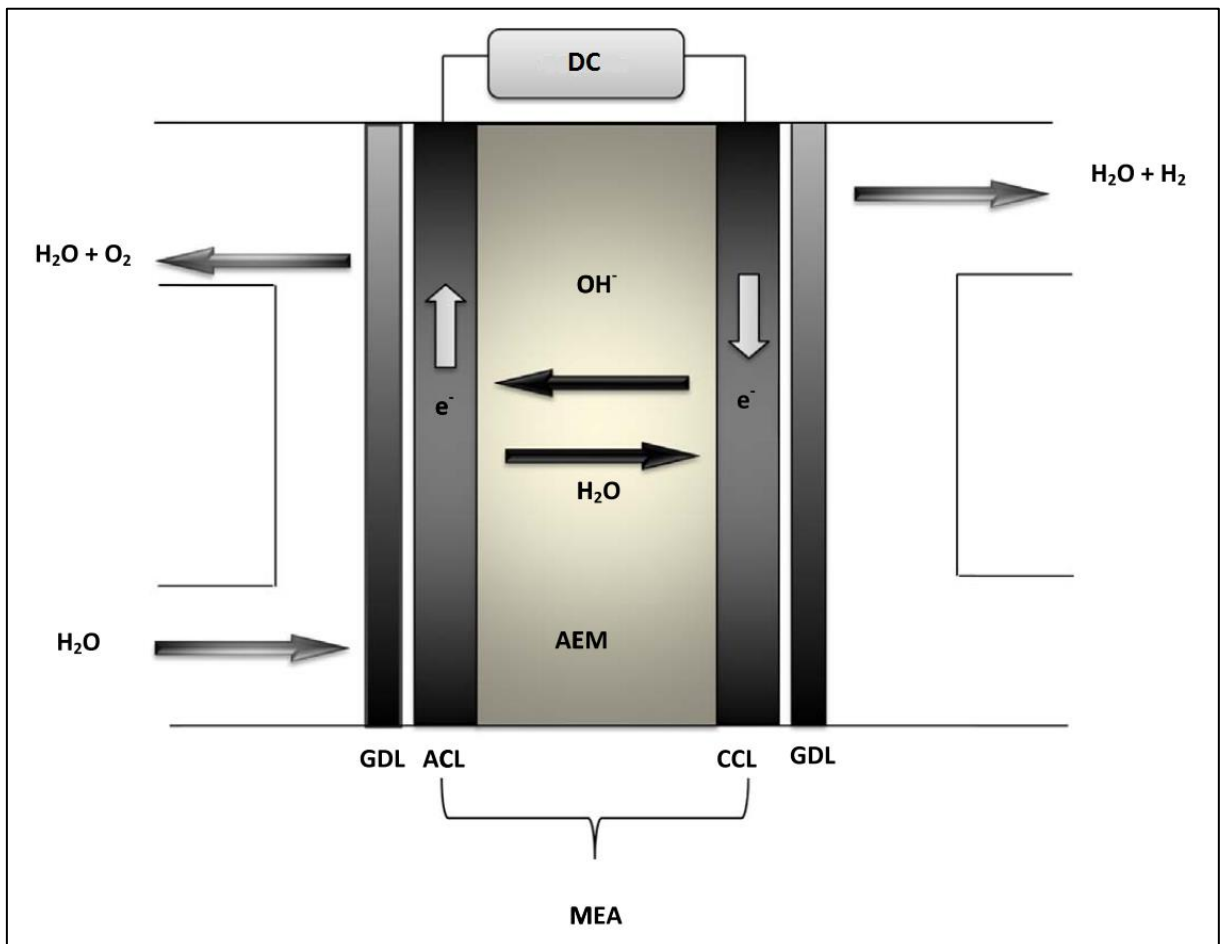
## 2) Elektroliza protonski propusnom membranom (*engl. PEM electrolysis*)

Proces elektrolize pomoću PEM (*engl. Proton Exchange Membrane*) elektrolizera obilježava dobra vodljivost električne energije i kationa vodika ( $H^+$ ). PEM elektrolizer može raditi pri visokoj gustoći električne struje čime se uvelike smanjuju troškovi tijekom proizvodnje vodika. Efikasno odvajanje proizvedenih plinova pomoću proton-propusne membrane ne dozvoljava njihovo miješanje, što dopušta rad u uvjetima varijabilnog opterećenja u iznosu od 10-100% snage elektrolizera, omogućuje proizvodnju plinova visoke čistoće i povećava sigurnost samog procesa. Korištenjem PEM membrane omogućena je konstrukcija elektrolizera kompaktnog dizajna i maksimalni radni tlak od 35 MPa. Mogućnost rada pri visokom tlaku znači da je i izlazni proizvedeni plin pod visokim tlakom, što je prednost jer se ne moraju koristiti kompresori. Mana pri radu s radnim tlakom višim od 10 MPa je neophodna upotreba debljih membrana, čime se smanjuje ekonomičnost projekta. PEM elektroliza se provodi u ekstremnim uvjetima kao što su velika gustoća električne struje, niska pH vrijednost ( $pH \sim 2$ ), temperature u rasponu od 20 °C - 100°C i visoki tlak. Takvi uvjeti pospješuju razvoj korozije zbog čega je nužna upotreba materijala otpornih na koroziju. Materijali sa sposobnošću dugotrajnog izlaganja tako ekstremnim uvjetima (bez oštećenja) su rijetki i skupi, kao što su zlato (Au), platina (Pt), iridij (Ir) i rutenij (Ru). Shematski prikaz PEM elektrolizera dan je na slici 5-1 (Chakik et al., 2017; Carmo et al., 2013; Klabučar i Aščić 2018).

## 3) Elektroliza anionski propusnom membranom (*engl. AEM Electrolysis*)

S AEM (*engl. Anion Exchange Membrane*) elektrolizerom moguća je proizvodnja vodika s učinkovitošću PEM-a i malim troškovima elektrolize lužnate vodene otopine. Konceptija elektrolizera nalikuje onoj korištenoj u PEM procesu uz razliku u primijenjenoj membrani koja provodi anione te je izrađena od metala koji nisu plemeniti, što čini njihovu cijenu znatno prihvatljivijom. Shematski prikaz AEM elektrolizera dan je na slici 5-2. Niska

cijena procesne jedinice, visoki radni tlak, mogućnost rada pri varijabilnom opterećenju i visoka čistoća proizvedenih plinova čini AEM tehnologiju zanimljivom za komercijalnu upotrebu. Ipak, AEM tehnologija elektrolize je još u začecima te se mora poboljšati učinkovitost, pojednostaviti rukovanje i povećati stabilnost membrane kako bi postala prihvatljivo rješenje za komercijalne primjene (Vincent i Bessarabov 2018; Klabučar i Aščić 2018).



Slika 5-2. Shematski prikaz AEM elektrolize (Vincent i Bessarabov 2018)

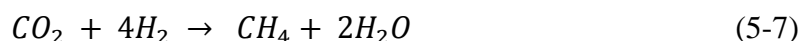
Značenje kratica na slici 5-2. GDL: sloj za difuziju plina (*engl. Gas Diffusion Layer*), ACL: sloj katalizatora na anodi (*engl. Anode Catalyst Layer*), CCL: sloj katalizatora na katodi (*engl. Cathode Catalyst Layer*), MEA: membransko-elektrodni sklop (*engl. Membrane Electrode Assembly*), DC: izvor istosmjerne struje (*engl. direct current*).

Tablica 5-1. Usporedba glavnih tehnologija elektrolize s AEM elektrolizom (Vincent i Bessarabov 2018).

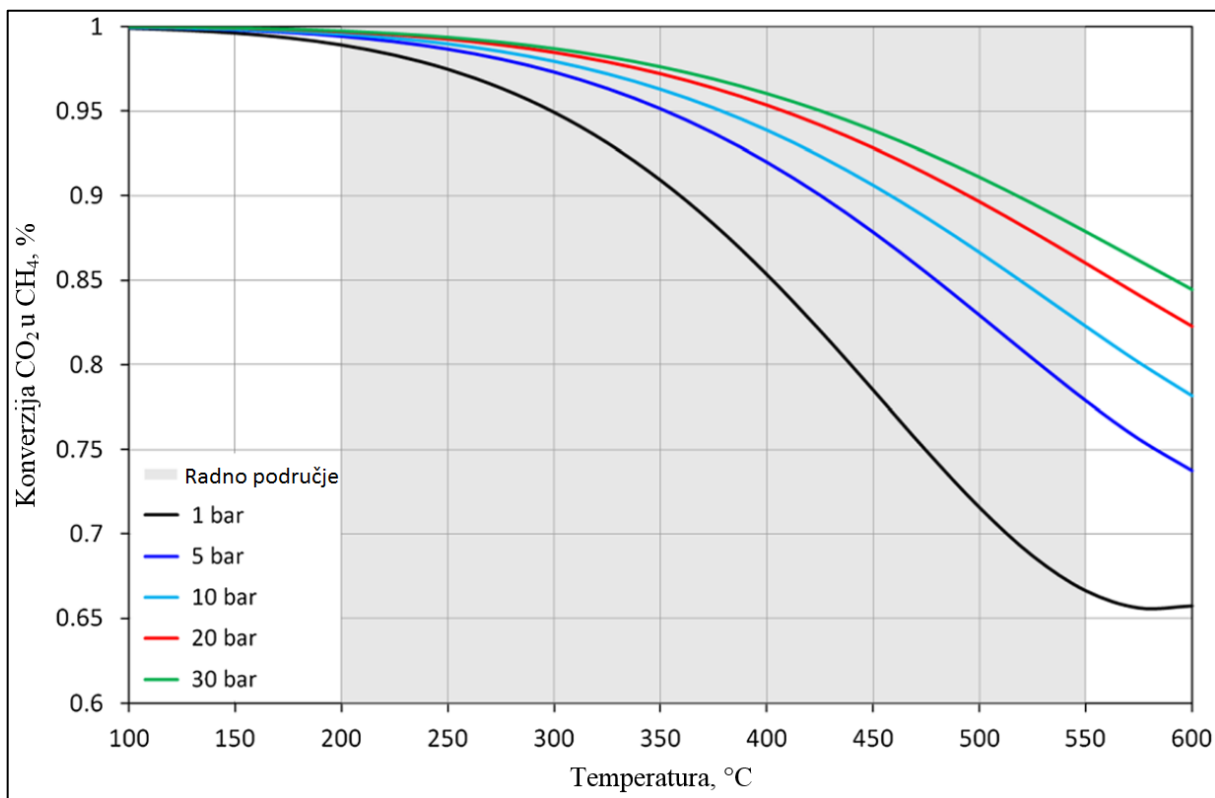
	<b>Lužnata vodena otopina</b>	<b>PEM</b>	<b>AEM</b>
<i>Elektrolit</i>	20-30% KOH	PFSA	QAPS
<i>Nosilac naboja</i>	$OH^-$	$H^+$	$OH^-$
<i>Radna temperatura (°C)</i>	65 - 100	70 - 90	50 - 70
<i>Tlak izlaza H<sub>2</sub> (MPa)</i>	2,5 - 3	3 - 8	~3
<i>Membrana</i>	Azbest, PAM, ZrO <sub>2</sub> – PPS, NiO, SbO <sub>5</sub> – PS	PFSA (npr. Nafion)	QAPS (npr. A-201)
<i>OER katalizator</i>	NiCoO <sub>4</sub> , La – Sr – CoO <sub>3</sub> , Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Ir/Ru oksid	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
<i>HER katalizator</i>	Ni	Pt	CeO <sub>2</sub> – La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Ni	Ti	Ni
<i>Poklopac ćelije</i>	Metalni	Sintetička guma ili flour-elastomer	Sintetička guma ili flour-elastomer
<i>Reakcija na anodi</i>	$2OH^- \rightarrow H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$	$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$	$2OH^- \rightarrow H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$
<i>Reakcija na katodi</i>	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$
<i>Gustoća struje (mA/cm<sup>2</sup>)</i>	200 - 500	800 - 2500	200 -500
<i>Radni vijek (h)</i>	100 000	50 000 – 100 000	N/A
<i>Čistoća vodika (vol%)</i>	9,99 – 99,3	99,9999	99,99
<i>Električna efikasnost</i>	50 – 70,8	48,5 – 65,5	39,7
<i>Demonstrirana proizvodnja (Nm<sup>3</sup>/h)</i>	1 – 760	0,265 – 30	0,25 – 1
<i>Potrošnja energije (kWh/Nm<sup>3</sup>)</i>	4,5 – 7,5	5,8 – 7,3	4,8 – 5,2
<i>Demonstrirana snaga (kW)</i>	2,8 – 3534	1,8 – 174	1,3 – 4,8
<i>Cijena sustava (€/kg)</i>	800 – 1300	1200 – 2000	N/A
<i>Stanje tehnologije</i>	Zrelo	Spremno za malu proizvodnju	Istraživanja u tijeku

## 5.4. Proizvodnja metana Sabatierovim procesom

Paul Sabatier otkrio je 1902. kemijsku reakciju metanacije koja se njemu u čast naziva Sabatierov proces. Metanacija je reakcija vodika ( $H_2$ ) i ugljikovog dioksida ( $CO_2$ ) pri povišenom tlaku i temperaturi u prisustvu katalizatora, pri čemu nastaju voda ( $H_2O$ ) i metan ( $CH_4$ ). Reakcija je egzotermna, ne podnosi često pokretanje i zaustavljanje, a metali koji se koriste kao katalizatori su nikal, rutenij i rodij.



Sabatierov proces je dobro poznat i industrijski prihvaćen. Koristi se u proizvodnji sintetičnog prirodnog plina (*engl. Synthetic Natural Gas, SNG*) iz ugljena i biomase kao i u pročišćavanju izlaznih plinova u kemijskoj i petrokemijskoj industriji. Iako je metanacija tehnološki zrela u ovim poljima, njena primjena u sklopu *Power-to-Gas* tehnologije zahtjeva dodatnu optimizaciju. Korištenje metanacije u sklopu odobalnog P2G koncepta podrazumijeva prilagodbu na prostorno ograničenje, stlačivanje ulaznog vodika i ugljikovog dioksida te njihovo skladištenje, čime se omogućuje kontinuirano provođenje kemijske reakcije.



Slika 5-3. Prikaz ovisnosti konverzije  $CO_2$  u  $CH_4$  o tlaku i temperaturi (Schaaf et al., 2014).

Idealni termodinamički uvjeti provođenja Sabatierovog procesa su visoki tlakovi i niske temperature. Sama reakcija stvara veliku količinu topline koja mora biti uklonjena. Slika 5-3 prikazuje odnose tlaka, temperature i konvertiranog ugljikovog dioksida.

Jedno od rješenja problema nepoželjnog zagrijavanja je korištenje otpadne topline u procesu desalinizacije morske vode koja se u demineraliziranom obliku koristi u procesu elektrolize pri proizvodnji vodika. Na ovaj se način povećava učinkovitost cijelog *Power-to-Gas* procesa, pospješuje se konverziju ugljikovog dioksida u metan te smanjuje trošak proizvodnje vodika proces elektrolize.

Izazov pri primjeni procesa metanacije na odobalnim postrojenjima je dobava ugljikovog dioksida, čija separacija iz izlaznih industrijskih plinova i doprema na željenu lokaciju predstavlja značajan tehnološki problem i financijski trošak.

## **5.5. Transport vodika i metana infrastrukturom za transport prirodnog plina**

Postojeći cjevovodi za prirodni plin koristili bi se za transport plinova proizvedenih procesom kemijske konverzije u energetskej transformaciji *Power-to-Gas*. U ovom radu razmatrane su opcije kemijske konverzije električne energije u vodik i metan (*engl. Synthetic Natural Gas, SNG*) te se u nastavku razmatra mogućnost njihovog transporta postojećom plinskom infrastrukturom.

Plinovodi sjevernog Jadrana su namijenjeni transportu prirodnog plina, čija je glavna komponenta metan. Transport metana, proizvedenog u procesu kemijske konverzije, nije problematičan jer je postojeći transportni sustav namijenjen upravo njemu. Cjelokupne količine proizvedenog SNG-ja procesom metanacije moguće je utisnuti u transportni sustav. S druge strane, molekula vodika ima tri i pol puta manji radijus od molekule metana, što čini transport vodika postojećim sustavom problematičnim. Kako bi se transport vodika cjevovodima namijenjenima prirodnom plinu učinio prihvatljivim, vodik je potrebno miješati s metanom čime se smanjuje propuštanje vodika u okoliš i, posljedično, povećava ekonomičnost. Glavna prednost ovakvog pristupa je izbjegavanje gradnje novog cjevovoda

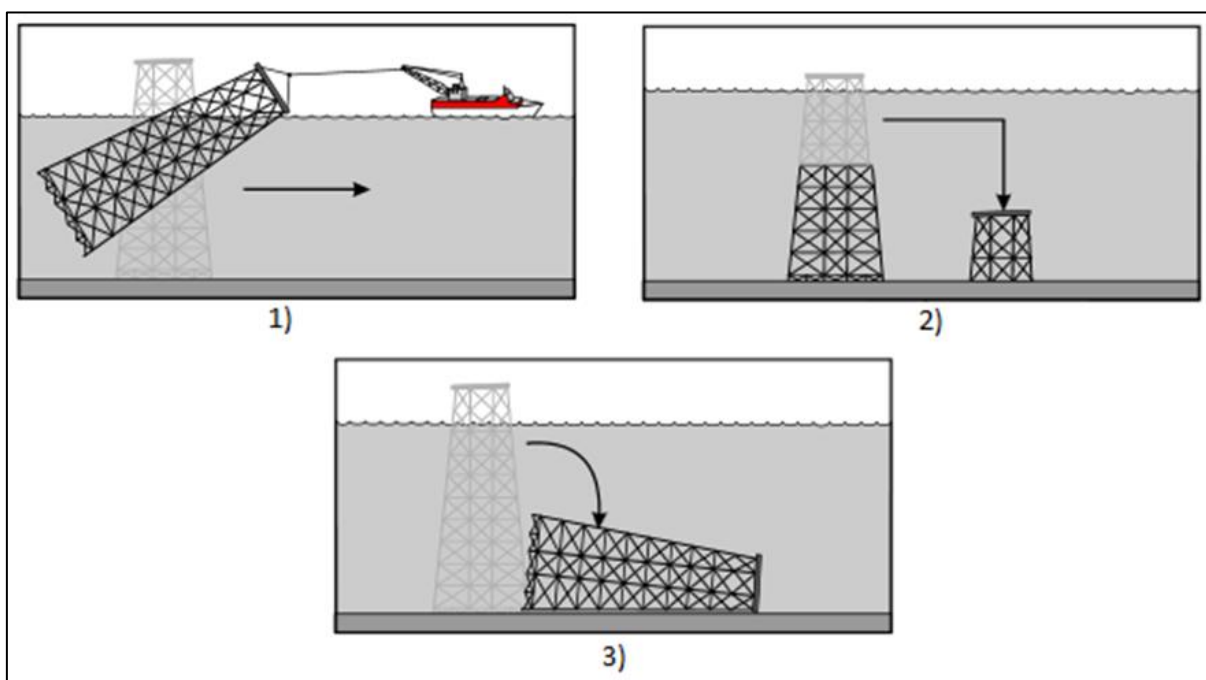
posebno za vodik. Mana je činjenica da u slučaju korištenja postojećih cjevovoda mogućnost transporta vodika ne ovisi samo o kapacitetu plinovoda nego i o raspoloživoj količini metana (Noujeim 2015b).

Cjelokupna kvaliteta plinske mreže i tip čelika korištenog u cjevovodima određuju gornju granicu volumnog udjela vodika u prirodnom plinu. Unutar država članica Europske unije, maksimalni dopušteni volumni udio vodika u prirodnom plinu kreće se od 0,02% do 0,5%. Istraživanja pokazuju da je, s ekonomskog stajališta, maksimalni udio vodika u prirodnom plinu 50% (Noujeim 2015a) pod uvjetom da je mreža plinovoda dobro održavana, odnosno propušta male količine metana pri normalnom radu. Pri takvim koncentracijama postoji propuštanje vodika, no ono je ekološki i ekonomski podnošljivo (Müller-Syring 2013b.; Florisson 2010). Adekvatne analize i prilagodbe transportnog sustava, skladišnih kapacitetima i trošila potrebne su prije svakog povećanja udjela vodika u plinskoj mreži iznad 0,5% (Noujeim 2015a; Klabučar i Aščić 2018).

## 6. Umjetni morski greben

Odobalna infrastruktura ulazi u proces dekomisije nakon kraja ekonomski isplative eksploatacije ugljikovodika. Platforme se u preinačenom obliku mogu ostaviti na mjestu, čime bi nastavile biti stanište morskoj flori i fauni. U takvoj praksi, stare plinske i naftne platforme prenamijenjuju se u umjetne morske grebene (*engl. Rigs-to-Reef*), s ciljem očuvanja bioraznolikosti na otvorenom moru. Prema Les Dauterive postoje tri primarna načina modifikacije platformi u umjetne morske grebene (Dauterive 2000):

- 1) Odvajanje nosive strukture od dna i odvlačenje na izabran lokalitet na kojem se polaže na morsko dno u horizontalnom položaju (*engl. Tow and Place*)
- 2) Rezanje gornjeg dijela strukture te njegovo polaganje na dno u blizini ostatka platforme (*engl. Partial Removal*)
- 3) Obaranje platforme iz okomitog u vodoravni položaj (*engl. Toppling*)



Slika 6-1. Načini prenamjene nekorištenih platformi u umjetne morske grebene (modificirano od Les Dauterive 2000)

Umjetni morski grebeni se trenutno nalaze u Maleziji, Bruneju i Sjedinjenim Američkim Državama. Ekološke i financijske prednosti prenamjene odobalne infrastrukture

u odnosu na njeno potpuno uklanjanje čine ovu opciju sve popularnijom. Potpuno uklanjanje jedne plinske platforme iz plitkog mora predstavlja trošak od 60 do 100 milijuna kuna. Prenamjena postojeće infrastrukture u umjetne morske grebene predstavlja ekonomski prihvatljiviju opciju. Platforme na otvorenom moru su tijekom desetljeća eksploatacije postale važan čimbenik u održavanju bioraznolikosti, tj. postale su stanište koraljima, morskim spužvama, školjkama, ribama i ostalim morskim organizmima. Biolozi tvrde da su platforme jedne od najaktivnijih morskih staništa na svijetu, aktivnije su čak i od ušća rijeka i koraljnih grebena. Neposredna blizina platformi povećava gustoću riba za 20 do 50 puta u odnosu na lokalitete otvorenog mora. Potpuno uklanjanje platformi velik je financijski izdatak koji rezultira uništavanjem staništa morskih organizama te povratkom na prijašnje stanje životom siromašnog otvorenog mora (Schroeder i Love 2004; Dauterive 2000).

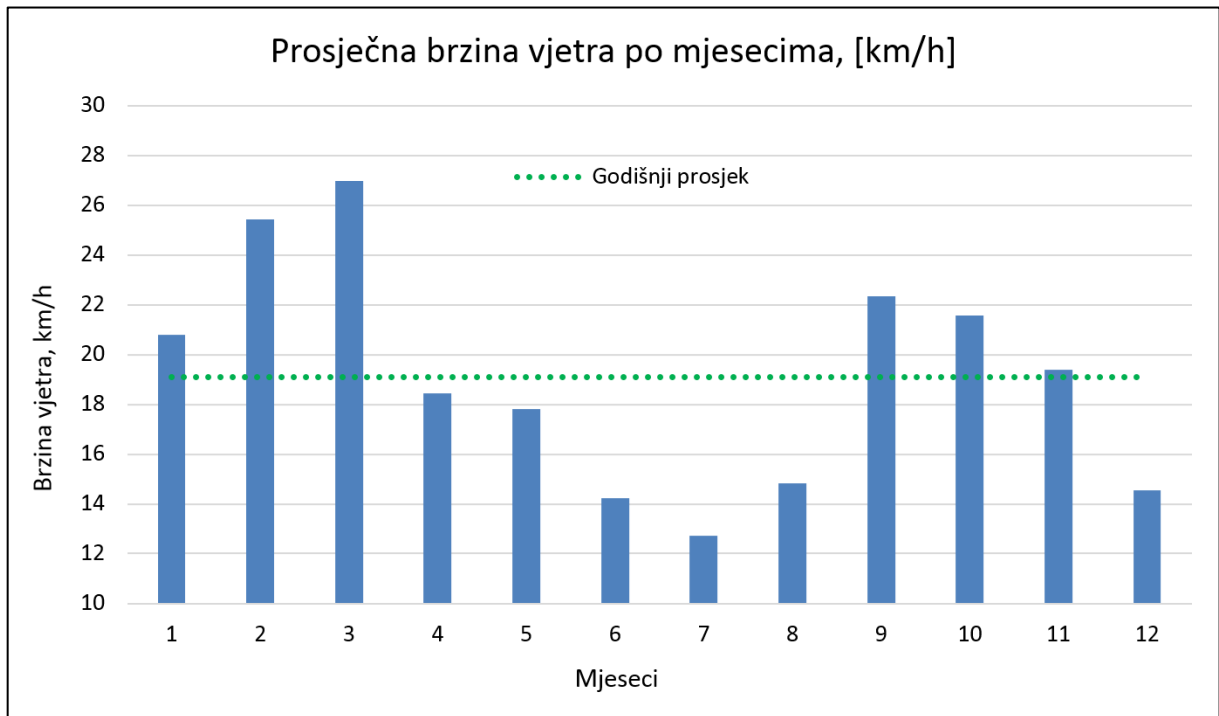


## 7. Potencijal korištenja plave energije na sjevernom Jadranu

Ovo poglavlje prikazuje rezultate analiza brzine vjetra, proizvodnje električne energije snagom vjetra, proizvodnje vodika elektrolizom, proizvodnje električne energije gorivom ćelijom, proizvodnje metana procesom metanacije i proizvodnje električne energije iz metana. Navedene analize su provedene kako bi se dobio pregled energetskeg potencijala i napravila podloga za buduća istraživanja koja će biti usmjerena na ekonomsko-tehnološke aspekte korištenja plinske infrastrukture sjevernog Jadrana pri proizvodnji plave energije. Rezultati su prikazani u dvije rezolucije, satnoj i mjesečnoj, kako bi sezonski i dnevni proizvodni karakter bio što vjernije prikazan.

### 7.1. Analiza brzine vjetra

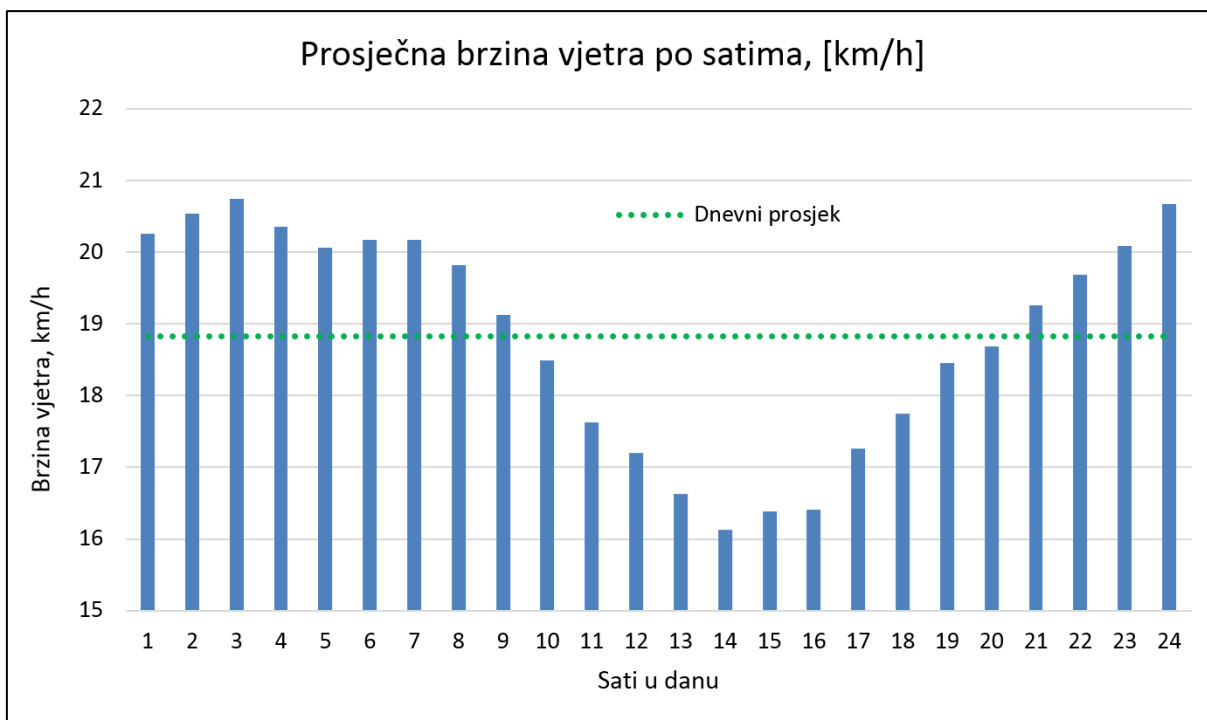
U suradnji s INA-Industrijom nafte, d.d. prikupljeni su neobrađeni podaci mjerenja brzine vjetra s plinske platforme „Annamaria A“ za razdoblje od dvije pune godine, tijekom 2015. i 2016. godine. Preostale plinske platforme, locirane na hrvatskom dijelu sjevernog Jadrana, imaju slične karakteristike vjetra kao i „Annamaria A“ te se mjereni podaci smatraju reprezentativnim za područje cijelog sjevernog Jadrana. Brzina vjetra je mjerena i dostavljena u rezoluciji od 3 sekunde, te je provedena obrada podataka u programu *MS Excel* u satnoj i mjesečnoj rezoluciji. Zatim su proračunate brzine vjetra za prosječni dan, mjesec i godinu. Kako je svrha analize brzine vjetra procjena mogućnosti vjetroelektrane pri generiranju el. energije, brzine vjetra veće od 90 km/h (25 m/s) i manje od 10,8 km/h (3 m/s) zamijenjene su nulom zbog činjenice što razmatrana vjetroelektrana „*NREL 5MW Offshore*“ može proizvoditi el. energiju u rasponu brzine vjetra od 3 m/s do 25 m/s. Posljedično, nema proizvodnje električne energije izvan navedenog radnog raspona. Iznosi srednjih mjesečnih brzina vjetra, korigiranih u odnosu na radni raspon promatrane vjetroelektrane, prikazani su na slici 7-1. Vrijednosti izjednačene s nulom ulaze u prosjek.



Slika 7-1. Iznosi srednjih mjesečnih brzina vjetra. Brzine izvan radnog raspona vjetroelektrane *NREL 5MW Offshore* izjednačene su s nulom (Klabučar i Aščić 2018)

Najniža prosječna vrijednost brzine vjetra bilježi se u srpnju u iznosu od 12,7 km/h, dok je najviša vrijednost zabilježena tijekom ožujka u iznosu od 27,0 km/h. Vjetar na sjevernom Jadranu pokazuje izraženi sezonski karakter.

Satna distribucija brzine vjetra u prosječnom danu prikazana je na slici 7-2. Grafički prikaz raspodjele brzine vjetra na godišnjoj i dnevnoj bazi pokazuju izražen sezonski i satni karakter. Noću se bilježe najveće, dok se u rano poslijepodne oko 14 sati bilježe najniže brzine.



Slika 7-2. Prikaz satne distribucije brzine vjetra u prosječnom danu. Brzine su izmijenjene prema radnom rasponu izabrane vjetroelektrane *NREL 5MW Offshore* (Klabučar i Aščić 2018)

Najveća potrošnja električne energije se vremenski ne poklapa sa sezonskim i satnim karakterom vjetra. Na dnevnoj bazi, potrošnja el. energije najveća je tijekom dana dok je na godišnjoj razini najveća za vrijeme ljeta. Rezultati analize brzina vjetra pokazuju da na sjevernom Jadranu vjetroelektrane najveću količinu el. energije proizvode tijekom zime, odnosno noću. Dnevni i sezonski sustavi skladišta neophodni su kako bi se mogli pohraniti viškovi el. energije te time smanjiti nepovoljni učinak obnovljivih izvora na električnu mrežu te kako bi postala moguća njihova izgradnja u značajnijem proizvodnom kapacitetu.

Prosječan dan, kojeg pretpostavlja satna analiza, je statistički kreiran koristeći mjerene satne vrijednosti kroz dvije godine i u stvarnosti ne postoji. Satna analiza je korisna jer otkriva u koliko sati najčešće možemo očekivati minimum i maksimum proizvodnje, odnosno otkriva trend proizvodnje vodika, metana ili el. energije kroz dan

## 7.2. Analiza proizvodnje električne energije vjetroelektranom

Prosječne brzine vjetra, na satnoj i mjesečnoj razini, predstavljene u poglavlju 7.1., korištene su kao ulazni podaci za proračun generiranja el. energije snagom vjetra na sjevernom Jadranu. Promatrano je korištenje jedne vjetroelektrane, „*NREL 5MW Offshore*“, jer se njena upotreba pokazala kao ekonomski najpovoljnije rješenje prema analizi niveliranih troškova (*engl. Levelized Cost of Energy, LCOE*), koju je proveo Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (Krajačić i Dobravec 2018).

Obilježja „*NREL 5MW Offshore*“ vjetroelektrane (Jonkman et al., 2009):

- 1) Snaga 5MW
- 2) 3 lopatice
- 3) Visina kućišta 90m
- 4) Duljina lopatice 61,5m
- 5) Radni raspon brzine vjetra od 3 m/s (10,8 km/h) do 25 m/s (90 km/h)
- 6) Koeficijent pretvorbe (0,4)

Količina el. energije proizvedene pomoću jedne vjetroelektrane, na mjesečnoj i dnevnoj bazi, izračunata je u *MS Excelu* pomoću sljedeće formule (The Royal Academy of Engineering 2007):

$$E = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p t \quad [\text{Wh}_e] \quad (7-1)$$

Gdje je:

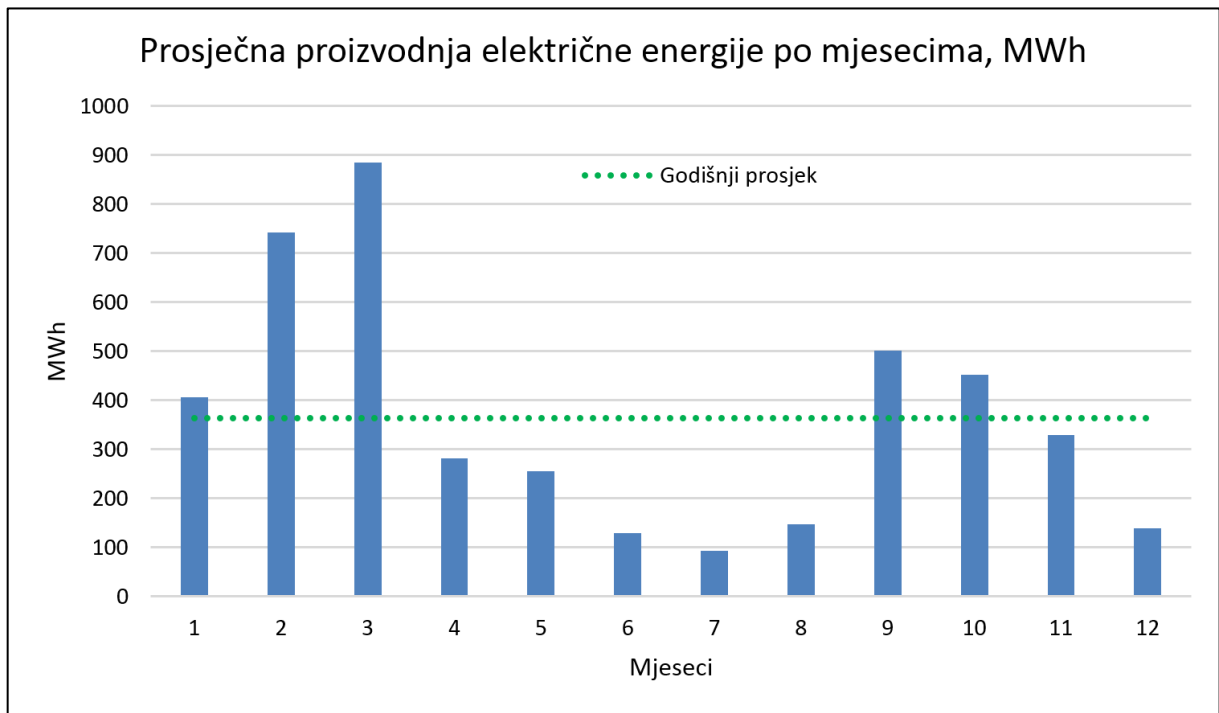
$\rho$  - gustoća zraka, [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$A$  - površina kretanja lopatica, [ $\text{m}^2$ ]

$v$  - brzina vjetra, [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$C_p$  - koeficijent pretvorbe, bezdimenzionalno (0,4)

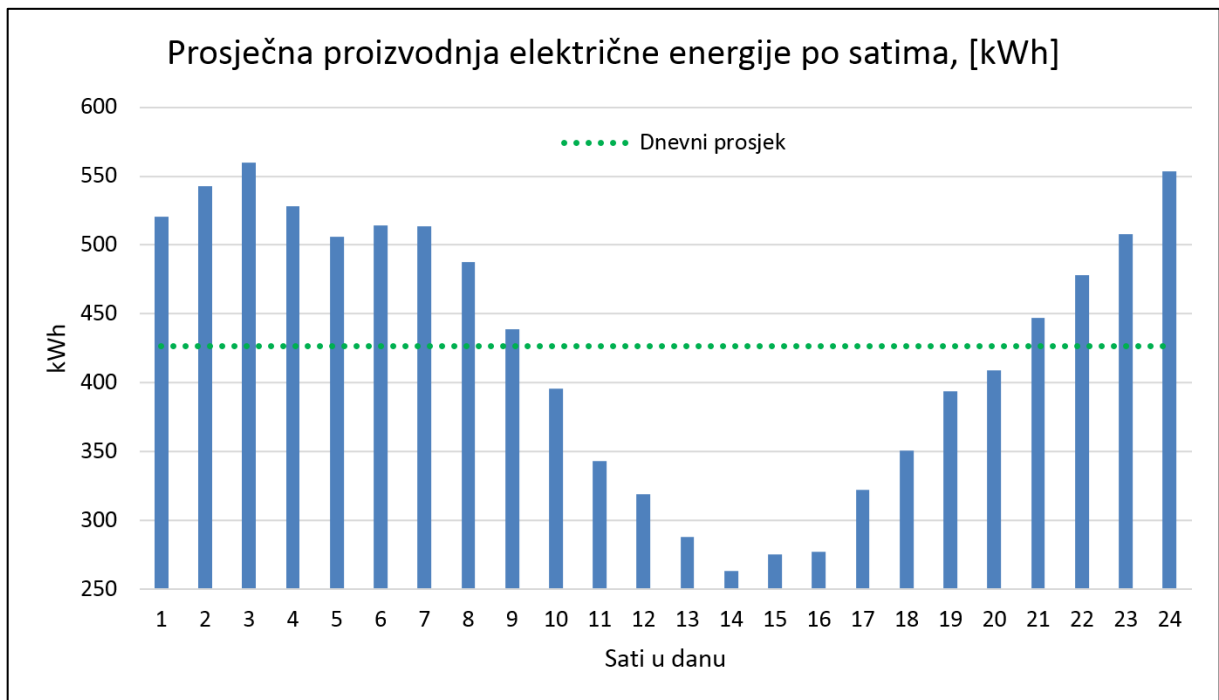
$t$  - proteklo vrijeme, [ $h$ ]



Proizvodnja električne energije najviše ovisi o vjetru, čija se brzina u prikazanoj formuli potencira eksponentom 3. Prosječna mjesečna proizvodnja el. energije i srednja vrijednost na godišnjoj bazi prikazane su na slici 7-3.

Slika 7-3. Prikaz srednje mjesečne proizvodnje el. energije i prosjeka na godišnjoj razini (Klabučar i Aščić 2018)

U prosječnom mjesecu jedna vjetroelektrana snage 5 MW proizvede 363,6 MWh<sub>e</sub>



električne energije. Najveća se proizvodnja očekuje u ožujku, u iznosu od 884,1 MWh<sub>e</sub>, a

najmanja u srpnju u iznosu od 93,2 MWh<sub>e</sub>. U jednoj se godini prosječno proizvede 4362,8 MWh<sub>e</sub> električne energije.

Slika 7-4. Iznosi srednje satne proizvodnje el. energije i dnevnog prosjeka u prosječnom danu (Klabučar i Aščić 2018)

Velike razlike u maksimalnoj i minimalnoj proizvedenoj količini el. energije na satnoj i mjesečnoj bazi uzrokovane su sezonskim i satnim karakterom brzine vjetra, prikazanim u poglavlju 7.1. Skladištenje viška el. energije, proizvedene u periodima maksimalne proizvodnje je nužno zbog nepoklapanja vršne mjesečne i dnevne proizvodnje s vršnom potrošnjom.

### **7.3. Analiza proizvodnje vodika elektrolizom**

Proces proizvodnje vodika elektrolizom vode predstavlja jedno od mogućih rješenja problema vezanih uz adekvatno skladištenje viška el. energije proizvedene vjetroelektranama. Lokacija sjevernog Jadrana je zanimljiva u kontekstu kemijskog skladištenja električne energije zbog činjenice što se brojna stara plinska polja nalaze upravo tamo, što otvara mogućnost sezonskog i dnevnog skladištenja proizvedenog vodika u geološkim formacijama u kojima se prije nalazio prirodni plin. Proizvodnja vodika je proračunata na osnovi vrijednosti efikasnosti P2G procesa prikazanih Tablicom 5-1 i vrijednostima proizvedene el. energije (vidi poglavlje 7.2.). Uzeti su u obzir scenariji izlaznog tlaka bez kompresije, te u vrijednostima od 8 i 20 MPa. Tlak bez dodatnog stlačivanja predstavlja maksimalnu moguću proizvodnju vodika; tlak od 8 MPa prikazuje scenarij u kojem se vodik transportira cjevovodima do obale, a tlak od 20 MPa prikazuje scenarij u kojem se vodik skladišti u staro plinsko ležište.

Pretpostavke proračuna (Klabučar i Aščić 2018):

- 1) Donja ogrjevna vrijednost vodika od 33,32 kWh/kg (119,96 MJ/kg)
- 2) Stlačivanje vodika na 20 MPa, 8 MPa i bez stlačivanja
- 3) Efikasnost procesa elektrolize za pojedini tlak je srednja vrijednost prikazana Tablicom 5-1.

4) Električnu energiju proizvodi jedna vjetroelektrana snage 5 MW

Proračun količina proizvedenog vodika, na mjesečnoj i satnoj razini, proveden je u *MS Excelu* pomoću sljedeće formule:

$$H = \frac{\eta_E \times E}{LHV_{H_2}} [kg] \quad (7-2)$$

Gdje je:

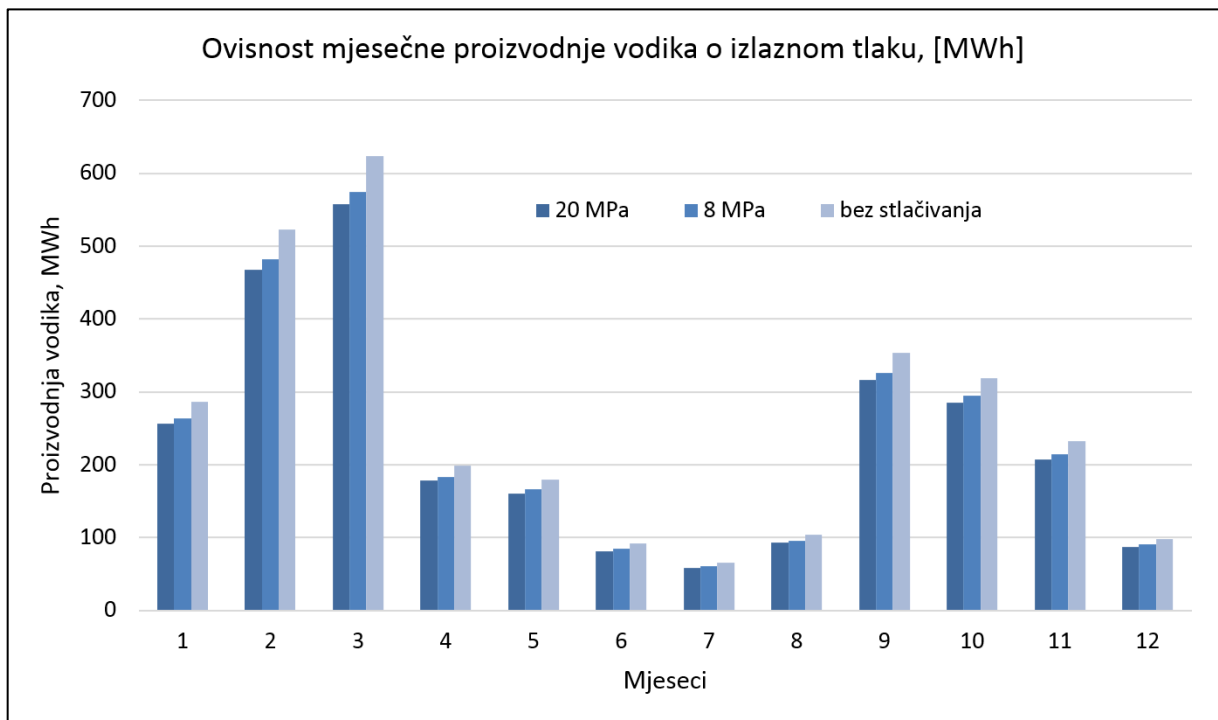
$\eta_E$  – efikasnost procesa elektrolize, [%]

$E$  – količina utrošene električne energije, [kWh<sub>e</sub>]

$LHV_{H_2}$  – donja ogrjevna vrijednost vodika (33,32 kWh/kg)

$H$  – proizvedeni vodik, [kg]

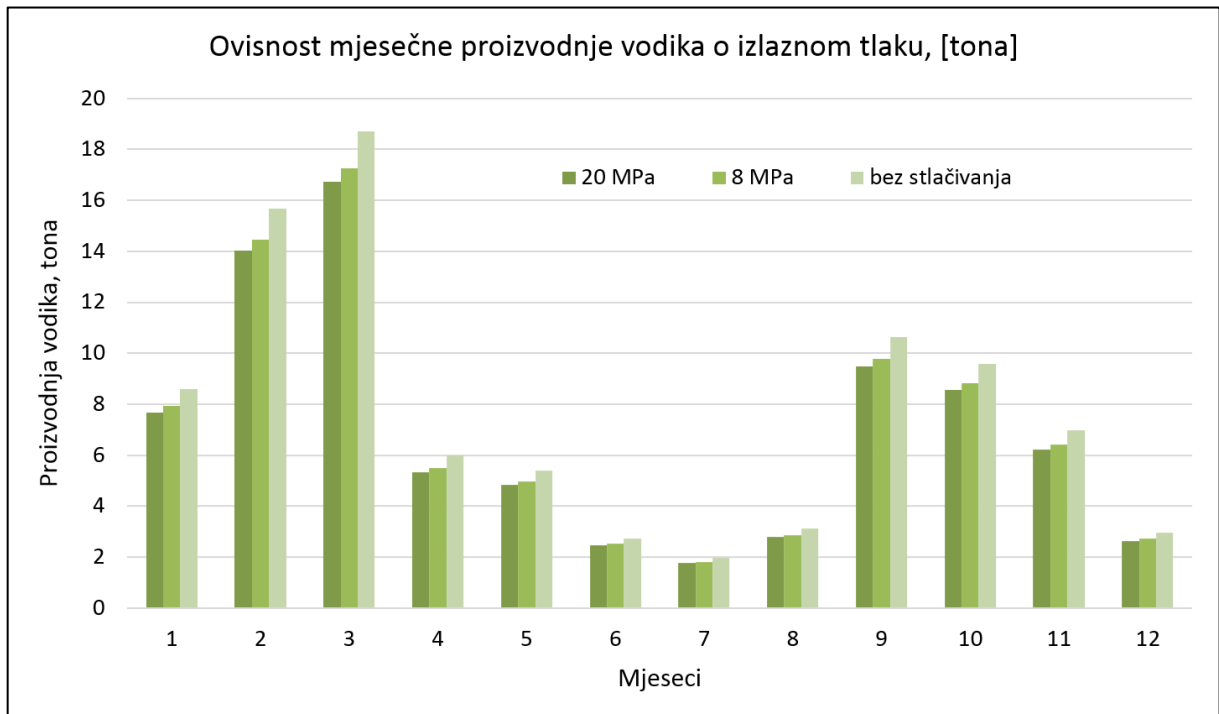
Slika 7-5. i slika 7-6. grafički prikazuju proizvodnju vodika u megavatsatima i tonama na mjesečnoj bazi u tri scenarija vezana uz vrijednost izlaznog tlaka. Količina proizvedenog vodika opada s povećanjem izlaznog tlaka zbog toga što stlačivanje predstavlja dodatnu potrošnju energije. Prosječna mjesečna proizvodnja vodika bez komprimiranja iznosi 256,3 MWh<sub>t</sub> ili 7,7 tona; pri tlaku od 8 MPa je 236,3 MWh<sub>t</sub> ili 7,1 tona; pri tlaku od 20 MPa je 229,0 MWh<sub>t</sub> ili 6,9 tona. Prosječna satna proizvodnja vodika bez komprimiranja iznosi 300,6 kWh<sub>t</sub> ili 9,0 kg; pri tlaku od 8 MPa je 277,2 kWh<sub>t</sub> ili 8,3 kg; pri tlaku od 20 MPa je 268,6 kWh<sub>t</sub> ili 8,1 kg.



Slika 7-5. Grafički prikaz zavisnosti izlaznog tlaka o prosječnoj mjesečnoj proizvodnji vodika [MWh<sub>t</sub>] (Klabučar i Aščić 2018)

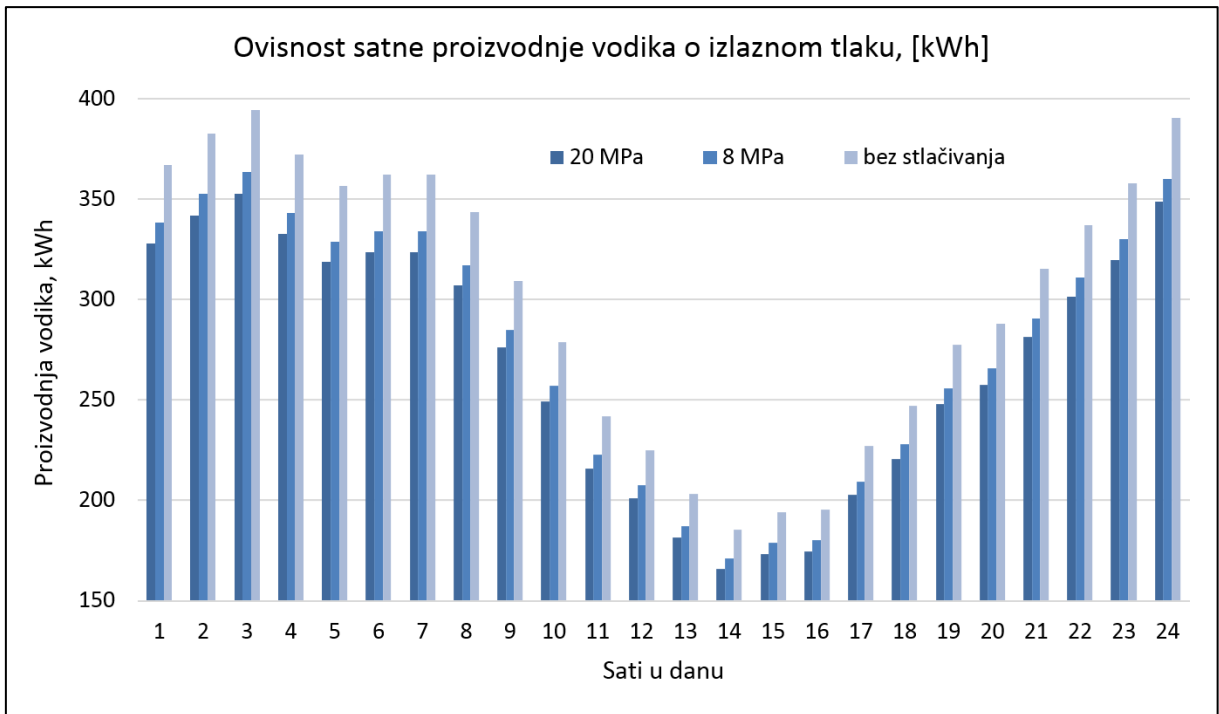
Najmanja proizvodnja vodika na mjesečnoj bazi zapažena je u srpnju, a najveća u ožujku. Potrošnjom električne energije proizvedene iz jedne vjetroelektrane snage 5 MW, elektrolizeri mogu proizvesti maksimalno 92,3 tona vodika, odnosno 3075,8 MWh<sub>t</sub> u prosječnoj godini. Sezonski karakter jasno je vidljiv.





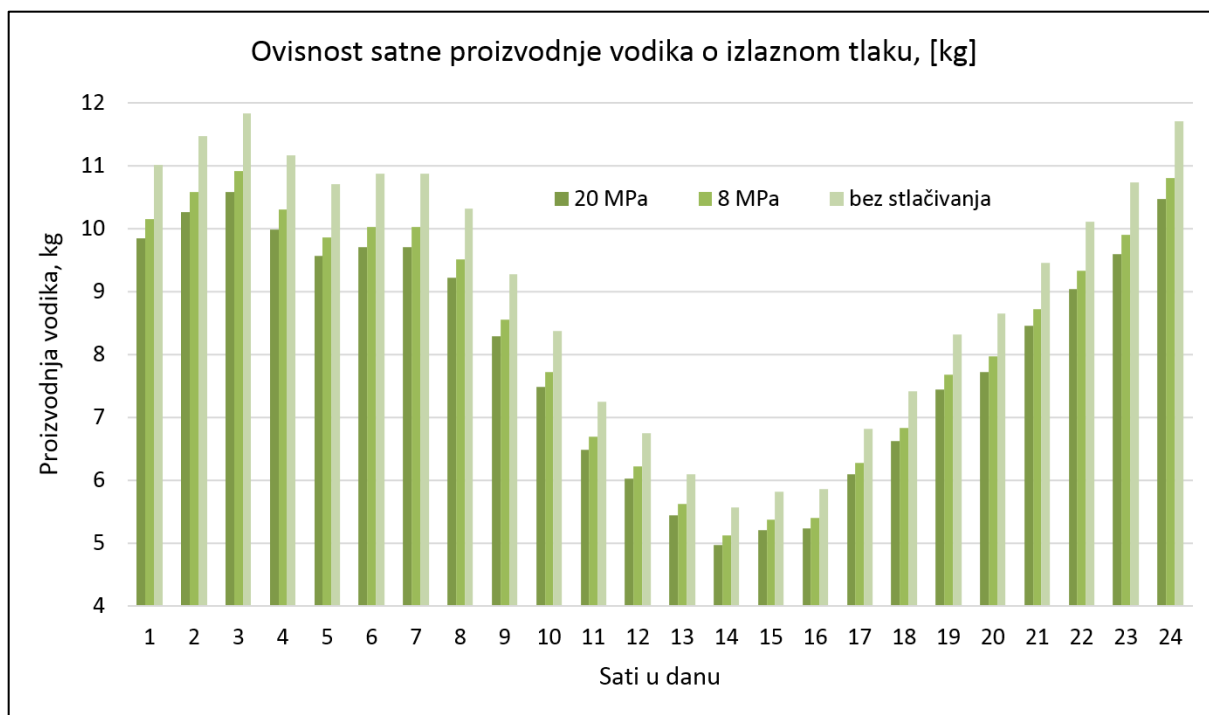
Slika 7-6. Grafički prikaz zavisnosti izlaznog tlaka o prosječnoj mjesečnoj proizvodnji vodika [tona] (Klabučar i Aščić 2018)

Zavisnost izlaznog tlaka o satnoj proizvodnji vodika je prikazana na slici 7-7. Na dnevnoj bazi, najmanje vodika se proizvodi popodne, a najviše tijekom noći. U prosječnom danu se proizvede 216,5 kg, odnosno 7214,9 kWh<sub>t</sub> vodika.



Slika 7-7. Grafički prikaz zavisnosti izlaznog tlaka o satnoj proizvodnji vodika [kWh] (Klabučar i Ašćić 2018)

Uz sezonski karakter proizvodnje vodika i električne energije postoji i njihov dnevni karakter. Slike 7-7. i 7-8. prikazuju dnevni karakter u proizvodnji vodika pri varijabilnom tlaku te ukazuju da je uz sezonsko, potrebno izgraditi i dnevno skladište vodika. Skladište je potrebno stoga što postoji značajna neusklađenost sezonske i dnevne proizvodnje energije s potrošnjom.



Slika 7-8. Grafički prikaz zavisnosti izlaznog tlaka o satnoj proizvodnji vodika [kg] (Klabučar i Aščić 2018)

#### 7.4. Analiza proizvodnje električne energije iz vodika

Najveću efikasnost konverzije kemijske u električnu energiju predstavlja tehnologija gorive ćelije. Goriva ćelija ne radi na principu izgaranja nego na principu direktne transformacije kemijske energije vodika u električnu energiju. Kao rezultat smanjenog broja energetskih transformacija postiže se visoka učinkovitost konverzije kemijske energije vodika u el. energiju od 60%. Ukoliko bi se koristila otpadna toplina, energetska efikasnost gorive ćelije dosegla bi 85%, no ovaj se rad bavi isključivo proizvodnjom el. energije te takva analiza nadilazi opseg ovog rada. Najvrjednijim aspektom korištenja tehnologije gorive ćelije smatra se zadovoljavanje vršne potrošnje elektroenergetskog sustava zbog mogućnosti brzog pokretanja i gašenja. Kako bi se goriva ćelija koristila za podmirivanje vršnog opterećenja potrebno je instalirati dostatnu snagu gorivih ćelija te uskladištiti dovoljnu količinu vodika. U nastavku rada analizirana je mogućnost uporabe gorive ćelije pri kontinuiranoj proizvodnji električne energije. U praksi, podmirivanje bazne potrošnje gorivim ćelijama nije najsretnije rješenje zbog neiskorištavanja potencijala brzog pokretanja i gašenja. Ipak, analiza kontinuirane proizvodnje stalnom snagom daje jasniju sliku o učinkovitosti i proizvedenoj energiji te omogućuje jasniju usporedbu tehnologija.

Pretpostavke proračuna proizvodnje električne energije stalnom snagom:

- 1) Efikasnost gorive ćelije je 60%
- 2) Donja ogrjevna vrijednost vodika je 119,96 MJ/kg (33,32 kWh/kg)
- 3) Izlazni tlak vodika u procesu elektrolize je 8 MPa
- 4) Električnu energiju, kojom se proizvodi vodik, proizvodi jedna vjetroelektrana snage 5 MW

Proračun proizvedene el. energije gorivim ćelijama iz kemijske energije vodika proveden je u *MS Excelu* pomoću sljedeće formule:

$$E = \eta_G \times H \times LHV_{H_2} [kWh_e] \quad (7-3)$$

Gdje je:

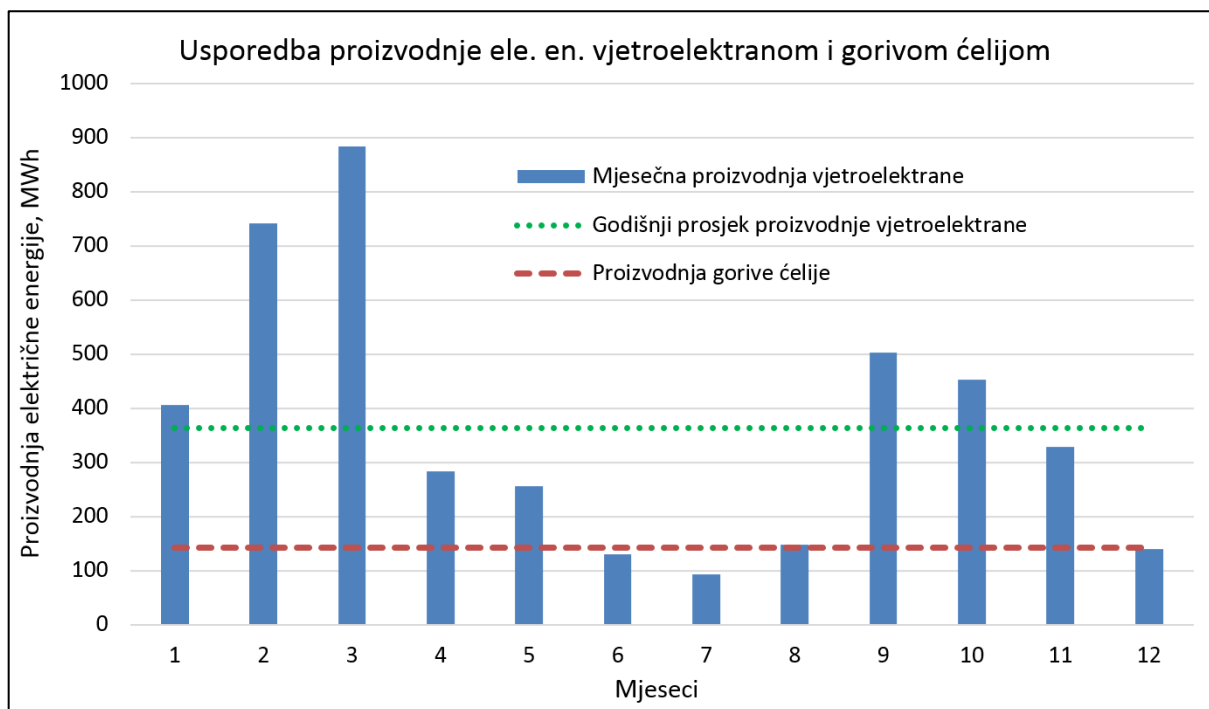
$E$  – količina proizvedene električne energije, [kWh]

$\eta_E$  – efikasnost gorive ćelije, (60%)

$H$  – utrošeni vodik, [kg]

$LHV_{H_2}$  – donja ogrjevna vrijednost vodika (33,32 kWh/kg)

Usporedba proizvodnje el. energije snagom vjetra s kontinuiranom proizvodnjom gorive ćelije prikazana je slikom 7-9. Energetska efikasnost procesa transformacije isprekidane proizvodnje električne energije u kemijsku energiju vodika te iz vodika u kontinuiranu proizvodnju gorive ćelije (*engl. Power-to-Power, P2P*) iznosi 39%.



Slika 7-9. Usporedba proizvodnje el. energije vjetroelektrane s kontinuiranom proizvodnjom gorive ćelije (Klabučar i Aščić 2018)

Procesne jedinice za kemijsku konverziju omogućuju elektroenergetskom sustavu efikasno balansiranje skladištenjem viškova el. energije u kemijskom obliku i proizvodnjom dodatne el. energije iz kemijski pohranjene energije u periodima vršne potrošnje. Instalacija značajnih kapaciteta obnovljivih izvora bez nepovoljnog efekta na stabilnost mreže moguća je gradnjom postojanje kemijskog skladištenja energije. Analiza pokazuje da jedna vjetroelektrana snage 5 MW na sjevernom Jadranu može u prosječnom mjesecu proizvesti 363,6 MWh<sub>e</sub> el. energije, koja se može kemijskom konverzijom prevesti u vodik toplinske vrijednosti od 236,3 MWh<sub>t</sub>. Njime, se može generirati 141,8 MWh<sub>e</sub> električne energije gorivim ćelijama. Veliki broj energetskih transformacija u procesu skladištenja viška električne energije u kemijskom obliku te ponovne transformacije u električnu energiju (*engl. Power-to-Power, P2P*) rezultira razmjerno niskom učinkovitošću od samo 39%. Nastavkom razvoja tehnologije kemijske konverzije, u budućnosti se može očekivati povećavanje učinkovitosti.

## 7.5. Analiza proizvodnje metana procesom metanacije

Metanacija ili Sabatierov proces je kemijska reakcija ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) i vodika ( $\text{H}_2$ ) pri povišenom tlaku i temperaturi uz prisustvo katalizatora pri čemu nastaju voda ( $\text{H}_2\text{O}$ ) i metan ( $\text{CH}_4$ ). Reakcija je detaljno opisana u poglavlju 5.4. U ovom poglavlju je opisan potencijal pretvorbe vodika proizvedenog elektrolizom u metan Sabatierovim procesom. Ulazni podaci za proračun proizvodnje metana su efikasnost pretvorbe ugljičnog dioksida u metan i količina proizvedenog vodika procesom elektrolize vode. Tlak metanacije od 1 MPa mora zadovoljiti ulazni tok vodika i ugljikovog dioksida.

Pretpostavke proračuna metanacije:

- 1) Elektroliza vode proizvodi vodik pod tlakom od 8 MPa
- 2) Tlak metanacije je 1 MPa
- 3) Temperatura metanacije je  $450^\circ\text{C}$
- 4) Efikasnost konverzije ugljičnog dioksida u metan je 90% (vidi sliku 5-3.)
- 5) Električnu energiju, kojom se proizvodi vodik, proizvodi jedna vjetroelektrana snage 5 MW

Analiza proizvodnje metana i vode te potrošnje ugljikovog dioksida i vodika Sabatierovom reakcijom provedena je programom *MS Excel* pomoću formula:

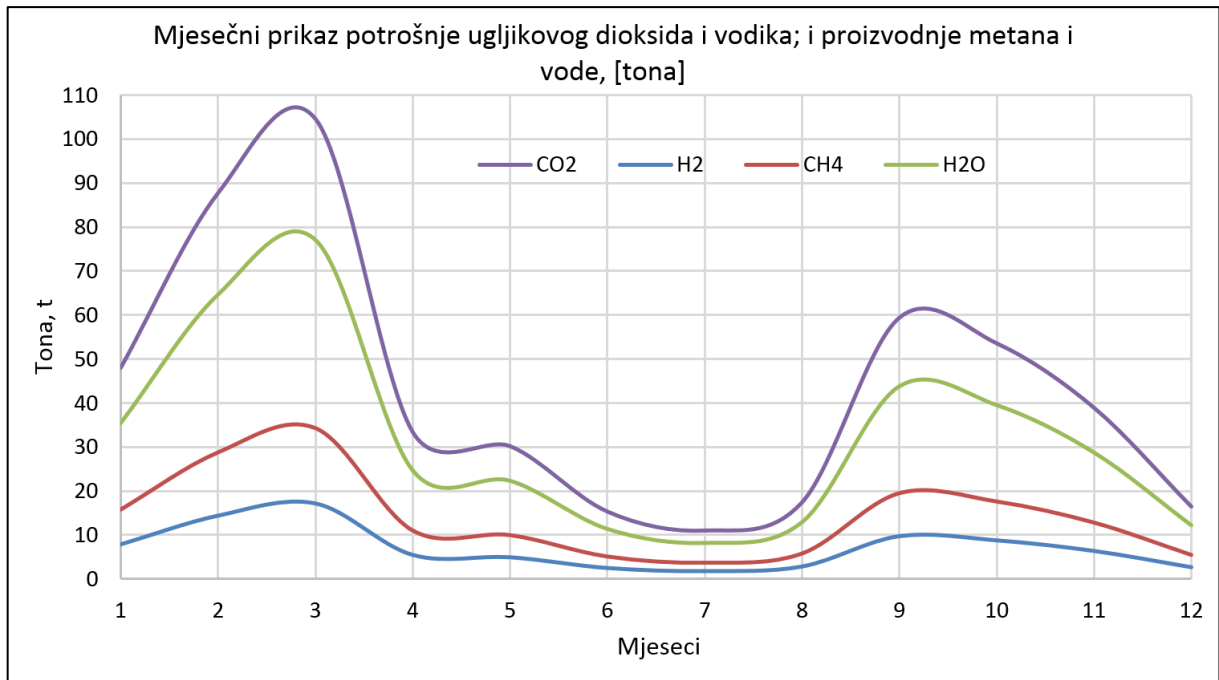
$$m(\text{CH}_4) = m(\text{H}_2) \times 1,9892 \text{ [kg]} \quad (7-4)$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = m(\text{H}_2) \times 4,4683 \text{ [kg]} \quad (7-5)$$

$$m(\text{CO}_2) = m(\text{H}_2) \times (5,4579 \div 0,9) \text{ [kg]} \quad (7-6)$$

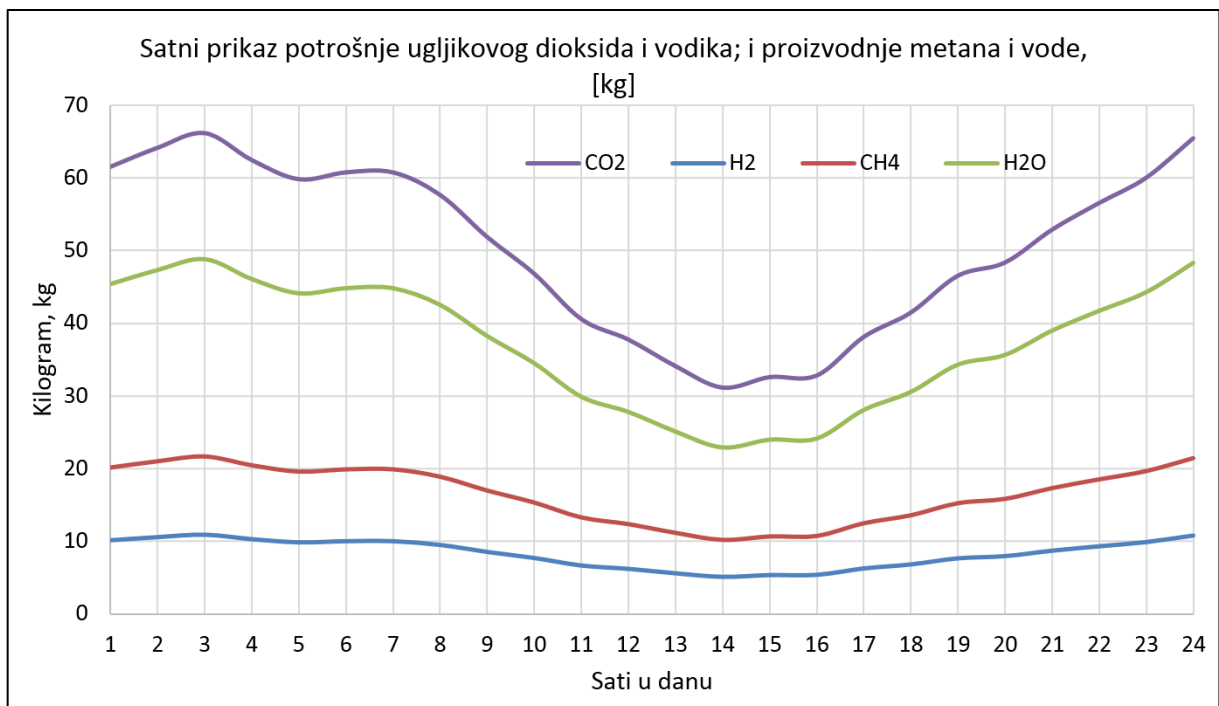
$$m(\text{H}_2) = H \text{ [kg]} \quad (7-7)$$

Slika 7-10. prikazuje mjesečnu proizvodnju metana i vode te potrošnju vodika i ugljikovog dioksida. Vodik proizveden u jednoj godini, procesom elektrolize pomoću električne energije generirane jednom vjetroelektranom snage 5 MW, ima masu od 85,1 tona. Kako bi se sav vodik konvertirao u metan i vodu, na godišnjoj je bazi potrebno dostaviti 516,1 tona ugljičnog dioksida. U godinu dana se proizvede 169,3 tona metana i 380,3 tona vode. Odstupanje od teoretskog materijalnog balansa uzrokovano je efikasnošću konverzije ugljičnog dioksida u metan od 90%, što znači da je 10% ugljičnog dioksida neiskorišteno u procesu metanacije.



Slika 7-10. Prikaz mjesečne proizvodnje i potrošnje tvari u procesu metanacije [tona]

Satna proizvodnja metana i vode te potrošnja vodika i ugljikovog dioksida prikazane su slikom 7-11. Vodik proizveden u jednom danu ima masu od 199,6 kilograma. Konverzija cjelokupne mase vodika na dnevnoj razini zahtjeva potrošnju od 1210,6 kilograma ugljičnog dioksida te se proizvode 397,1 kilograma metana i 892,0 kilograma vode.



Slika 7-11. Prikaz satne proizvodnje i potrošnje tvari u procesu metanacije [kg]

Prednost korištenja metana u odnosu na vodik, i posljedično razlog razmatranja kemijske konverzije vodika u metan, se nalazi u činjenici da je metan u potpunosti kompatibilan s postojećom transportnom plinskom infrastrukturom i trošilima. Transport vodika postojećim plinovodima dovodi do istjecanja dijela vodika u okoliš, što smanjuje ekonomičnost. Upotreba vodika od strane plinskih trošila također zahtjeva njihovu prilagodbu. Pogrešno bi bilo zaključiti da procesom kemijske konverzije vodika u metan uistinu uklanjamo ugljični dioksid iz okoliša. Izgaranjem metana, količina ugljičnog dioksida koja je utrošena u procesu metanacije, vraća se u okoliš te je proces proizvodnje i korištenja metana u najboljem slučaju ugljično neutralan.

Slike 7-10. i 7-11. pokazuju značajni sezonski i dnevni karakter u proizvodnji metana, što čini skladište plina neophodnim ukoliko se instaliraju značajni proizvodni kapaciteti.

## **7.6. Analiza proizvodnje električne energije iz metana**

Proizvodnja električne energije metanom podrazumijeva upotrebu plinske termoelektrane u kojoj se metan i stlačeni zrak miješaju. Metan izgara pri čemu nastaju plinovi visokog termodinamičkog stanja koji tijekom ekspanzije u turbini okreću rotor generatora proizvodeći električnu energiju. Analiza je provedena na kombiniranoj termoelektrani, odnosno termoelektrani koja se sastoji od plinsko-turbinskog i parno-turbinskog dijela te ima efikasnost pretvorbe toplinske u električnu energiju od 60%. Ukupna energetska efikasnost plinske termoelektrane je preko 80%, ukoliko se koristi otpadna toplina kogeneracijom. Ipak, ovaj se rad bavi isključivo proizvodnjom el. energije te takva analiza stoga nadilazi opseg ovog rada. Proizvodnja metana Sabatierovom reakcijom opisana je u poglavlju 5.4.; u ovom poglavlju je opisan potencijal proizvodnje električne energije iz tako proizvedenog metana. Ulazni podaci za proračun proizvodnje električne energije su efikasnost plinske elektrane i količine proizvedenog metana u Sabatierovoj reakciji.

Pretpostavke proračuna proizvodnje električne energije iz metana:

- 1) Efikasnost plinske elektrane je 60%
- 2) Donja ogrjevna vrijednost metana je 13,89 kWh/kg (50 MJ/kg)

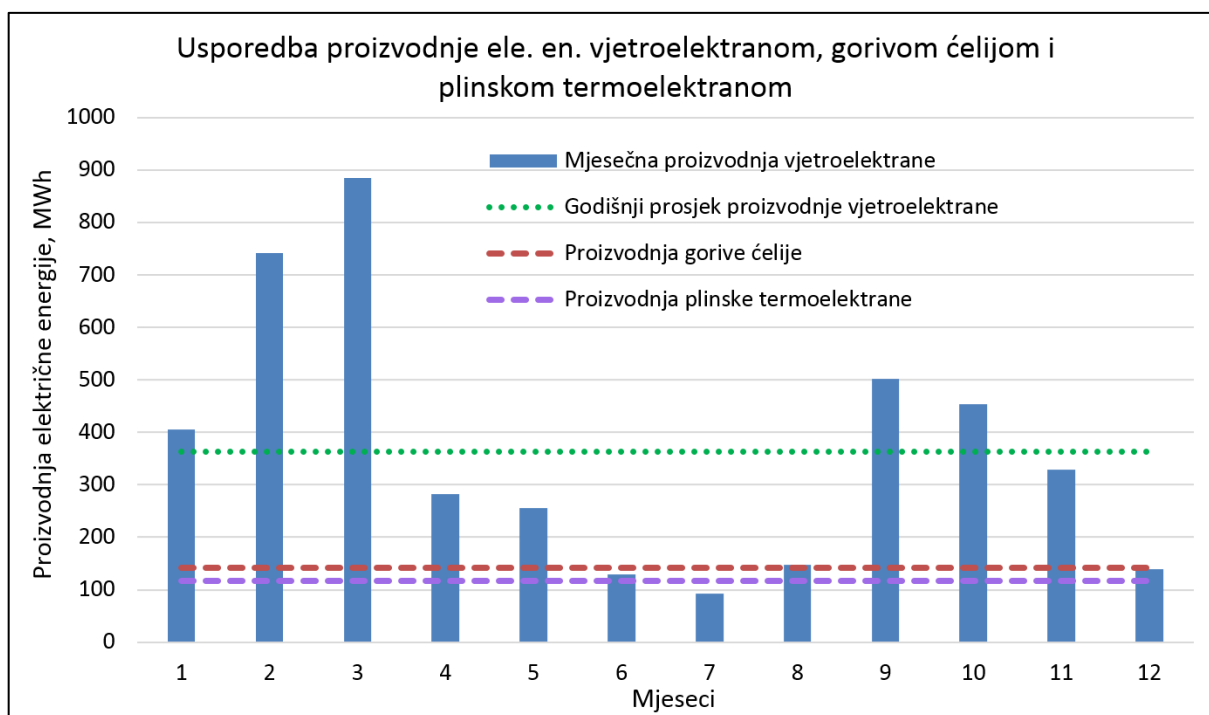


- 3) Električnu energiju, kojom se proizvodi vodik, proizvodi jedna vjetroelektrana snage 5 MW

Proračun proizvedene el. energije korištenjem plinske termoelektrane proveden je u *MS Excelu* pomoću sljedeće formule:

$$E = m(CH_4) \times LHV_m \times \eta_p \quad [kWh_e] \quad (7-8)$$

Slika 7-12. pokazuje usporedbu proizvodnje električne energije različitim tehnologijama. U prosječnom mjesecu vjetroelektrana snage 5 MW proizvede 363,6 MWh<sub>e</sub>, goriva ćelija pomoću vodika proizvede 141,8 MWh<sub>e</sub>, a plinska elektrana pomoću metana 117,6 MWh<sub>e</sub> električne energije.



Slika 7-12. Usporedba u proizvodnji el. energije raznim tehnologijama; vjetroelektranom, gorivim ćelijama i plinskom termoelektranom [MWh<sub>e</sub>] (Klabučar i Aščić 2018)

Proizvodnja električne energije u ovoj analizi podrazumijeva baznu proizvodnju, odnosno proizvodnju konstantnom snagom tijekom cijele godine. Na sjevernom Jadranu jedna vjetroelektrana od 5 MW u jednoj godini proizvede prosječno 4362,8 MWh<sub>e</sub> električne energije, koja se elektrolizom vode može konvertirati u vodik toplinske vrijednosti 2835,8 MWh<sub>t</sub> i gorivom ćelijom pretvoriti u 1701,4 MWh<sub>e</sub> električne energije. Vodik se

Sabatierovom reakcijom može konvertirati u metan energetske vrijednosti 2351,2 MWh, kojim plinska termoelektrana može proizvesti 1410,7 MWh<sub>e</sub> električne energije. Proces proizvodnje el. energije iz metana (*engl. Power-to-Power, P2P*) zbog mnogobrojnih energetskih transformacija ima relativno nisku učinkovitost, samo 32%. Međutim, značajna financijska sredstva se ulažu u razvoj ove tehnologije te u budućnosti možemo očekivati poboljšanje njene učinkovitosti.

Pozitivna strana proizvodnje električne energije pomoću metana, u odnosu na vodik, je potpuna kompatibilnost s postojećom transportnom infrastrukturom i trošilima. Negativna strana je smanjena cjelokupna učinkovitost procesa za 7% (efikasnost proizvodnje el. energije pomoću vodika je 39%) i potreba za dobavom velikih količina ugljičnog dioksida, što zahtjeva izgradnju posebnih cjevovoda otpornih na koroziju i sustava prikupljanja ugljičnog dioksida na kopnu.

## 8. Zaključak

U ovom su radu analizirane mogućnosti nastavka korištenja plinske infrastrukture na poljima sjevernog Jadrana nakon završetka financijski opravdane proizvodnje prirodnog plina. Nakon što plinska industrija prestane s korištenjem odobalnih objekata, postojeću infrastrukturu poželjno je koristiti za drugu legitimnu svrhu jer predstavlja velik gospodarski, kapitalni i ekološki resurs.

Najzanimljiviji nastavak korištenja plinske infrastrukture predstavlja onaj u sinergiji s elektroenergetskim sustavom, odnosno s farmom odobalnih vjetroelektrana. Odobalne vjetroelektrane predstavljaju plavi, ekološki prihvatljiv izvor električne energije sa stalnijom proizvodnjom od onih postavljenih na kopnu. Ipak, svi obnovljivi izvori energije imaju problem sa isprekidanom i nepredvidivom proizvodnjom koja se uglavnom ne poklapa sa stvarnom potrošnjom te dovodi do neuravnoteženja električne mreže. Tehnologija kemijske konverzije (*engl. Power-to-Gas, P2G*) pokazala se kao obećavajući način skladištenja viškova električne energije u kemijskom obliku. Prva procesna postrojenja za kemijsku konverziju se planiraju izgraditi na platformama Sjevernog mora, gdje će se u praksi testirati njihova sposobnost konverzije električne u kemijsku energiju (Noujeim 2015a; Noujeim 2015b). Proizvedeni plin se pomoću postojećih plinovoda može transportirati do kopna ili skladištiti u iscrpljenim plinskim ležištima. Ovako proizvedena kemijska energija može se koristiti u industriji, za grijanje i proizvodnju električne energije u baznom ili vršnom režimu. Pretvorbom plina u električnu energiju (*engl. Gas-to-Power, G2P*) završava proces konverzije, čiji je cilj skladištenje viškova i proizvodnja električne energije kada za njom postoji potreba. Takav konverzijski ciklus električne energije (*engl. Power-to-Power, P2P*) ima učinkovitost od 39% ukoliko je nosilac energije vodik, odnosno 32% u slučaju metana. Također, na platforme se mogu postaviti visokonaponski transformatori koji će omogućiti prijenos električne energije dalekovodima od vjetroelektrana do obale u slučaju kada se proizvodnja poklapa s potrošnjom. Energetska učinkovitost ovog slučaja mnogo je veća jer su gubici transformacije električne energije znatno manji od onih tijekom kemijske konverzije.

Rezultati analize pokazuju značajan potencijal proizvodnje plave energije na području sjevernog Jadrana. Jedna vjetroelektrana snage 5 MW u prosječnom mjesecu proizvede 363,6 MWh<sub>e</sub> električne energije. Električnu je energiju kemijskom konverzijom

elektrolize vode moguće prevesti u 236,3 MWh<sub>t</sub>, odnosno 7,1 tona vodika. Sabatierovom reakcijom vodik se može konvertirati u 195,96 MWh<sub>t</sub>, odnosno 14,1 tona metana. Proizvedeni vodik je gorivim ćelijama moguće konvertirati u 141,8 MWh<sub>e</sub>, a metan termoelektranom na plin u 117,6 MWh<sub>e</sub> električne energije.

Znanstveni doprinos ovog rada je pregled mogućnosti prenamjene postojeće plinske infrastrukture i analiza potencijala sjevernog Jadrana u proizvodnji plave energije korištenjem trenutno dostupne tehnologije.

## 9. Popis literature

KLABUČAR, B.; AŠČIĆ, D.; 2018. Naslov: *Analiza mogućnosti upotrebe plinske infrastrukture na odobalnim eksploatacijskim poljima sjevernog Jadrana za iskorištavanje plave energije*. Rad za Rektorovu nagradu Sveučilišta u Zagrebu.

KRAJAČIĆ, G.; DOBRAVEC, V.; 2018. Naslov: *Test Offshore wind Jadran 1.homer*. Simulacija u sustavu Homer.

NOUJEIM, J.P.; 2015a. Naslov: *Power-to-Gas on an Offshore Platform: System Analysis and Thechnical Barriers*. JIN Climate and Sustainability.

NOUJEIM, J.P.; 2015b. Naslov: *Power to Gas Model for Reuse of Offshore O&G Facilities*. EUREC.

Internet izvori:

ASTARIZ, S.; VAZQUEZ, A.; IGLESIAS, G.; 2015. Naslov: *Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave and offshore wind energy*. American Institute of Physics. URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4932154> (19.03.2018).

BROWN, E.D.; 1982. Naslov: *Decommissioning of offshore structures: Legal obligation under international and municipal law*. Elsevier. URL: [https://doi.org/10.1016/S0143-7127\(82\)90449-5](https://doi.org/10.1016/S0143-7127(82)90449-5) (06.04.2018).

CARMO, M.; FRITZ, D.L.; MERGEL, J.; STOLTEN, D.; 2013. Naslov: *A comprehensive review on PEM water electrolysis*. Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151> (20.11.2017).

CHAKIK, F.E.; KADDAMI, M.; MIKOU, M.; 2017. Naslov: *Effect of operating parameters on hydrogen production by electrolysis of water*. Elsevier. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.015> (05.01.2018).

DAUTERIVE, L.; 2000. Naslov: *Rigs-to-Reefs Policy, Progress, and Perspective*. U.S. Department of the Interior, Minerals Management Services, OCS Report MMS 2000-073. URL:

[https://tpwd.texas.gov/publications/pwdpubs/media/rigs\\_to\\_reefs\\_policy\\_2000\\_073.pdf](https://tpwd.texas.gov/publications/pwdpubs/media/rigs_to_reefs_policy_2000_073.pdf)  
(06.01.2018).

EUROPEAN COMMISSION, 2011. Naslov: *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*, (2011). URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0112&from=EN> (06.04.2018).

HARRISON, K.W.; REMICK, R.; MARTIN, G.D.; HOSKIN, A.; 2010. Naslov: *Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries*. Conference paper NREL/CP-550-47302 (01-2010). URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47302.pdf>

INA-Industrija nafte; 2017. Naslov: *Godišnje izvješće*. Izvješće o poslovanju. URL: <https://www.ina.hr/godisnja-izvjesca/104> (21.01.2018).

INA-Industrija nafte; 2016. Naslov: *Godišnje izvješće*. Izvješće o poslovanju. URL: <https://www.ina.hr/godisnja-izvjesca/104> (21.01.2018).

INA-Industrija nafte; 2015. Naslov: *Godišnje izvješće*. Izvješće o poslovanju. URL: <https://www.ina.hr/godisnja-izvjesca/104> (21.01.2018).

INA-Industrija nafte; 2014. Naslov: *Godišnje izvješće*. Izvješće o poslovanju. URL: <https://www.ina.hr/godisnja-izvjesca/104> (21.01.2018).

INA-Industrija nafte; 2013. Naslov: *Godišnje izvješće*. Izvješće o poslovanju. URL: <https://www.ina.hr/godisnja-izvjesca/104> (21.01.2018).

INA-Industrija nafte; 2012. Naslov: *Godišnje izvješće*. Izvješće o poslovanju. URL: <https://www.ina.hr/godisnja-izvjesca/104> (21.01.2018).

INA-Industrija nafte; 2011. Naslov: *Godišnje izvješće*. Izvješće o poslovanju. URL: <https://www.ina.hr/godisnja-izvjesca/104> (21.01.2018).

INA-Industrija nafte; 2010. Naslov: *Godišnje izvješće*. Izvješće o poslovanju. URL: <https://www.ina.hr/godisnja-izvjesca/104> (21.01.2018).

INA-Industrija nafte; 2009. Naslov: *Godišnje izvješće*. Izvješće o poslovanju. URL: <https://www.ina.hr/godisnja-izvjesca/104> (21.01.2018).

INA-Industrija nafte; 2008. Naslov: *Godišnje izvješće*. Izvješće o poslovanju. URL: <https://www.ina.hr/godisnja-izvjesca/104> (21.01.2018).

INA-Industrija nafte; 2007. Naslov: *Godišnje izvješće*. Izvješće o poslovanju. URL: <https://www.ina.hr/godisnja-izvjesca/104> (21.01.2018).

INA-Industrija nafte; 2006. Naslov: *Godišnje izvješće*. Izvješće o poslovanju. URL: <https://www.ina.hr/godisnja-izvjesca/104> (21.01.2018).

JONKMAN, J.; BUTTERFIELD, S.; MUSIAL, W.; SCOTT, G.; 2009. Naslov: *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*. Tehničko izvješće. National Renewable Energy Laboratory of the U.S. Department of Energy. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/38060.pdf> (04.03.2018).

NARODNE NOVINE, 2000. Naslov: *Konvencija Ujedinjenih Naroda o pravu mora*. Međunarodni ugovori broj 11/95. URL: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/medunarodni/2000\\_06\\_9\\_84.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/medunarodni/2000_06_9_84.html) (01.03.2018).

SCHAAF, T.; GRÜNIG, J.; SCHUSTER, M.R.; ROTHENFLUH, T.; ORTH, A.; 2014. Naslov: *Methanation of CO<sub>2</sub> – storage of renewable energy in a gas distribution system*. SpringerOpen Journal. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13705-014-0029-1> (14.05.2018).

SCHROEDER D.M.; LOVE M.S.; 2004. Naslov: *Ecological and political issues surrounding decommissioning of offshore oil facilities in the Southern California Bight*. Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016%2Fj.ocecoaman.2004.03.002> (06.01.2018).

SVESHNIKOVA A.; 2015. Naslov: *Estimation of possibility to implement fuel cell technology for decentralized energy supply in Russia*. Magistarski rad. Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management. URL: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:852241/FULLTEXT01.pdf> (10.01.2018.)

The Royal Academy of Engineering, 2007. Naslov: *Wind Turbine Power Calculations*. URL: <https://www.raeng.org.uk/publications/other/23-wind-turbine> (02.03.2018).

UNITED NATIONS, 1982. Naslov: *United Nations Convention on the Law of the Sea*. Međunarodni ugovor. URL: [http://www.un.org/depts/los/convention\\_agreements/texts/unclos/unclos\\_e.pdf](http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf) (17.02.2018)

VINCENT, I.; BESSARABOV. D.; 2018. Naslov: *Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review*. Elsevier, (04-01-2018). URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.258>



## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad samostalno izradio pomoću znanja stečenih na Rudarsko – geološko – naftnom fakultetu u Zagrebu.

---

Boris Klabučar