

# Planiranje eksperimentalnog ispitivanja energetske jezgre sustava temeljenog na vodiku i sunčevoj energiji

---

Lindić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2020

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:936843>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-15**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Luka Lindić**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentorica:

Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MEng. AE.

Student:

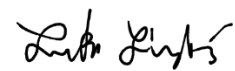
Luka Lindić

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Želio bih se zahvaliti prije svega svojoj obitelji i najužim prijateljima koji su bili uz mene kroz sve teške i lijepe trenutke tijekom studija i tijekom izrade ovog rada.

Posebna zahvala mentorici i docentici Ankici Kovač na izvrsnoj podršci tijekom izrade rada te na konstantnoj dostupnosti, profesoru Mihajlu Firaku na sugestijama i komentarima tijekom izrade samog rada te Doriji Marciuš.





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Lindić**

Mat. br.: 0035204025

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Planiranje eksperimentalnog ispitivanja energetske jezgre sustava  
temeljenog na vodiku i sunčevoj energiji**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Planning an experimental investigation of the system energy core based  
on hydrogen and solar energy**

Opis zadatka:

Sustavi za proizvodnju električne energije u mikromreži postoje kao rezerva u većim bolnicama, tornjevima radio i TV odašiljača i uključuju se u periodima ispada glavne mreže. Zasnovani su na diesel motor-generatorima. Takvi agregati različitih snaga i veličina u radu stvaraju veliku buku i ispuštaju CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i drugo pa su ekološki neprihvatljivi, a mogu biti i zavisni od dobave goriva u kriznoj situaciji. Tehnički sigurniji i ekološki prihvatljiviji su agregati s drugačijom energetskom jezgrom koja se sastoji od elektrolizatora, spremnika vodika, gorivnih članaka i druge popratne opreme. Primarni izvor energije za potrebe funkcioniranja energetske jezgre je sunčeva energija koja se u formi vodika pohranjuje u spremniku zadanog kapaciteta koji odgovara planiranim potrebama.

U okviru rada potrebno je:

1. Na temelju izlazne zadane električne snage od 2 kW i potrebnog neprekidnog rada uređaja od 48 sati analizirati i odabrati tržišno raspoložive komponente energetske jezgre.
2. Na temelju odabranih komponenti koncipirati cjelovitu shemu energetske jezgre i njezin smještaj u zadanom prostoru (Laboratorij za energetska postrojenja FSB-a).
3. Izraditi matematički model fotonaponskog polja i energetske jezgre, te provesti simulacije u MATLAB/Simulink - u s ciljem procjene ponašanja cijelog sustava u procesu starta nakon ispada glavne mreže do uspostave zadane radne točke (uz pretpostavku omskog opterećenja od 2 kW).

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

24. rujna 2020.

Datum predaje rada:

26. studenoga 2020.


Predviđeni datum obrane:

30.11. – 4.12.2020.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MEng. AE.

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
SAŽETAK.....	X
SUMMARY .....	XI
1. Uvod.....	1
2. Općenito o vodiku .....	2
3. Proizvodnja, pohrana i primjena vodika .....	4
3.1. Proizvodnja vodika.....	4
3.1.1. Sivi vodik.....	4
3.1.2. Zeleni vodik .....	5
3.2. Pohrana vodika .....	8
3.2.1. Kemijska pohrana vodika .....	9
3.2.2. Fizička pohrana vodika .....	9
3.3. Primjena vodika.....	10
3.3.1. Vodik kao sirovina.....	10
3.3.2. Vodik kao tranzicijsko gorivo.....	11
3.3.2.1. Zrakoplovstvo.....	13
3.3.2.2. Nautika .....	13
3.3.2.3. Vlakovi.....	14
3.3.2.4. Vozila za prijenos tereta.....	15
3.3.2.5. Autobusi .....	16

3.3.2.6. Osobna vozila .....	17
3.3.2.7. Bicikl na vodik razvijen na FSB-u Zagreb .....	18
4. Energetski sustav temeljen na vodiku i sunčevoj energiji .....	20
4.1. Glavni dijelovi sustava energetske jezgre .....	20
4.1.1. FN članci .....	20
4.1.2. Elektrolizator .....	23
4.1.3. Kompresor .....	24
4.1.3.1. Elektrokemijski kompresor .....	25
4.1.3.2. Mehanički kompresor .....	26
4.1.4. Svežanj gorivnih članaka .....	27
4.1.5. Spremnik .....	29
4.2. Matematički modeli sustava energetske jezgre .....	30
4.2.1. Model FN modula .....	30
4.2.2. Model PEM elektrolizatora .....	38
4.2.3. Model kompresora .....	41
4.2.3.1. Elektrokemijski kompresor .....	41
4.2.3.2. Klipni kompresor .....	43
4.2.3.3. Usporedba elektrokemijskog i klipnog kompresora .....	44
4.2.4. Model svežnja gorivnih članaka .....	46
4.2.5. Model spremnika .....	50
4.3. Rezultati simulacija energetske jezgre u MATLAB/Simulink-u .....	55
4.3.1. Regulacija tlaka spremnika PID regulacijom .....	57
4.3.2. „ON-OFF“ Regulacija tlaka vodika u spremniku .....	60
4.3.3. Scenarij 1 .....	63
4.3.4. Scenarij 2 .....	64

---

4.3.5. Scenarij 3 .....	65
5. Odabir tržišno raspoloživih komponenta energetske jezgre sustava .....	66
5.1. FN modul .....	66
5.2. Svežanj PEM elektrolizatora .....	67
5.3. Kompresor .....	68
5.4. Svežanj gorivnih članaka .....	69
5.5. Spremnik .....	70
5.6. Troškovnik sustava energetske jezgre .....	70
6. Smještaj eksperimentalnog energetskeg sustava temeljenog na vodiku i sunčevoj energiji u Laboratoriju za energetska postrojenja FSB-a .....	73
7. ZAKLJUČAK .....	75
LITERATURA .....	76



## POPIS SLIKA

Slika 1. Shema procesa reformiranja ugljikovodika pomoću vodene pare [4].....	5
Slika 2. Elektroliza vode [5].....	7
Slika 3. Pohrana vodika [8].....	8
Slika 4. Spremnik s metalnim hidridima [10].....	9
Slika 5. Fizički spremnik vodika [11].....	10
Slika 6. Gorivni članak [13].....	12
Slika 7. Zrakoplov na vodik [14].....	13
Slika 8. Plovilo na vodik [15].....	14
Slika 9. Vlak na vodik [16].	15
Slika 10. Viličar na vodik [17].....	15
Slika 11. Autobus koji koristi vodik kao pogonsko gorivo [18].....	17
Slika 12. Električno vozilo na vodik [19].....	18
Slika 13. Prvi hrvatski bicikl na vodik.	19
Slika 14. Izgled monokristalne i polikristalne strukture FN članka [22].....	22
Slika 15. „Thin-film“ [22].....	22
Slika 16. Prikaz procesa kod PEM elektrolizatora i PEM gorivnog članka. Može se primijetiti da membrana propušta vodikov H <sup>+</sup> ion, dok hidroksilne OH <sup>-</sup> ne propušta [24].....	24
Slika 17. PEM elektrokemijski kompresor vodika [27].....	26
Slika 18. Mehanički kompresor vodika [29].....	27
Slika 19. Ulazne i izlazne komponente gorivnog članka.....	28
Slika 20. Svežanj gorivnih članaka [12].....	29
Slika 21. Prikaz MPP točke za različite količine ozračenja.....	32
Slika 22. Prikaz UI karakteristike FN modula za različita ozračenja.....	33
Slika 23. Simulink blok model FN niza.....	34

Slika 24. Sunčevo ozračenje.....	35
Slika 25. Utjecaj promjene broja paralelno potavljenih modula na ukupnu snagu FN niza ....	36
Slika 26. Utjecaj promjene broja serijski spojenih FN modula na ukupnu snagu .....	37
Slika 27. Optimalan raspored FN niza za rad elektrolizatora .....	37
Slika 28. Simulink model bloka svežnja PEM elektrolizatora.....	40
Slika 29. Utjecaj temperature na rad PEM elektrolizator.....	41
Slika 30. Simulink blok modela klipnog i elektrokemijskog kompresora .....	44
Slika 31. Tlak na katodi u ovisnosti o naponu za elektrokemijski kompresor.....	45
Slika 32. Snaga klipnog/elektrokemijskog kompresora .....	46
Slika 33. Simulink blok model svežnja gorivnih članaka .....	48
Slika 34. UI karakteristika svežnja gorivnih članaka .....	49
Slika 35. UI karakteristika gorivnih članaka za različite površine.....	49
Slika 36. Simulink blok spremnika vodika koji se temelji na jednadžbi stanja realnog plina .	53
Slika 37. Tlak vodika u spremniku.....	54
Slika 38. Prikaz cijelog sustava u trajanju od 48 sati .....	55
Slika 39. Prikaz referentnog stanja tlaka vodika u spremniku .....	57
Slika 40. PID regulacija tlaka vodika u spremniku .....	58
Slika 41. Snaga iz FN niza i glavne mreže (PID regulacija).....	59
Slika 42. Energetski sustav pri PID regulaciji.....	60
Slika 43. Tlak spremnika pri "On-Off" regulaciji .....	61
Slika 44. Snaga iz konvencionalne mreže .....	62
Slika 45. Sustav energetske jezgre pri "On-Off" regulaciji.....	62
Slika 46. Scenarij 1.....	63
Slika 47. Scenarij 2.....	64
Slika 48. Scenarij 3.....	65

Slika 49. Odabrani monokristalni FN moduli [36] .....	67
Slika 50. Odabrani svežanj PEM elektrolizatora [46].....	68
Slika 51. Elektrokemijski kompresor[47] .....	69
Slika 52. Odabrani svežanj PEM gorivnih članaka [33] .....	70
Slika 53. Planirani smještaj FN modula .....	73
Slika 54. Eksperimentalna staza sustava energetske jezgre .....	74

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Značajke vodika [3].....	3
Tablica 2. Karakteristike tipova fotonaponskog članka .....	21
Tablica 3. Konstantne vrijednosti matematičkog modela FN modula .....	31
Tablica 4. Vanjska temperatura.....	35
Tablica 5. Konstantne vrijednosti PEM elektrolizatora .....	39
Tablica 6. Konstantne vrijednosti elektrokemijskog kompresora .....	43
Tablica 7. Konstantne vrijednosti klipnog kompresora .....	44
Tablica 8. Konstantne vrijednosti svežnja gorivnih članaka.....	47
Tablica 9. Konstantne vrijednosti spremnika vodika .....	52
Tablica 10. Regulacije i realni scenariji sustava energetske jezgre .....	56
Tablica 11. Značajke FN monokristalnog modula .....	66
Tablica 12. Značajke odabranog svežnja PEM elektrolizatora .....	67
Tablica 13. Značajke elektrokemijskog kompresora.....	68
Tablica 14. Značajke svežnja PEM gorivnih članaka [33].....	69
Tablica 15. Značajke spremnika.....	70
Tablica 16. Troškovnik glavnih dijelova energetske jezgre.....	71
Tablica 17. Troškovnik pojedinih scenarija .....	72

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\alpha_a$	-	Koeficijent prolaska vode na anodi
$\alpha_k$	-	Koeficijent prolaska vode na katodi
$a$	(L <sup>2</sup> bar)/mol <sup>2</sup>	Empirijska konstanta za vodik (0,2476 (L bar)/mol <sup>2</sup> )
$b$	L/mol	Empirijska konstanta za vodik (0,02661 L/mol)
$b'$	m <sup>3</sup> /mol	Isključeni volumen
$C$	m <sup>-3</sup>	Specifična gustoća
$e$	-	Elektron
$E_0$	V	Standardni potencijal
$E_{A,anode}$	V	Aktivacijski napon na anodi
$E_{A,katode}$	V	Aktivacijski napon na katodi
$E_{\check{c}}$	V	Napon otvorenog kruga
$E_Q$	$\Omega$	Stalni otpor članka
$F$	C/mol	Faradejeva konstanta (96490 C/mol)
$i$	A/cm <sup>2</sup>	Gustoća struje
$i_{o,a}$	A/cm <sup>2</sup>	Promjenjiva gustoća struje anode
$i_{o,k}$	A/cm <sup>2</sup>	Promjenjiva gustoća struje katode
$I_{phc}$	A	Foto struja
$I_{sc}$	A	Struja kratkog spoja FN članka
$k$	J/K	Boltzmannova konstanta (1,38 *10 <sup>-23</sup> J/K)
$M$	kg/mol	Molarna masa
$m$	kg	Masa vodika
$n$	mol	Množina tvari
$N_A$	mol <sup>-1</sup>	Avogadrova konstanta (6,022·10 <sup>23</sup> mol <sup>-1</sup> )
$N_c$	-	Broj članaka
$n_p$	-	Broj paralelno spojenih FN modula
$n_s$	-	Broj serijski spojenih FN modula
$p$	Pa	Tlak plina
$p_a$	bar	Tlak na anodi
$p_k$	bar	Tlak na katodi
$R$	J/molK	Plinska konstanta (8.314 J/(molK))
$r$	m	Polumjer
$R_{\check{c}}$	$\Omega$	Otpor članka elektrolizatora
$R_g$	J/(kgK)	Plinska konstanta za vodik (4124,18 J/(kgK))
$R_s$	$\Omega$	Serijski otpor
$R_{sc}$	$\Omega$	Otpor kratkog spoja FN članka
$T$	K	Temperatura elektrolizatora
$t$	h	Vrijeme
$t'$	°C	Temperatura elektrokemijskog kompresora
$T_a$	K	Temperatura anode
$T_c$	K	Temperatura FN članka
$T_k$	K	Temperatura katode
$U$	V	Radni napon FN članka
$U$	V	Ukupni napon članaka
$U_a$	V	Prenapon anode
$U_{akt}$	V	Aktivacijski napon kod gorivnog članka

$U_{Gč}$	V	Napon svežnja gorivnih članaka
$U_k$	V	Prenapon katode
$U_{konc}$	V	Napon gubitaka masenog toka
$U_{Nernst}$	V	Nernstov potencijal
$U_{ohm}$	V	Otpor gorivnog članka
$U_{uk}$	V	Ukupni napon elektrokemijskog kompresora
$V_m$	m <sup>3</sup> /mol	Molarni volumen
$Z$	-	Faktor stlačivosti
$\sigma$	S/cm	Provodljivost materijala membrane
$I$	A	Radna struja FN članka
$I_{ph}$	A	Početno generirana struja
$I_r$	A	Povratno generirana struja
$T_1$	K	Ulazna temperatura vodika u stupanj kompresora
$W_{I,II}$	J/mol	Specifični radovi kompresora
$W_{I,II}$	J/mol	Specifični radovi kompresora
$W_{komp}$	W	Ukupni obavljeni rad kompresora
$\dot{m}_{iz}$	kg/s	Izlazni maseni tok
$\dot{m}_{ul}$	kg/s	Ulazni maseni tok
$n$	-	Politropski koeficijent
$n_{ul}$	mol/s	Ulazni tok vodika u kompresor
$n_{ul}$	mol/s	Ulazni tok vodika u kompresor
$p_i$	bar	Vrijednosti tlaka (na ulazima i izlazima pojedinih stupnjeva)
$\delta$	cm	Debljina materijala membrane
$\lambda$	-	Sadržaj vode u membrani
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća

## SAŽETAK

Danas se uz sve veći broj instaliranih elektrana na obnovljive izvore energije (OIE) javlja problem njihove intermitentnosti. Također, svakodnevno smo svjedoci klimatskim promjenama koje uzrokuju mnoštvo elementarnih nepogoda. Rezultat toga je sve češći pad elektroenergetske mreže koji se danas osigurava uglavnom starim, bučnim i zagađujućim dizel agregatima.

Slijedom toga cilj ovog diplomskog rada bio je projektirati energetska „back-up“ sustav temeljen na zelenom vodiku kojim se osigurava konstantno opterećenje sustava od 2 kW 48 sati nakon ispada iz glavne mreže. Taj sustav se sastoji od fotonaponskih modula, PEM elektrolizatora, elektrokemijskog kompresora, PEM svežnja gorivnih članaka te spremnika vodika. Nakon što je detaljno opisan svaki od dijelova sustava, dani su matematički modeli za svaki dio sustava. Pomoću matematičkih modela napravljene su simulacije za svaki dio sustava u MATLAB/Simulink Software-u. Isto je napravljeno za cijeli sustav zajedno gdje su uz referentnu simulaciju napravljene dvije dodatne regulacije samog sustava te tri moguća scenarija.

Uvidom u dobivene rezultate simulacije odabrane su tržišno raspoložive komponente energetske jezgre sustava. Za navedene komponente sustava napravljen je koncept eksperimentalne staze te smještaj istih u Laboratoriju za energetska postrojenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB) u Zagrebu gdje se očekuje eksperimentalna validacija samih simulacija.

**Ključne riječi:** vodik, back-up sustav, dizel agregati, obnovljivi izvori energije, PEM elektrolizator, FN polje, Elektrokemijski kompresor, PEM svežanj gorivnih članaka, spremnik vodika

## SUMMARY

Nowadays, due to the growing number of installed power plants based on renewable energy sources (RES), there is a problem with their intermittency. Climate change is increasing the frequency and severity of natural disasters globally. The result is an increasingly frequent breakdown of the electricity network, which today is secured mainly by old, noisy, and polluting diesel generators.

Consequently, this thesis aimed to design an energy "back-up" system based on green hydrogen which ensures a constant system load of 2 kW 48 hours after the breakdown of the electricity network. This system consists of photovoltaic (PV) modules, a PEM electrolyzer, an electrochemical compressor, a PEM fuel cell stack, and a hydrogen tank. After each of the parts of the system is described in detail, mathematical models for each part of the system are given. Using mathematical models, simulations were made for each part of the system in MATLAB/Simulink Software. The same was done for the entire system where, in addition to the reference simulation, two additional regulations of the system and three possible scenarios were made.

Insight into the obtained simulation results, the commercially available components of the energy core of the system were selected. For these components of the system, an experimental path was envisaged and their placement in the Power Engineering Laboratory of the Faculty of Mechanical engineering and Naval Architecture (FSB) in Zagreb, where experimental validation of the simulations is expected.

**Key words:** Hydrogen, Back-up system, Diesel generators, Renewable energy sources, PEM electrolyzer, PV panels, Electrochemical compressor, PEM fuel cells stack, Hydrogen storage tank



## 1. Uvod

Prema posljednjim istraživanjima 2050. godine na Zemlji će živjeti preko 10 milijardi ljudi. Slijedom te činjenice neizbježna je globalna tendencija rasta potrošnje električne energije. Premda zaliha fosilnih goriva još ima dovoljno, povećanje koncentracije ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) u Zemljinoj atmosferi treba zaustaviti što je prije moguće. Uz svima poznati Pariški sporazum, Hrvatska je izradila strategiju Niskougljične Hrvatske. Tranzicija prema OIE je dugačak proces u kojem veliku ulogu uz političke odluke igra osviještenost građana cijelog svijeta pa tako i Hrvatske.

Uz navedenu sveobuhvatnu tranziciju na OIE veliku ulogu igra zeleni vodik. Pošto su vjetar i Sunce, kao predvodnici energetske tranzicije na OIE, uglavnom intermitentne naravi potrebno će biti izgraditi mnogo novih postrojenja koja će služiti kao svojevrsni spremnik energije. Baš po tom pogledu, vodik je uz baterije predvodnik sustava za pohranu energije.

Sustavi za pohranu vodika u obliku plina pružaju izvrsnu priliku za transformaciju električne energije proizvedene iz fosilnih goriva u električnu energiju proizvedenu korištenjem OIE, uravnotežujući intermitentne OIE, posebno na lokalnoj i regionalnoj razini.

Međutim, uz intermitentnost OIE javlja se i jedna druga neželjena situacija pri opskrbi električne energije. To je ispad električne mreže. Naravno da većina ljudi može preživjeti neko vrijeme bez električne energije, no postoje mjesta na kojima ispad električne mreže nije dopustiv. To su mjesta kao što su bolnice, dizala, telekomunikacije itd. Za upravljanje u takvim kritičnim situacijama danas se uglavnom koriste dizel agregati koji ispuštaju velike količine štetnih plinova u atmosferu. Međutim, zeleni vodik je izvrsna zamjena starim i zagađujućim dizel agregatima.

Slijedom toga, ovaj diplomski rad je usredotočen na kombinaciju proizvodnje vodika koja se temelji na metodama elektrolize vode i sunčeve energije, a služiti će kao „back-up“ sustav pri ispadau električne mreže. Nadalje, cilj ovog rada je optimizirati i dimenzionirati sustav koji može podnijeti opterećene od 2 kW nakon ispada iz glavne mreže te prikazati (simulirati) energetske sustav baziran na sunčevoj energiji i vodik u sljedećih 48 sati nakon ispada iz mreže.

## 2. Općenito o vodik

Vodik je element s najjednostavnijim atomom u periodnom sustavu elementa te se nalazi pod rednim brojem 1.

Atom vodika ( $H_2$ ) prvi se put spominje kod Velikog praska te se smatra da je tada i nastao. Pri standardnoj temperaturi i tlaku, vodik je bez boje, okusa i mirisa. Nalazi se u skupini nemetala, visoko je zapaljiv i netoksičan.

Vodik se na Zemlji ne nalazi u elementarnom stanju, već ga nalazimo u, npr. Vodi i ugljikovodicima. Vodik ima posebno važnu ulogu u kiselobaznim reakcijama, jer većina kiselinsko-baznih reakcija uključuje razmjenu protona između topljivih molekula. U ionskim spojevima, vodik može poprimiti oblik negativnog naboja (aniona) kada je poznat kao hidrid ili kao pozitivno nabijena (kationa) vrsta označena simbolom  $H^+$ .

Zanimljiva je informacija da kada bi se sva primarna energija u Republici Hrvatskoj od oko 200 PJ preračunala u vodik preko donje ogrijevne vrijednosti vodika dobila bi se količina od čak 1,667 milijardi tona vodika [1].

Početak istraživanja proizvodnje vodika iz organskih spojeva veže se za početak 16. stoljeća gdje se vodik ispuštao u reakcijama kiseline i metala u obliku plina. Kasnije, pred kraj 18. stoljeća, Henry Cavendish bio je prvi koji je prepoznao da je plin vodik diskretna tvar gdje kao nusprodukt u procesu izgaranja nastaje voda. Po toj značajki je kasnije i dobio ime „Hydrogen“, što na Grčkom jeziku znači „Proizvođač vode“ [2].

U Tablici 1. navedene su osnovne značajke vodika.

Tablica 1. Značajke vodika [3]

Značajke vodika	
<b>Agregatno stanje na sobnoj temperaturi</b>	Plin
<b>Talište</b>	13,99 K
<b>Vrelište</b>	20,271 K
<b>Gustoća (20° C)</b>	0,0898 g/L
<b>Trojna točka</b>	13,8 K, 70,41 kPa
<b>Toplina taljenja</b>	0,117 kJ/mol
<b>Toplina isparavanja</b>	0,904 kJ/mol
<b>Molarni toplinski kapacitet</b>	28,836 J/(mol K)

### 3. Proizvodnja, pohrana i primjena vodika

#### 3.1. Proizvodnja vodika

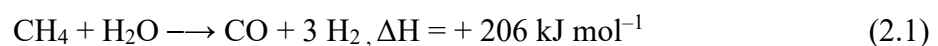
Postoje dvije temeljne podjele proizvodnje vodika. To je tzv. sivi vodik (proizvodnja vodika procesom reformiranja ugljikovodika vodenom parom) te zeleni vodik koji se proizvodi procesom elektrolize uz korištenje električne energije dobivene iz OIE.

##### 3.1.1. Sivi vodik

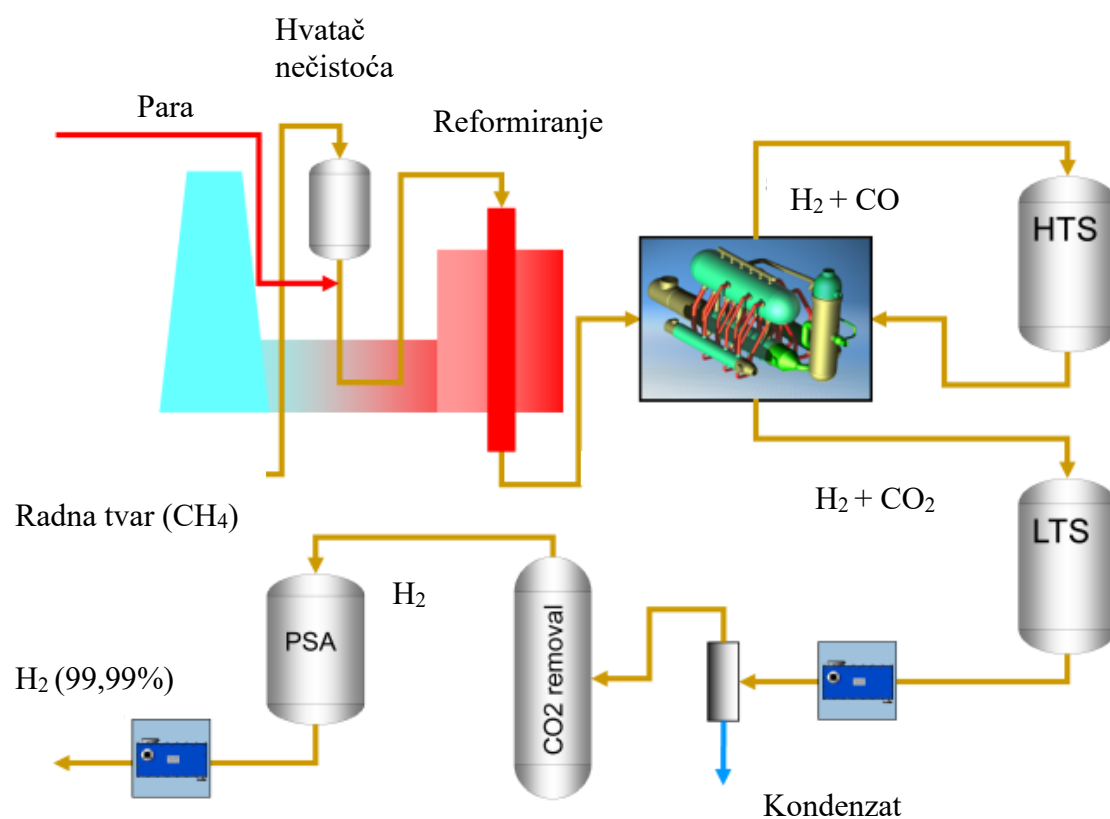
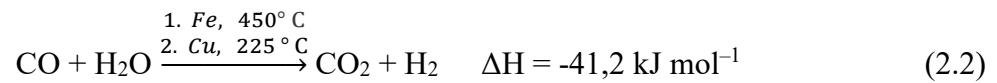
Najjeftiniji i najrasprostranjeniji način proizvodnje vodika danas je proces reformiranja ugljikovodika vodenom parom (Sika 1.). To je ujedno i proces proizvodnje vodika uz popratne emisije CO<sub>2</sub>. Zbog toga taj proces nije ekološki prihvatljiv, no trenutno se koristi u najvećoj mjeri.

Proces započinje miješanjem procesnog plina s pregrijanom parom pri povišenim temperaturama do 1000 °C u prisutnosti katalizatora. Višak topline koristi se za stvaranje visokotlačne pregrijane pare u sustavu kotla s otpadnom toplinom. Za ovaj sustav postavljaju se vrlo visoki zahtjevi. Ne samo da treba maksimizirati povrat energije iz procesnog plina kako bi se maksimizirala proizvodnja pare, već visoke temperature i protok procesnog plina također skraćuju vijek trajanja i izazivaju velika naprezanja [4].

Metan (CH<sub>4</sub>) reagira s vodom te nastaje vodik i ugljikov monoksid (CO) kao nusprodukt koji se vraća nazad u sustav. Dovedena toplina tada iznosi 206 kJ/mol. Smjesa CH<sub>4</sub> i vodene pare (u molnom omjeru 3,6/1) predgrijava se izmjenjivačem topline s izlaznim dimnim plinom do 400 °C te zatim zagrijava u cijevnom reaktoru s Ni-katalizatorom pri 800 °C. Time se postiže čistoća vodika od oko 90 % te se sekundarnom pretvorbom dolazi do 99,5 % [5].



Korištenjem CO utroškom dodatne oslobođene energije (41,2 kJ/mol) moguće je dobiti dodatne količine vodika.

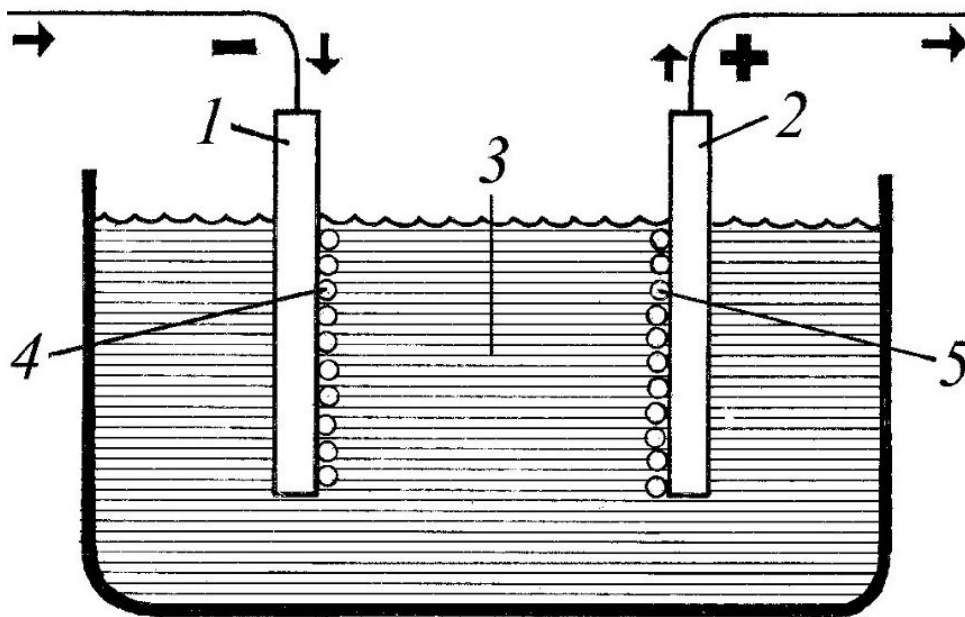


Slika 1. Shema procesa reformiranja ugljikovodika pomoću vodene pare [4]

### 3.1.2. Zeleni vodik

Zeleni vodik se proizvodi elektrolizom vode koja električnu energiju koristi isključivo iz OIE.

Elektroliza je elektrokemijska reakcija razlaganja vode uz prisustvo elektrolita djelovanjem električne struje kako je prikazano na slici 2. Ako se u otopinu ili talinu elektrolita urone elektrode spojene s izvorom istosmjerne električne struje, ioni nastali elektrolitskim razlaganjem bit će privučeni elektrodom suprotnog naboja. Negativno nabijeni ioni (anioni) putovat će prema pozitivnoj elektrodi (anodi), a pozitivno nabijeni ioni (kationi) prema negativnoj elektrodi (katodi). Na elektrodama se ioni izbijaju i izlučuju kao atomi ili kao molekule. Pritom anioni predaju anodi višak elektrona (oksidacija), a istodobno na katodi kationi primaju jednaku količinu elektrona (redukcija). Tako se posredovanjem iona elektricitet prenosi s jedne elektrode na drugu zbog čega kroz otopinu ili talinu teče električna struja. Anodni i katodni prostor odjeljuje se membranom kako bi se u otopini spriječilo mješanje kisika i vodika. Kako se tijekom elektrolize na objema elektrodama izlučuju različite tvari, stvara se galvanski članak pa se elektroliza može nastaviti samo ako je napon vanjskog izvora struje suprotan i veći od napona (elektromotorne sile) tako nastalog članka. Prema tome, da bi se ioni izbili na elektrodi, potreban je određeni napon (napon razlaganja) karakterističan za pojedine elektrolite. Kako su u vodenoj otopini prisutni raznovrsni ioni, na elektrodama će se izbijati ioni one tvari kojoj je napon razlaganja najmanji. Tako su npr. u vodenoj otopini natrijeva klorida (NaCl) prisutni ioni  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  i  $\text{OH}^-$ , a elektrolizom se na katodi izlučuje vodik i na anodi klor, jer je za to potreban najmanji napon. Time se u otopini nagomilavaju natrijevi i hidroksilni ioni, odnosno nastaje otopina natrijeva hidroksida (NaOH), odnosno lužine. Elektroliza je vrlo važna u metalurškom dobivanju mnogih metala iz njihovih ruda. Tako se dobivaju alkalijski metali, zemnoalkalni metali, aluminij, cink, klor, vodik, kisik, alkalijske lužine i soli hipokloriti, klorati i dr., rafiniraju se bakar, srebro, aluminij i plemeniti metali. Elektroliza je i osnova galvanotehnike, a primjenjuje se i u analitičkoj kemiji [5].



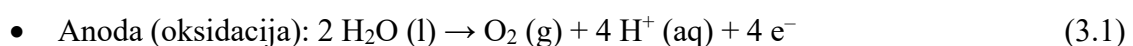
Slika 2. Elektroliza vode [5]

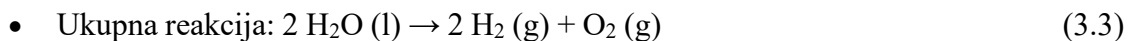
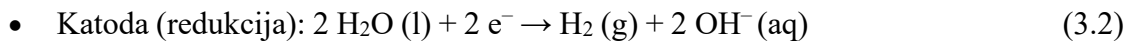
1. Katoda 2. Anoda 3. Elektrolit 4. Mjehurići vodika 5. Mjehurići kisika

Električni izvor napajanja spojen je na dvije elektrode, ili dvije ploče (obično od inertnog metala kao što su platina ili nehrđajući čelik) koje se nalaze u vodi. Voda se spontano razlaže na vodik i kisik, budući da pri standardnim uvjetima Gibbsova slobodna energija navedenog procesa iznosi 474,4 kJ/mol (radi se o endotermnom procesu). Iz tog se razloga elektroliza vode provodi u elektrolitičkom članku, koja se sastoji od dvije inertne elektrode (obično platinske) uronjene u vodu, koje služe kao anoda i katoda u procesu elektrolize. Elektroliza počinje primjenom vanjskog izvora napona između elektroda u prisutnosti elektrolita ili dovođenjem iznimno velike količine napona (ako se ne koristi elektrolit). Elektrolitskom disocijacijom će se vodik pojaviti na katodi (negativno nabijenoj elektrodi) uslijed redukcije, a kisik će se pojaviti na anodi (pozitivno nabijenoj elektrodi) uslijed procesa oksidacije. Ioni nastali elektrolitskom disocijacijom privučeni su na elektrode suprotnih naboja [6].

Razvijanje plinova uzrokuje nastanak mjehurića, koji se mogu vidjeti oko obje elektrode.

Sljedeće polureakcije opisuju navedene procese[7]:

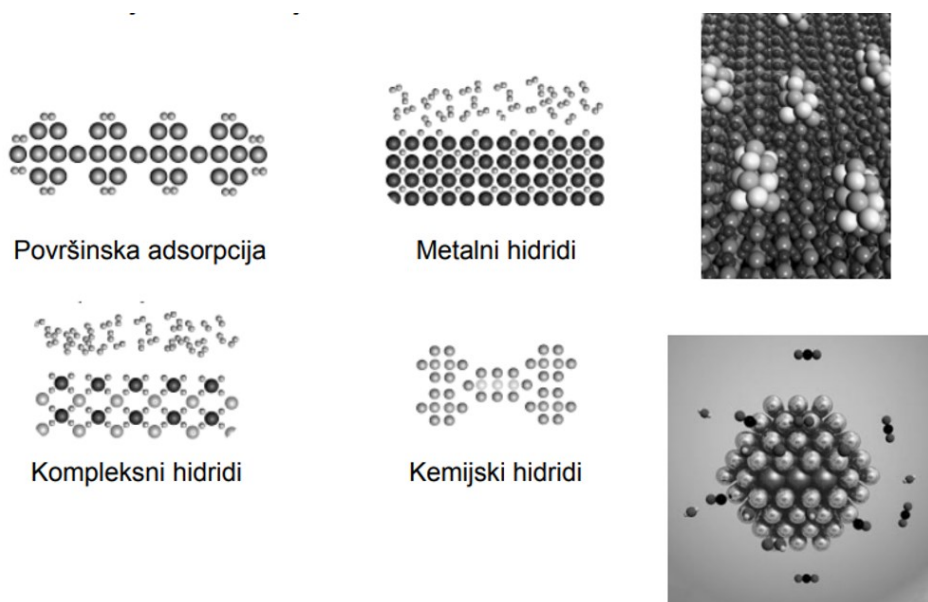




### 3.2. Pohrana vodika

U literaturama se može naići na različite podjele pohrane vodika. Jedna od općenitijih podjela je ona na masovnu i mobilnu pohranu. Pod mobilnom pohranom vodika se smatraju spremnici (punionice) vodika u vozilima dok se pod masovnom pohranom smatraju stacionarni spremnici (punionice). Po tipu agregatnog stanja vodik se pohranjuje u plinovitom ili tekućem stanju. U plinovitom stanju vodik se komprimira na tlakove od 350 bara i 700 bara radi povećanja gustoće pri pohrani. To je najčešći tip pohrane vodika u vozilima. Nedostatak mu je taj što iziskuje nabavu kompresora velikih kapaciteta. Veliki nedostatak pohrane vodika u tekućem stanju je taj što vodik kondenzira tek na  $-253 \text{ }^\circ\text{C}$  te je potrebno uložiti puno energije kako bi se vodik doveo u tekuću fazu te održavao na toj niskoj temperaturi.

Najznačajnija podjela je prema kemijskoj i fizičkoj pohrani vodika.



Slika 3. Pohrana vodika [8]



### 3.2.1. Kemijska pohrana vodika

Kemijska pohrana vodika može pružiti visoke značajke pohrane zbog jakog vezanja vodika i velike gustoće pri pohrani. Međutim, regeneracija materijala za pohranu još je uvijek problem. Veliki broj kemijskih sustava pohrane je još u fazi istraživanja. Ta istraživanja uključuju reakcije hidrogenacije/dehidrogenacije, amonijaka, borove hidride, alanate itd [9].

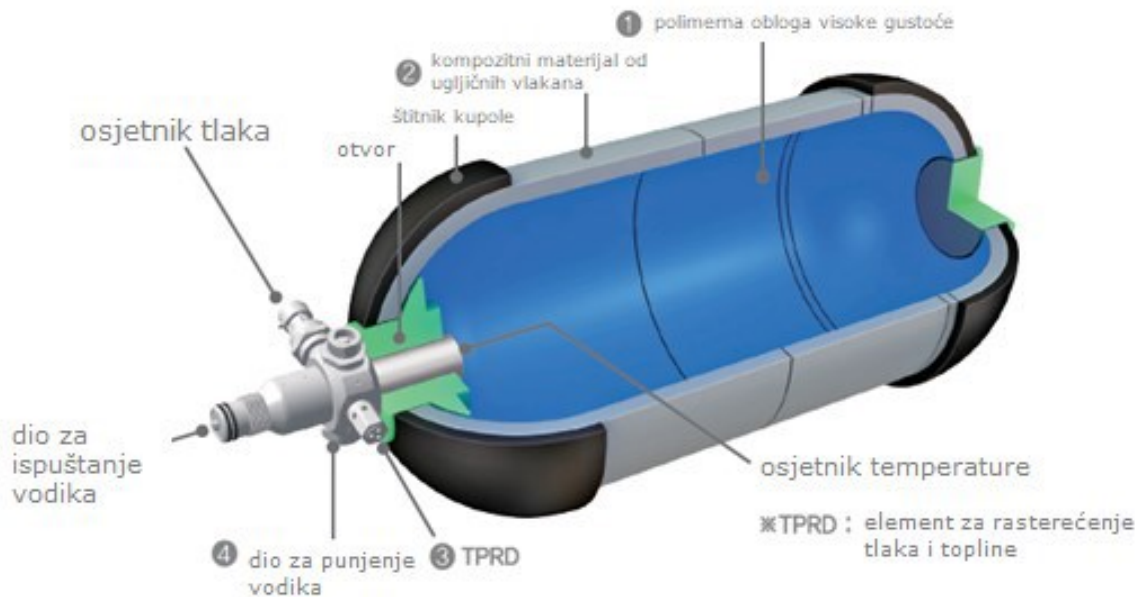
Najpoznatiji primjer kemijske pohrane vodika je spremnik s metalnim hidridima (Slika 4.).



Slika 4. Spremnik s metalnim hidridima [10]

### 3.2.2. Fizička pohrana vodika

U ovom slučaju vodik ostaje u fizičkim oblicima, odnosno kao plin, nadkritična tekućina, adsorbat ili molekularna inkluzija. Teorijska ograničenja i eksperimentalni rezultati uglavnom se odnose na volumen i gravimetrijsku sposobnost mikroporoznih i nanoporoznih medija, kao i na zahtjeve sigurnosti i vrijeme punjenja. Spremnik izvana izgleda kao konvencionalan spremnik za plin (Slika 5.). Međutim, građen je od posebnih materijala te su između slojeva provučena ugljična vlakna.



Slika 5. Fizički spremnik vodika [11]

### 3.3. Primjena vodika

Primjena vodika je višestruka te se koristi na različite načine. Glavna podjela primjene vodika je:

- Vodik kao sirovina (uloga prepoznata zadnjih nekoliko desetljeća)
- Vodik kao tranzicijsko gorivo.

#### 3.3.1. Vodik kao sirovina

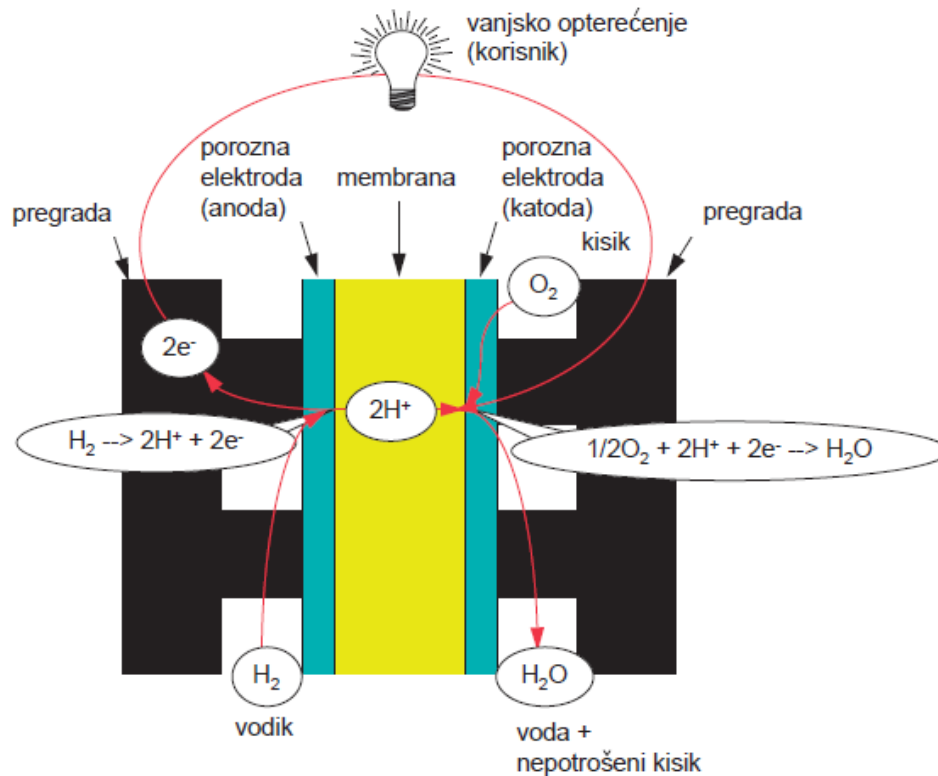
Vodik kao sirovina se koristi u raznim kemijskim i metalurškim industrijama. Isto tako, vodik je temeljno građevno sredstvo za proizvodnju amonijaka koji se nalazi u gnojivu i metanolu. Takav metanol se dalje koristi u proizvodnji polimera. Nadalje, u rafinerijama se vodik koristi za preradu različitih naftnih proizvoda. Dakle, oko 55% vodika proizvedenog u svijetu koristi se za sintezu amonijaka, 25% u rafinerijama i oko 10% za proizvodnju metanola.

Ostale primjene u svijetu čine samo oko 10% globalne proizvodnje vodika. Međutim, u ovom radu fokus će biti baš na tih 10% ostale primjene [12].

### 3.3.2. Vodik kao tranzicijsko gorivo

Kako je ranije spomenuto, u svijetu se trenutno samo 10% primjene vodika odnosi na vodik kao tranzicijsko gorivo. Mnogi znanstvenici smatraju da će se taj postotak uvelike povećati jer je vodik ključan u energetskej tranziciji.

Kada govorimo o primjeni vodika kao tranzicijsko gorivo ključnu ulogu igraju gorivni članci (eng. Fuel cell). Gorivni članak je elektrokemijski uređaj kojemu su reaktanti vodik i kisik, a glavni produkt je električna energija uz vodu i toplinu koji su jedini nusprodukti. U svom najjednostavnijem obliku, jedan gorivni članak sa za protone propusnom membranom (PEM), se sastoji od dvije elektrode, anode i katode, s krutim elektrolitom između njih (Slika 6.). Na anodi vodik reagira s katalizatorom, koji samo pospješuje reakciju, ali u njoj ne sudjeluje, stvarajući pozitivno nabijeni ion i negativno nabijeni elektron. Proton vodika tada prolazi kroz elektrolit, dok elektron putuje kroz vanjske spojne vodove stvarajući struju. Na katodi kisik reagira s ionom i elektronom, tvoreći vodu i korisnu toplinu.



Slika 6. Gorivni članak [13]

Vodik koji se koristi kao gorivo za transport može se podijeliti na dva tipa:

- Pri neizravnoj uporabi, vodik se koristi za proizvodnju krajnje energije ili se pomoću dodatnih koraka pretvorbe pretvara u plinovita ili tekuća goriva koja sadrže vodik. Takva goriva PtG (Power-to-Gas) i PtL (Power-to-Liquids) mogu se zauzvrat koristiti u toplinskim motorima. Ponekad se koristi i reformator, no to baš i nije ekonomski isplativo.
- U izravnoj uporabi, (čisti) molekularni vodik koristi se transportnim sredstvima izravno, odnosno bez daljnje pretvorbe, kao energent. U ovom se slučaju vodik može koristiti i u motorima s unutarnjim izgaranjem i u gorivnim člancima, odnosno svežnju gorivnih članaka.

U nastavku su navedeni primjeri izravne uporabe vodika iz gorivnih članaka.

### 3.3.2.1. Zrakoplovstvo

U civilnom zrakoplovstvu gorivni članci smatraju se potencijalnim dobavljačima energije za zrakoplove jer se već neko vrijeme koriste i u svemiru. Tako gorivni članci mogu opskrbljivati električnom energijom električni sustav zrakoplova kao sklopovi generatora za slučaj nužde ili kao pomoćna snaga. Napredniji pojmovi uključuju pokretanje glavnog motora i pogon kotača na nosu za kretanja u zračnoj luci komercijalnih zrakoplova. Također postoje planovi za putničke zrakoplove gdje bi vodik kemijski izgarao u mlaznim motorima i tako direktno pokretao zrakoplov.



Slika 7. Zrakoplov na vodik [14]

### 3.3.2.2. Nautika

Kao i u zrakoplovstvu, gorivni članci trenutno se testiraju u pomorstvu. Niskotemperaturni i visokotemperaturni PEM gorivni članci i gorivni članak s krutim oksidima (SOFC) trenutno su najperspektivnije vrste gorivnih članaka za nautičke primjene. Jedan od najvećih brodova sa svežnjom gorivnih članaka, „Viking Lady“, koristi gorivni članak s rastopljenim karbonatima

(MCFC) ukupne nazivne snage od 320 kW. Na Slici 8. nalazi se brod koji koristi isključivo OIE (vjetar, sunce i energiju vode) za pokretanje i punjenje baterija.



Slika 8. Plovilo na vodik [15]

### 3.3.2.3. Vlakovi

Vlakovi električnu energiju uzimaju preko stacionarnih strujnih vodiča (nadzemni vodovi) i FN članaka na vagonima. Međutim, iz tehničkih, ekonomskih ili drugih razloga, ne može se elektrificirati svaka željeznička pruga. Osobito na linijama s malim volumenom prometa, velika ulazna ulaganja koja su potrebna za elektrifikaciju vodova ne mogu uvijek biti opravdana.

Vlakovi koji koriste vodik kao energent mogu ponuditi dodatnu alternativu zato što vlakovi koji koriste električnu energiju iz svežnja gorivnih članaka ne emitiraju štetne emisije te im je dodatna prednost ta da su infrastrukturni troškovi niži u odnosu na iste s dizelskim pogonom. Na slici 9. prikazan je vlak na pogon vodikom.



Slika 9. Vlak na vodik [16].

#### 3.3.2.4. Vozila za prijenos tereta

Vozila s gorivnim člancima, poput viličara ili vučnih vozila (zračne luke), posebno su prikladni za unutarnju uporabu jer ne proizvode štetne emisije i ne proizvode veliku buku motora. Vozila s gorivnim člancima imaju prednosti nad vozilima s pogonom na baterije jer se mogu napuniti u roku od nekoliko minuta. Gorivni članci sa spremnikom vodika zauzimaju manje prostora i jeftiniji su za održavanje i popravak. Vozila na gorivne članke omogućavaju neprekidnu uporabu i stoga su posebno prikladni za rad u floti s više izmjena pri rukovanju s teškim materijalom. U slučaju većih voznih parkova u pogonu u više smjena, može se postići (umjereno) smanjenje troškova u usporedbi s baterijskom tehnologijom, a može se povećati i produktivnost u rukovanju materijalom.



Slika 10. Viličar na vodik [17]

### 3.3.2.5. Autobusi

U pogledu cestovnog prometa, autobusi u mreži javnog prijevoza su provjereno područje primjene vodika i gorivnih članaka. Od ranih 1990-ih, nekoliko stotina autobusa bilo je i radi s vodikom širom svijeta pretežno u Sjevernoj Americi, Europi, a sve više i u Aziji.

Iako se vodik u početku još uvijek koristio u autobusima s motorima s unutarnjim izgaranjem, proizvođači autobusa sada se uglavnom koncentriraju na autobuse s elektromotorima i gorivnim člancima (Fuel Cell Electric Vehicles-FCEV). Korištenje male flote FCEV promiče se u urbanim područjima kao način doprinosa tehnološkom razvoju i politici nultih štetnih emisija.

Zbog malog broja, još uvijek su mnogo skuplji (oko 1 000 000 EUR) od standardnih dizelskih autobusa, kojima je cijena 250.000 EUR. Troškovi održavanja su također znatno smanjeni, dok je domet povećan.

Ovisno o godišnjem broju proizvodnje, u budućim projektima troškovi proizvodnje za FCEV trebali bi i dalje padati. Predviđa se da će troškovi proizvodnje za autobuse do 12 m pasti na oko 350.000 EUR do 2030. godine, čime u potpunosti konkuriraju dizelskim hibridnim autobusima.

Moderni autobusi na gorivne članke dobivaju električnu energiju iz dva svežnja gorivnih članaka od kojih svaki ima približno 100 kW. Takvi modeli na krovu nose oko 30 do 50 kg komprimiranog vodika pohranjenog u spremnicima pod tlakom od 350 bara.

Domet takvih autobusa je od 300 do 450 km te time konkuriraju dizelskim autobusima u svakodnevnom radu. Premda neki stariji komunalni autobusi i dalje troše više od 20 kg vodika (umjesto 40 litara dizela) na 100 km, noviji autobusi s gorivnim člancima sada koriste samo 8 do 9 kg na 100 km, što FCEV daje energetska učinkovitost od oko 40% u usporedbi s dizelskim autobusima [18]. Na slici 11. prikazan je autobus na vodik.





Slika 11. Autobus koji koristi vodik kao pogonsko gorivo [18]

#### 3.3.2.6. Osobna vozila

Prvi osobni automobili s gorivnim člancima testirani su još u 1960-ima kao demonstracijski projekti. Novi poticaj razvoju gorivnih članaka uslijedio je 1990-ih. U većini slučajeva vozila za ispitivanje gorivnih članaka konstruirani su s opremljenim motorom s unutarnjim izgaranjem. Međutim, tada rani testni modeli još uvijek nisu bili ni tehnički ni ekonomski konkurentni. Osim toga, do prije desetak godina prototipovi benzinskih motora još uvijek su ispitivani vodikom kao gorivom s niskim emisijama. Bila su to vozila s modificiranim bivalentnim motorima koja su se mogla kretati i na benzin i na vodik.

Danas je kod osobnih automobila fokus u potpunosti na gorivnim člancima s pogonom na vodik.

Pretpostavka je da će se broj proizvedenih automobila s gorivnim člancima tijekom sljedećih godina kretati od nekoliko stotina do tisuća jedinica. Gotovo svi osobni automobili s gorivnim člancima danas su opremljeni PEM gorivnim člancima u serijskoj i paralelnoj postavi svežnja. Cijene za vozila srednje veličine opremljena gorivnim člancima i dalje su daleko iznad onih za osobna vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem te iznose oko 60 000 EUR. Očekuje se da će se troškovi gorivnih članaka znatno smanjiti te samim time i cijena vozila zbog pokretanja serijske proizvodnje FCEV.

Najnoviji modeli gorivnih članaka imaju učinak čak preko 100 kW. Danas imaju veći domet u usporedbi s električnim automobilom na baterije i to oko 400 do 500 kilometara. Uz to još imaju manju masu vozila i puno kraće vrijeme punjenja goriva koje iznosi od tri do pet minuta. U tlačnim spremnicima pri 700 bara imaju pohranjeno obično oko 5 kg vodika. Na slici 19. prikazan je osobni automobil na vodik.



Slika 12. Električno vozilo na vodik [19]

#### 3.3.2.7. Bicikl na vodik razvijen na FSB-u Zagreb

Na FSB-u u Zagrebu napravljen je prvi bicikl na vodik (Slika 14.) u ovom dijelu Europe. To je bicikl tipa „Pedalec“ koji je pogonjen elektromotorom, a koji električnu energiju za pokretanje elektromotora dobiva iz gorivnog članka.

Svežanj ugrađenih gorivnih članaka čini 60 članaka koji zajedno tvore PEM svežanj gorivnih članaka. Vodik je pohranjen u malom MH-spremniku pod tlakom od 30 bara. Ulazak vodika u svežanj gorivnih članaka reguliran je redukcijskim ventilom. U sustavu se također nalaze 3 ventilatora kako bi se odvodila stvorena toplina koja je jedan od nusprodukta u procesu dobivanja električne energije iz gorivnih članaka. Uz to se na biciklu još nalazi DC/DC pretvarač koji regulira dobiveni napon iz gorivnog članka. Cijeli taj sustav svežnja gorivnih članaka teži 7 kg dok cijeli bicikl teži oko 33 kg [20].



Slika 13. Prvi hrvatski bicikl na vodik.

## 4. Energetski sustav temeljen na vodiku i sunčevoj energiji

Kako je u uvodu rečeno glavni zadatak ovog diplomskog rada je postavljanje eksperimentalnog energetskog sustava baziranog na vodiku i sunčevoj energiji, odnosno zelenom vodiku. Taj sustav čine FN moduli, svežanj gorivnih članaka, svežanj elektrolizatora, kompresor te spremnik vodika. Cilj je optimizirati i dimenzionirati sustav koji može podnijeti opterećenje od 2 kW nakon ispada iz glavne mreže. U nastavku će biti detaljno objašnjeni glavni dijelovi sustava:

- FN članci
- Svežanj elektrolizatora
- Kompresor
- Svežanj gorivnih članaka
- Spremnik

Bitno je napomenuti da to nisu jedini dijelovi sustava. Za rad elektrolizatora potreban je separator za odvajanje vodika i kisika te priprema potrošne vode s pumpom za vodu. Tu su još osjetnici temperature, tlaka, separatori, ventili i brojne druge manje komponente za koje nisu napravljeni matematički modeli, no nalaze se na eksperimentalnoj stazi u Poglavlju 5.

### 4.1. Glavni dijelovi sustava energetske jezgre

#### 4.1.1. FN članci

FN članci omogućavaju direktnu pretvorbu Sunčeve energije u električnu energiju potrebnu za pogon elektrolizatora.

Dva su uvjeta koja moraju postojati unutar FN članka da bi došlo do proizvodnje električne energije:

- 1) Energija upadne svjetlosti mora biti dovoljno velika da prekine kemijsku vezu u materijalu i tako stvori slobodni par naboja,
- 2) U spoju oblika p-n mora postojati električna asimetrija.

Svaki poluvodički materijal ima vrlo važnu značajku koja se naziva „energijski procijep“, a označava minimalnu energetska razliku između njegove valencije i vodljivosti. Poluvodič upija

samo energiju fotona koja je veća od te vrijednosti. Optimalni FN članak nalazi se u rasponu od 1,4-1,5 eV. Ta vrijednost odgovara vršnom intenzitetu vidljive sunčeve svjetlosti. [21]

Danas se FN članci uglavnom proizvode od silicija, no postoje i izvedbe s galij-arsenidom i brojnim drugim halogenim elementima. Najčešće izvedbe FN članaka su:

- 1) Monokristalna,
- 2) Polikristalna,
- 3) „Thin-Film“,
- 4) Amorfna izvedba

Ta tri tipa se razlikuju po cijeni, načinu proizvodnje, značajkama, montaži, itd. Općenite značajke pojedinog tipa nalaze se u Tablici 2.

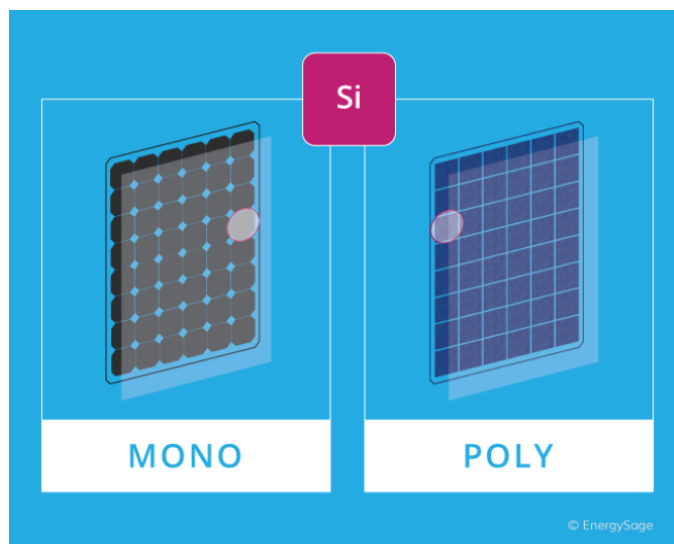
Tablica 2. Karakteristike tipova fotonaponskog članka

Tip FN članka	Prednosti	Nedostaci
<b>Monokristalni</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoka učinkovitost</li> <li>• Estetika</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Skuplji</li> </ul>
<b>Polikristalni</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jeftiniji</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manja učinkovitost</li> </ul>
<b>„Thin-film“</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fleksibilni i prijenosni</li> <li>• Lagani</li> <li>• Estetika</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manja učinkovitost</li> </ul>
<b>Amorfni</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jeftiniji</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manja učinkovitost</li> </ul>

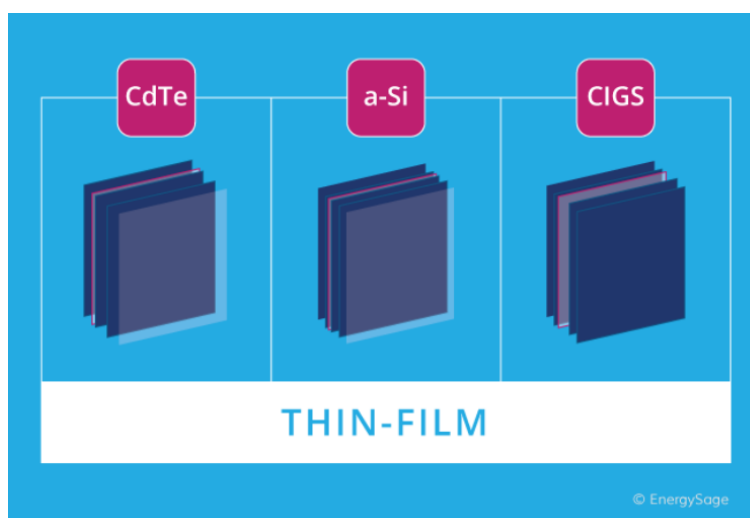
FN članci se u monokristalnoj i polikristalnoj izvedbi postavljaju u pravilne redove i stupce koji zajedno čine pravilni četverokut (Slika 14.). Monokristalni FN članci izrađeni su iz čistog kristala.

Polikristalni FN članci se sastoje od fragmenata kristala silicija koji se zajedno spajaju u kalupu prije rezanja. Dok su ova dva navedena tipa građena od samo jednog materijala, „Thin-film“ tip FN članka građen je od više vrsta različitih materijala (Slika 15.), no najkorišteniji je Kadmij-telurid (CdTe) [22].

Amorfni FN članak sadrži tanji sloj silicija od ostalih izvedba što uz jednostavniju strukturu u konačnici dovodi do niže cijene u odnosu na ostale tipove. No, stupanj učinkovitosti kod takvog tipa FN članka je značajno manji u odnosu na ostale te se prvenstveno koriste na mjestima gdje je potrebna manja nazivna snaga.



Slika 14. Izgled monokristalne i polikristalne strukture FN članka [22]

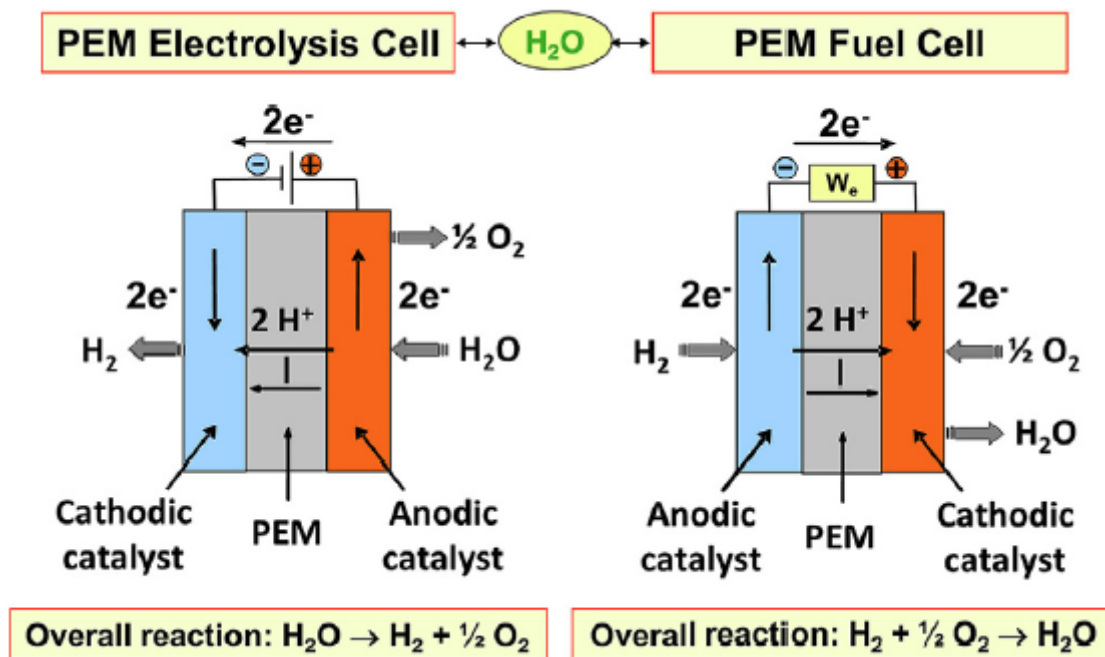


Slika 15. „Thin-film“ [22]

#### 4.1.2. Elektrolizator

Danas najčešći korišteni elektrolizator je PEM elektrolizator. On je prvenstveno je bio razvijen kako bi nadomjestio alkalijski elektrolizator kojeg obilježavaju neki nedostaci. Naime, PEM elektrolizator bolje podnosi malu gustoću struje, niski tlak i najvažnije, nagle promjene u jakosti struje. Kako se elektroliza vode za dobivanje vodika kao goriva najčešće odvija koristeći struju dobivenu iz OIE, elektrolizator mora biti fleksibilan po pitanju ulazne struje, primjerice, nepredvidivih vremenskih pojava. Kemijske reakcije koje se dešavaju u PEM elektrolizatoru su obrnute od reakcija u PEM gorivnom članku (Slika 16.). Ono što posebno odlikuje PEM elektrolizator je iznimno dinamična reakcija elektrolize kada se omogući dovoljan napon i struja. PEM elektrolizator može podnositi velike nate struje. Kod OIE to se često događa te nam zato on omogućava velike uštede. U suprotnome, nagle promjene jakosti struje dovele bi do toga da bi se izgubio značajan udio energije koji se mogao iskoristiti. To je u današnje vrijeme od velikog značaja kada nam je u interesu što bolje iskoristiti energiju koja nam je na raspolaganju. No, glavni nedostaci su skupi materijal te pojava povratne difuzije vodika kroz membranu. Također, PEM elektrolizator ima membranu debljine ~100-200  $\mu\text{m}$ , što je iznimno malo i zato su omski gubici mali. Razlog je lagano provođenje protona kroz membranu (otprilike 0.1 S/cm) [23].

Postoje brojne druge vrste elektrolizatora koje se razlikuju bilo prema vrsti elektrolita bilo prema radnoj temperaturi. Najpoznatiji predstavnici prema tipu su alkalni i PEM elektrolizator. Za izradu simulacije ovog rada odabran je upravo PEM elektrolizator.



Slika 16. Prikaz procesa kod PEM elektrolizatora i PEM gorivnog članka. Može se primijetiti da membrana propušta vodikov  $H^+$  ion, dok hidroksilne  $OH^-$  ne propušta [24]

#### 4.1.3. Kompresor

S obzirom na to da proizvedeni vodik iz elektrolizatora ima jako malu gustoću potrebno ga je dovesti na više energetska stanje, povisiti tlak te ga tako pohraniti. Da bi se postigla ta energetska gustoća potreban je kompresor vodika. Pohrana visokotlačnih plinova dobro je poznata i ekonomična metoda primjenjiva i na vodik. U ovom radu razmatrane su dvije vrste kompresora: klasični klipni kompresor te elektrokemijski kompresor.

Klasični pristup mehaničkoj kompresiji ograničen je velikom potrošnjom energije, trošenjem i habanjem pokretnih dijelova, bučnim radom, glomaznom opremom i onečišćenjem plina. [25] Korištenjem elektrokemijskog PEM sustava dobivamo alternativno sredstvo za podizanje energetske gustoće vodika (bilo masene bilo volumne). Kod korištenja pri manjim nazivnim

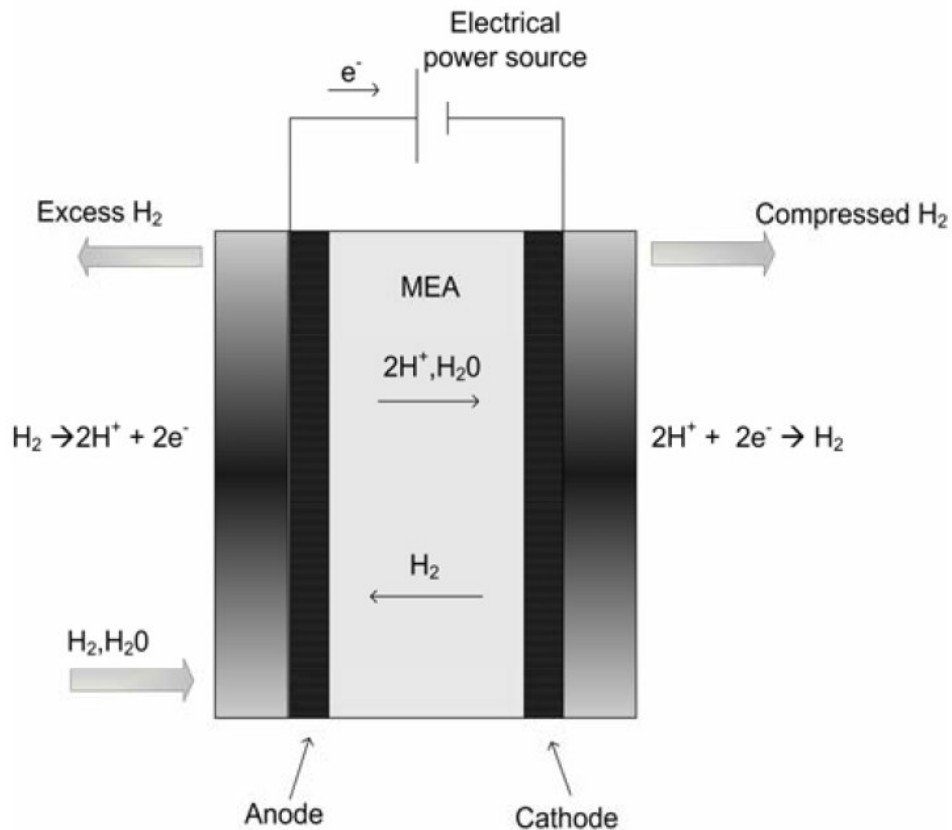


snagama, učinkovitost elektrokemijskog PEM kompresora je velika u usporedbi s klasičnom mehaničkom kompresijom.

Ostale prednosti pristupa elektrokemijskog kompresora su tihi rad, pročišćeni vodik i jednostavnost hlađenja sustava. [26] Te prednosti elektrokemijskog kompresora čine takav sustav kompetitivnim s konvencionalnim klipnim kompresorom. Elektrokemijski kompresor također može poslužiti kao međukorak mehaničke kompresije za povećanje kompresijskog kapaciteta i učinkovitosti smanjenjem broja stupnjeva kompresije.

#### *4.1.3.1. Elektrokemijski kompresor*

Vodik na anodi, kao što je prikazano na Slici 29., oksidira u protone ( $H^+$ ) primjenom razlike potencijala. Protoni se potom transportiraju kroz za protone propusnu membranu i ponovno se na katodi reduciraju u vodik. Vodik koji nastaje redukcijom protona u ograničenom katodnom prostoru komprimira se i ispušta pod visokim tlakom. Kako je membrana selektivna za vodik, komponente inertnog plina ne mogu proći membranu i tako se uklanjaju iz komprimiranog plina. Pošto elektrokemijski kompresor nema pokretnih dijelova, puno je jednostavniji za održavanje. Fleksibilnost veličine članaka omogućava ovom kompresoru postizanje visoke učinkovitosti [27].



Slika 17. PEM elektrokemijski kompresor vodika [27]

#### 4.1.3.2. Mehanički kompresor

Klipni kompresor je kompresor koji koristi klipove pogonjene radilicom za dovod plina pod visokim tlakom. Ulazni plin ulazi u usisni razvodnik te odlazi u kompresijski cilindar gdje se tlači klipom koji se giba translacijski putem radilice i zatim ispušta. Primjene uključuju rafinerije nafte, plinovode, kemijska postrojenja, postrojenja za preradu prirodnog plina, postrojenja za klimatizaciju i hlađenje te tlačenje vodika.

U klipnom kompresoru s ionskom tekućinom uklonjene su mnoge brtve i ležajevi, jer se ionska tekućina ne miješa s plinom. Životni vijek je oko 10 puta duži od uobičajenog membranskog kompresora sa smanjenim održavanjem tijekom uporabe te se samim time troškovi energije smanjuju za čak 20% [28].

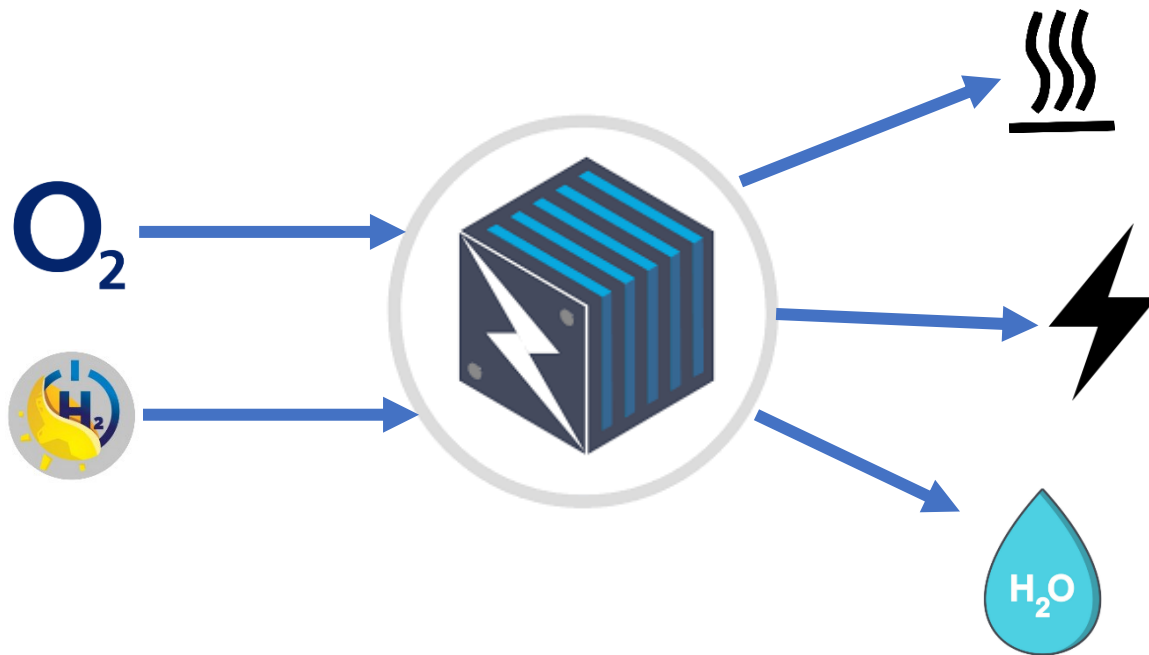


Slika 18. Mehanički kompresor vodika [29]

#### 4.1.4. Svežanj gorivnih članaka

O svežnju gorivnih članaka bilo je već riječi u 3. poglavlju ovog rada gdje se govorilo o primjeni vodika. Dakle, gorivni članak je elektrokemijski uređaj koji iz kemijske energije vodika proizvodi električnu energiju. Uz vodik je potreban kisik iz zraka (ili spremnika), dok su nusprodukti voda i toplina (Slika 19.).

Prve gorivne članke izumio je Sir William Grove 1838. godine dok je prva komercijalna uporaba gorivnih članaka uslijedila više od jednog stoljeća nakon što je Francis Thomas Bacon izumio gorivni članak vodik-kisik. Gorivni članci se koriste i NASA-inim svemirskim programima od sredine 1960-ih za proizvodnju električne energije za satelite i svemirske kapsule [30].

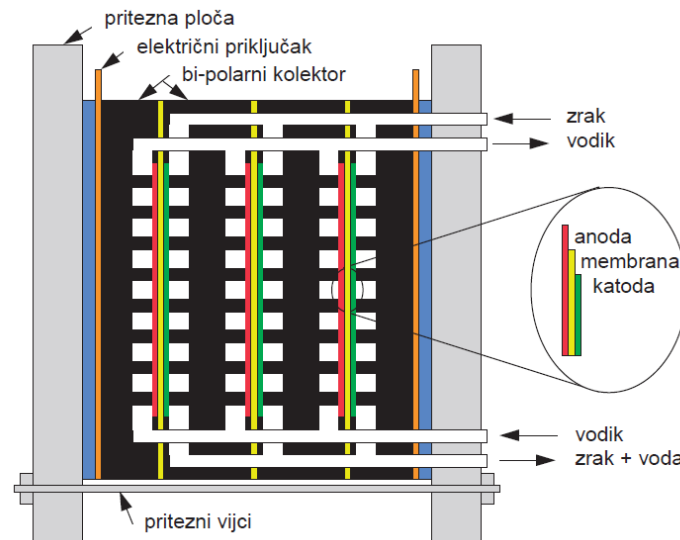


Slika 19. Ulazne i izlazne komponente gorivnog članka

Reakcije na anodi i katodi možemo opisati sljedećim kemijskim jednadžbama:



Postoje i različiti tipovi gorivnih članaka, no svima je zajedničko da se sastoje od anode, katode, membrane i elektrolita koji omogućavaju kretanje iona, pozitivno nabijenih vodikovih iona (protona), između dviju strana gorivnog članka. Na anodi katalizator uzrokuje reakcije oksidacije koje generiraju ione (pozitivno nabijene vodikove ione) i elektrone. Ioni se kreću od anode do katode kroz elektrolit. Istodobno, elektroni putuju od anode do katode kroz vanjski dio kruga te proizvode istosmjernu struju. Na katodi drugi katalizator uzrokuje reakciju iona, elektrona i kisika uz otpuštanje vode i topline. Gorivni članci klasificiraju se prema vrsti elektrolita koji koriste i prema razlici u vremenu pokretanja u rasponu od 1 sekunde za PEM gorivne članke do 10 minuta za gorivne članke s krutim oksidom. Jedan gorivni članak proizvodi relativno mali električni potencijal, oko 0,7 V pa se gorivni članci uglavnom slažu u svežanj gorivnih članaka (Slika 20) [31].



Slika 20. Svežanj gorivnih članaka [12]

Niskotemperaturni PEM gorivni članci uglavnom rade na radnoj temperaturi između 60 i 80 °C te im učinkovitost raste s porastom temperature. Međutim, gornja radna temperatura je ograničena materijalom membrane i uglavnom ne dostiže 100 °C.

Kako je ranije spomenuto postoji više različitih tipova gorivnih članaka koji se razlikuju po vrsti elektrolita. Neki od najpoznatijih su:

- Gorivni članak sa za protone propusnom membranom - PEMFC
- Gorivni članak s fosfornom kiselinom - PAFC
- Alkalni gorivni članak - AFC
- Gorivni članak s rastopljenim karbonatom - MCFC
- Gorivni članak s krutim oksidima - SOFC

Za energetska jezgru sustava u ovom radu odabran je svežanj PEM gorivnih članaka.

#### 4.1.5. Spremnik

Kako je ranije navedeno, vodik ima najveću energetska vrijednost po jedinici mase. Međutim, vodik je također najmanji kemijski element i jedan od najlakših na Zemlji pa mu je potrebno

povećati energetska gustoću po jedinici mase ili volumena. Ta visoka energetska gustoća sa sobom nosi visoke tlakove koji kompliciraju i otežavaju pohranu vodika. U poglavlju 3.3. su detaljno objašnjene sve metode pohrane vodika, kemijske i mehaničke. Za potrebe promatranog sustava i njegove simulacije u ovom radu odabrana je mehanička pohrana kompresijom plinovitog vodika u spremnik visokog tlaka.

## 4.2. Matematički modeli sustava energetske jezgre

Matematički modeli su napravljeni za glavne dijelove sustava energetske jezgre, a to su:

- FN modul
- PEM elektrolizator
- Kompresor
- Svežanj gorivnih članaka
- Spremnik vodika

### 4.2.1. Model FN modula

Matematički model FN modula opisan je sljedećim jednadžbama [38]:

$$I = I_{ph} - I_r * \left( \exp\left(\frac{U+I*R_s}{m*U_T}\right) - 1 \right) \quad (4.3)$$

$$f(I) = I_{ph} - I_r * \left( \exp\left(\frac{U+I*R_s}{m*U_T}\right) - 1 \right) - I = 0 \quad (4.4)$$

$$I_{ph} = I_{phc} * n_p \quad (4.5)$$

$$I_r = I_{sc} * n_p \quad (4.6)$$

$$R_s = R_{sc} * \frac{n_s}{n_p} \quad (4.7)$$

$$U_T = \frac{n_s * k * T_c}{e} \quad (4.8)$$

$$I_{phc} = I_{phc1000} * \frac{E(t)}{E_{1000}} \quad (4.9)$$

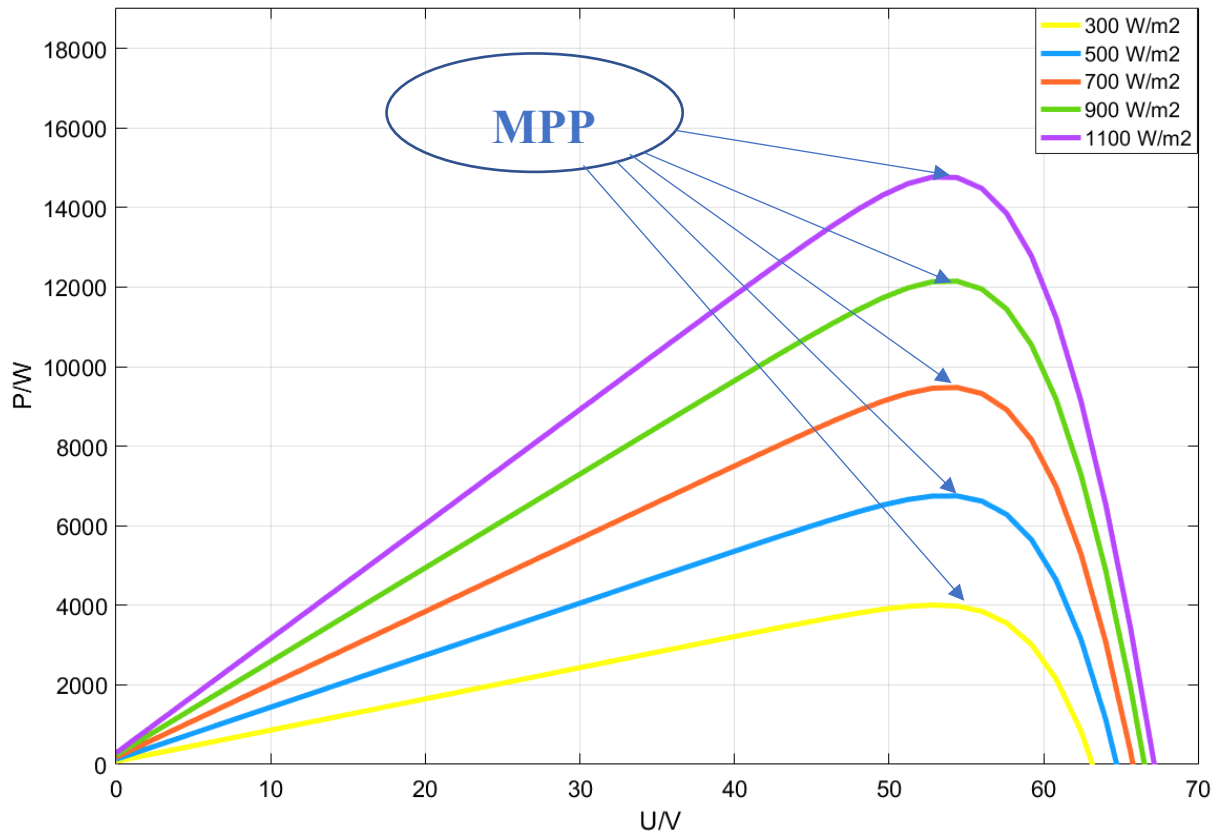
$$I_{sc} = I_{sc0} * T_c^3 * \exp\left(-\frac{E_g}{k*T_c}\right) \quad (4.10)$$

U sljedećoj tablici nalaze se konstantne vrijednosti koje su korištene u simulaciji (Tablica 3.).

Tablica 3. Konstantne vrijednosti matematičkog modela FN modula

$m$	1
$R_{sc}$	0,013558 $\Omega$
$n_s$	80
$n_p$	3
$I_{phc1000}$	3,27 A
$E_{1000}$	1000 W/m <sup>2</sup>
$k$	1,3806 * 10 <sup>-23</sup> J/K
$e$	1,60219 * 10 <sup>-19</sup> c
$I_{sc0}$	3,727873 A/K <sup>3</sup>
$E_g$	1,794 * 10 <sup>-19</sup> J

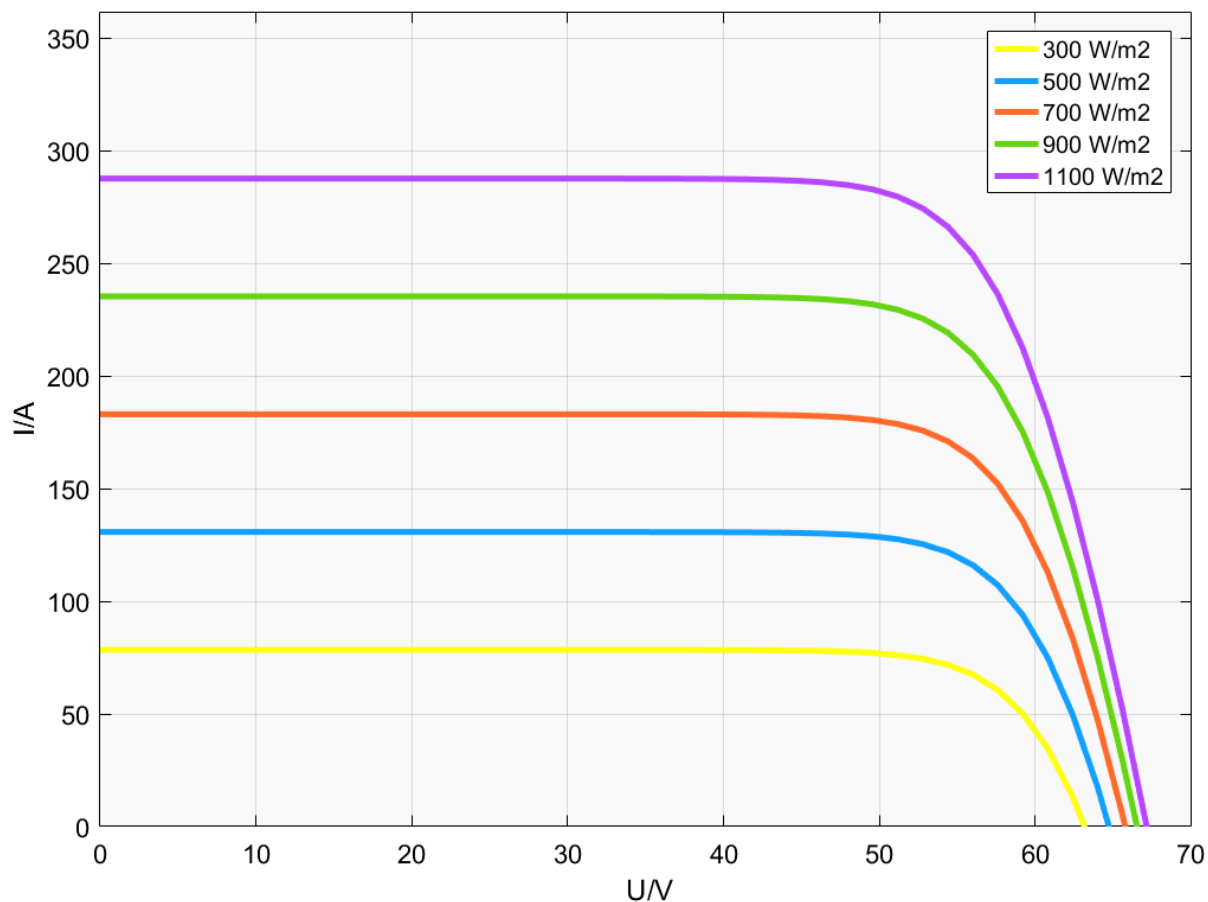
Za navedeni model napravljene su mnogobrojne simulacije kako bi se pronašla optimalna krivulja snage FN modula, odnosno kako bi se što više radna UI karakteristika elektrolizatora (bit će prikazano u sljedećem poglavlju) približila točki maksimalne snage FN modula („Maximum Power Point - MPP“). Ta točka se nalazi na mjestu krivulje UI karakteristike s najvišom vrijednosti snage (Slika 21.).



Slika 21. Prikaz MPP točke za različite količine ozračenja

Slika 22. prikazuje UI karakteristiku modeliranog FN modula za različite količine sunčevog ozračenja. Iz grafičkog prikaza zaključuje se da model FN modula radi korektno zbog karakterističnog toka radne UI karakteristike.



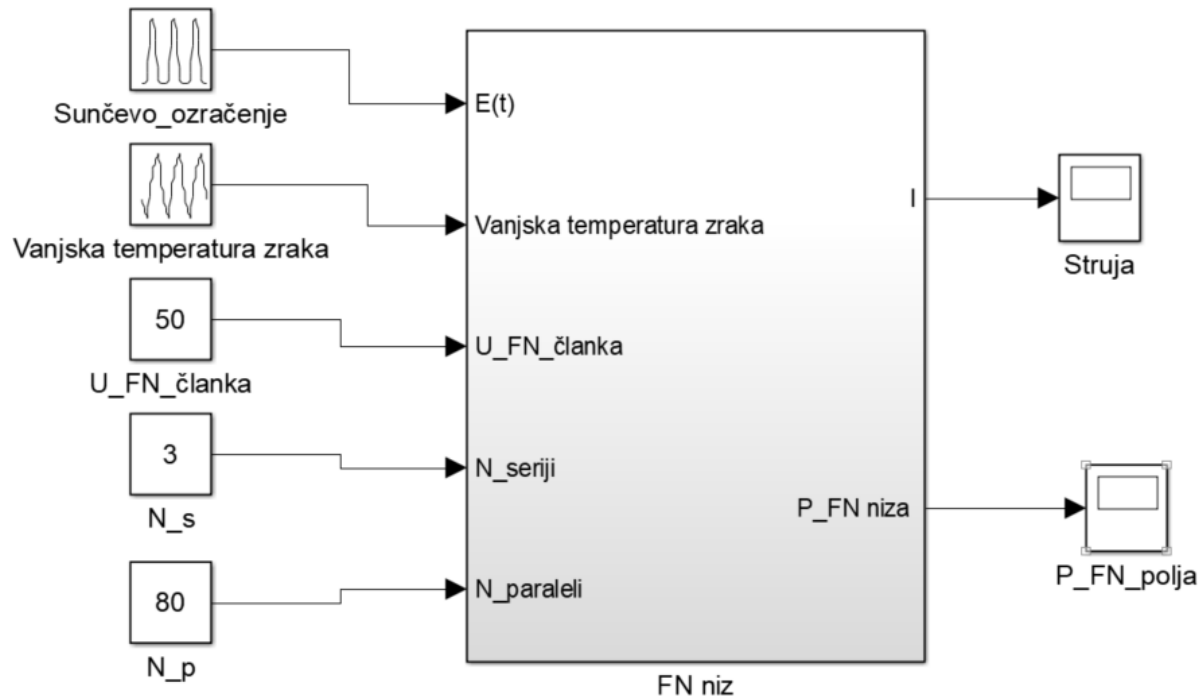


Slika 22. Prikaz UI karakteristike FN modula za različita ozračenja

Ulazni parametri pri izradi Simulink modela su sljedeći:

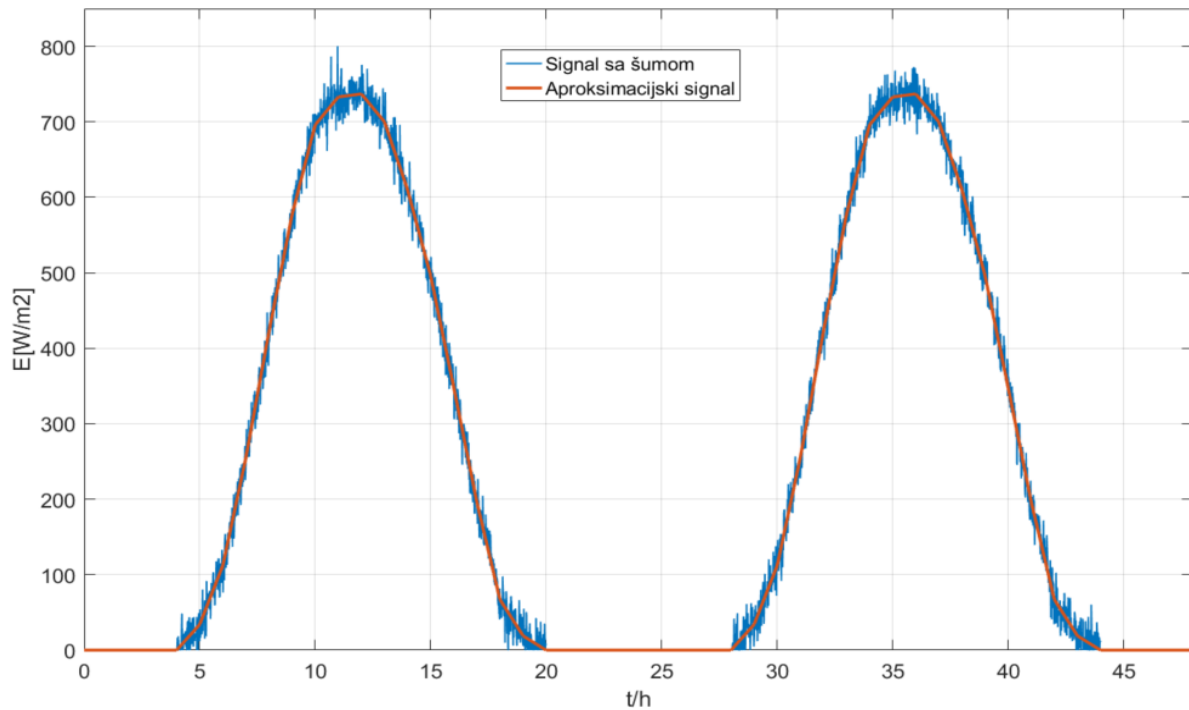
- 1) Sunčevo ozračenje (Zagreb)
- 2) Vanjska temperatura zraka (Zagreb)
- 3) Napon FN članka
- 4) Broj fotonaponskih članaka u seriji i paraleli

Glavna izlazna varijabla blok sustava FN modula je struja te snaga koja je dobivena množenjem trenutne struje s naponom (Slika 23.)



Slika 23. Simulink blok model FN niza

- 1) Za varijablu sunčevog ozračenja korišteni su podaci dva prosječna dana u mjesecu lipnju na lokaciji Zagreb. Iz satnih podataka sunčevog ozračenja napravljena je linearna interpolacija (aproksimacijski signal, Slika 24.). Također, ti podaci su korišteni za stvaranje šuma u rezultatima (signal sa šumom, Slika 24.) kako bi se dobio realni prikaz sunčevog ozračenja pod utjecajem strujanja oblaka i ostalih vremenskih promjena koje utječu na količinu sunčevog ozračenja.



Slika 24. Sunčevo ozračenje

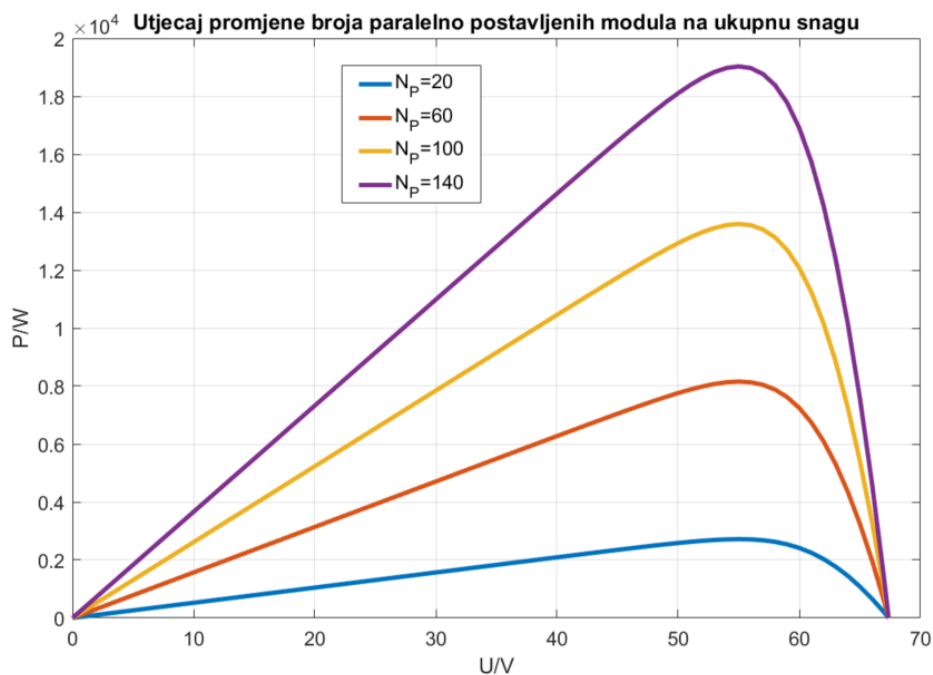
- 2) Za vanjsku temperaturu korišteni su satni podaci DHMZ-a za dva dana u lipnju koji su linearno aproksimirani.

Tablica 4. Vanjska temperatura

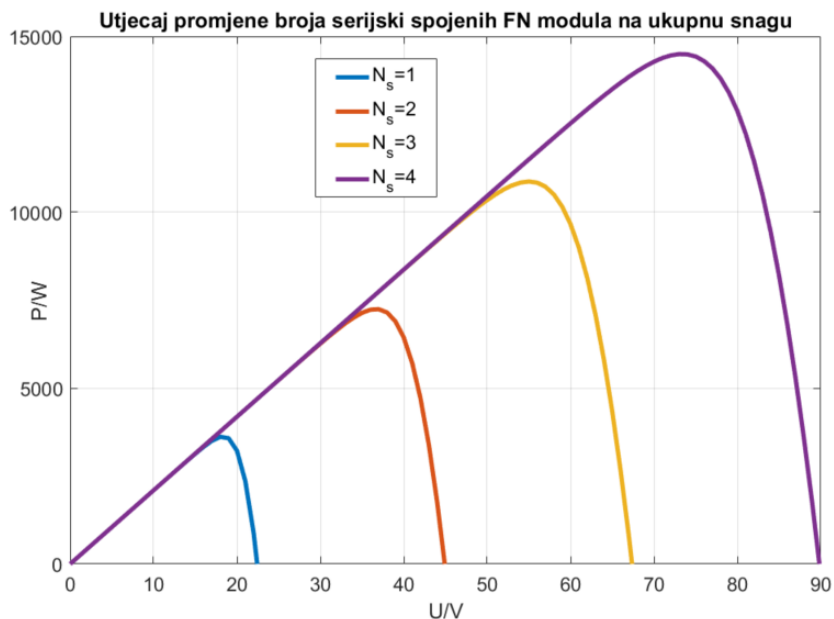
Vrijeme [h]	Temperatura [°C]	Vrijeme [h]	Temperatura [°C]	Vrijeme [h]	Temperatura [°C]
0	24	16	31,9	32	21,9
1	23,1	17	32,5	33	24,1
2	22,3	18	33	34	26
3	21,5	19	31,8	35	27
4	20,9	20	30,7	36	28
5	20,3	21	28	37	30
6	20	22	26,3	38	30,5
7	21,9	23	25,2	39	30,9
8	24,1	24	24	40	31
9	26	25	23	41	31
10	27	26	22	42	31,5
11	28	27	21,2	43	32
12	30	28	20,5	44	31
13	30,5	29	20	45	30
14	30,9	30	19,8	46	27
15	31,3	31	20	47	26,3
				48	25,2

- 3) Napon FN članka određen je kao konstanta te on ovisi o načinu proizvodnje FN članka te o njegovom modelu. Za izradu ove simulacije odabran je iznos od 50 V.
- 4) Broj FN modula u seriji i paraleli je izuzetno bitan za optimiranje sustava kao i za raspored postavljanja. Temeljni motiv odabira broja modula je bio u traženju optimalnog rješenja kako bi elektrolizator bio što je moguće bliže MPP. Pri tome nije previše vođeno računa o samoj montaži modula i potrebnoj površini za izgradnju FN niza, odnosno sunčane elektrane. Povećanjem broja modula u paraleli raste maksimalna snaga FN niza, dok maksimalno mogući napon ne ovisi o broju spojenih modula u paraleli (Slika 25.). Na Slici 25. je dani prikaz promjene krivulje snage s naponom pri konstantnom broju spojenih 3 modula u seriju.

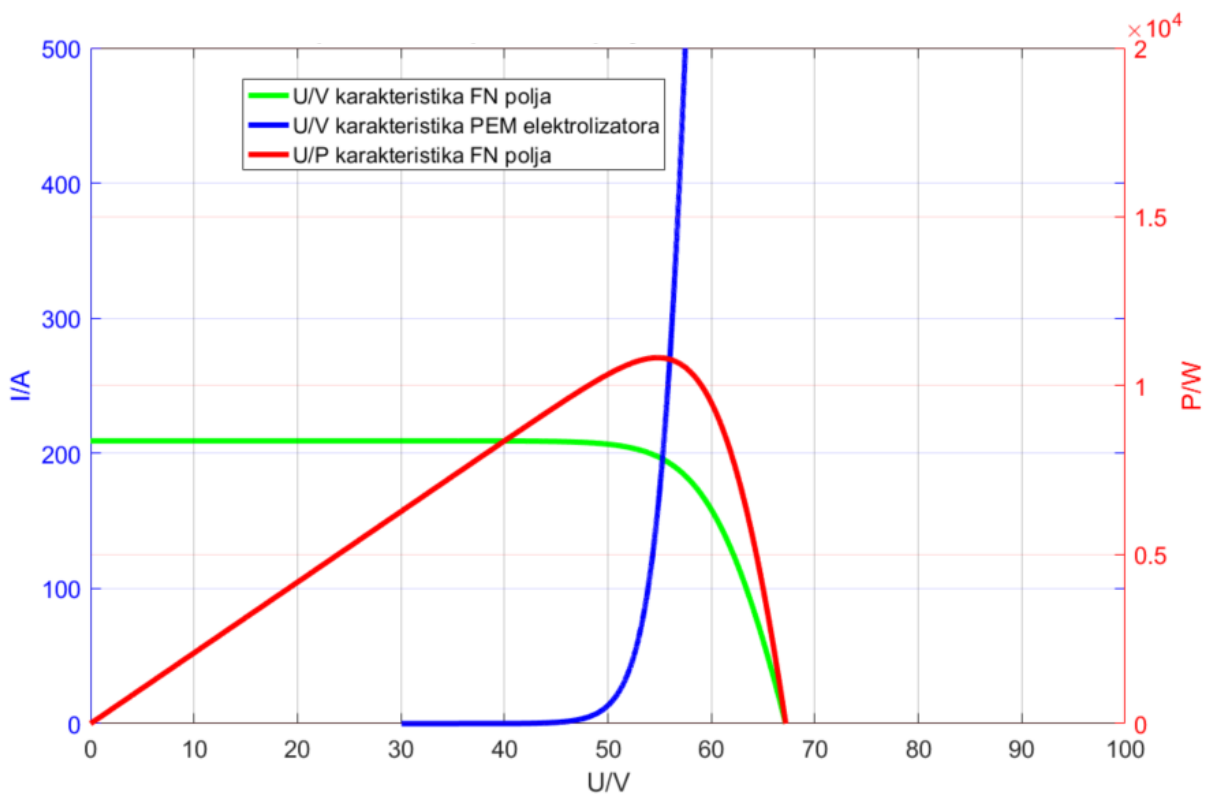
Nadalje, na slici 26. prikazana je ukupna snaga FN modula s promjenom broja serijski spojenih modula uz konstantan broj modula u paraleli koji iznosi 80. Uočava se da maksimalni mogući napon raste s brojem modula u seriji, dok je struja konstantna. Za daljnje simulacije odabrana postava označena žutom krivuljom na Slici 26.



Slika 25. Utjecaj promjene broja paralelno postavljene modula na ukupnu snagu FN niza



Slika 26. Utjecaj promjene broja serijski spojenih FN modula na ukupnu snagu



Slika 27. Optimalan raspored FN niza za rad elektrolizatora

Nakon napravljenih brojnih simulacija sustava energetske jezgre napravljena je optimalna raspodjela FN modula za svežanj PEM elektrolizator koji se sastoji od 25 članaka. Taj FN niz se sastoji od 3 serijski spojena modula te 80 paralelno spojena modula (Slika 27.).

#### 4.2.2. Model PEM elektrolizatora

Matematički model PEM elektrolizatora se najčešće prezentira polarizacijskom krivuljom, odnosno radnom UI karakteristikom, gdje su dvije varijable napon i struja. Model je baziran na sljedećoj jednadžbi [37]:

$$U = N_c(E_{\xi} + U_a + U_k + iR_{\xi}) \quad (4.11)$$

gdje je  $N_c$  broj članaka u svežnju,  $E_{\xi}$  je napon otvorenog kruga,  $U_a$  i  $U_k$  je prenapon anode i katode,  $i$  je gustoća struje i  $R_{\xi}$  je otpor članka u svežnju.

Napon otvorenog kruga se računa iz empirijske formule za atmosferski tlak koji ovisi o temperaturi, pri čemu je  $T$  temperatura elektrolizatora [39]:

$$E_{\xi} = 1,5184 - 1,5421 * 10^{-3}T * 9,523 * 10^{-5}T \ln(T) + 9,84 * 10^{-8}T^2 \quad (4.12)$$

Jednom kada struja prođe kroz članak elektrolizatora, stvarni napon za elektrokemijsku reakciju vode postaje viši od reverzibilnog potencijala članka elektrolizatora zbog nepovratnih gubitaka koji se javljaju u samom članku. Ti gubici se mogu podijeliti na gubitke aktivacije (Faradayske) i „ne-Faradayske“ gubitke (omski gubici koncentracije). Aktivacijski gubici su posljedica aktivacije elektrokemijske reakcije u kojoj dolazi do pomaka termodinamičke ravnoteže koja smanjuje brzinu reakcije odvijanja na površini anodne i katodne elektrode [40].

Neophodno je da se dio termodinamičkog potencijala članka izgubi jer se povećanjem naboja dešava promjena na aktivacijskoj barijeri. Aktivacijski gubici ( $U_a$  i  $U_k$ ) glavni su uzrok smanjenja učinkovitosti elektrolizatora, a računaju se iz sljedećih jednadžba [41]:

$$U_a = \frac{RT_a}{2\alpha_a F} \operatorname{arcsinh} \left( \frac{i}{2i_{0,a}} \right) \quad (4.13)$$

$$U_k = \frac{RT_k}{2\alpha_k F} \operatorname{arcsinh} \left( \frac{i}{2i_{0,k}} \right) \quad (4.14)$$

Konstantne vrijednosti korištene u simulaciji nalaze se u Tablici 5.

„Ne-Faradejski“ (Omski gubici) se odnose na otpor koji stvara materijal uslijed protoka protona. Veličina omskih gubitaka ovisi uglavnom o svojstvu materijala. Za smanjenje ovog potencijala vrlo je značajna tehnika i postupak proizvodnje. Omski gubici se računaju iz sljedeće formule [42]:

$$R_{\zeta} = \frac{\delta}{\sigma} \quad (4.15)$$

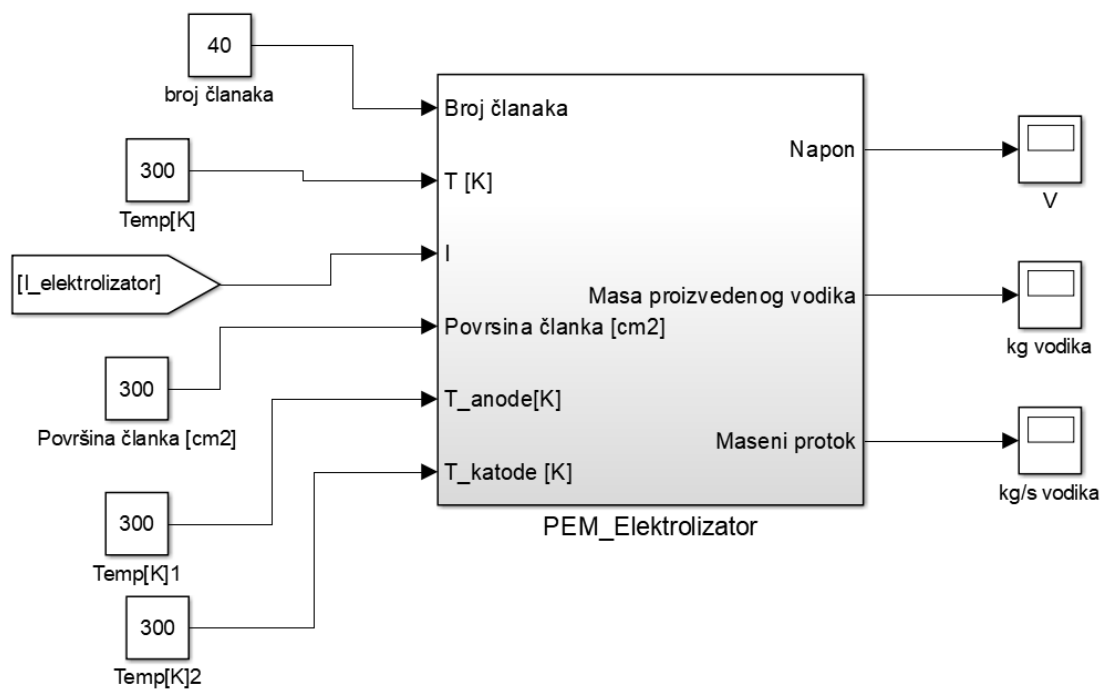
$$\sigma = (0,005139\lambda - 0,00326) \exp \left[ 1268 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.16)$$

Tablica 5. Konstantne vrijednosti PEM elektrolizatora

$R$	8,314 J/molK
$F$	96489 C/mol
$T_a$	288 K
$T_k$	288 K
$\alpha_a$	0,5
$\alpha_k$	0,25
$i_{0,a}$	0,001 A/cm <sup>2</sup>
$i_{0,k}$	0,0000008 A/cm <sup>2</sup>
$T$	288 K
$\delta$	0,05 cm
$\sigma$	0,012 S/cm
$\lambda$	1

Simulink model svežnja PEM elektrolizatora se sastoji od sljedećih ulaznih varijabla (Slika 27.):

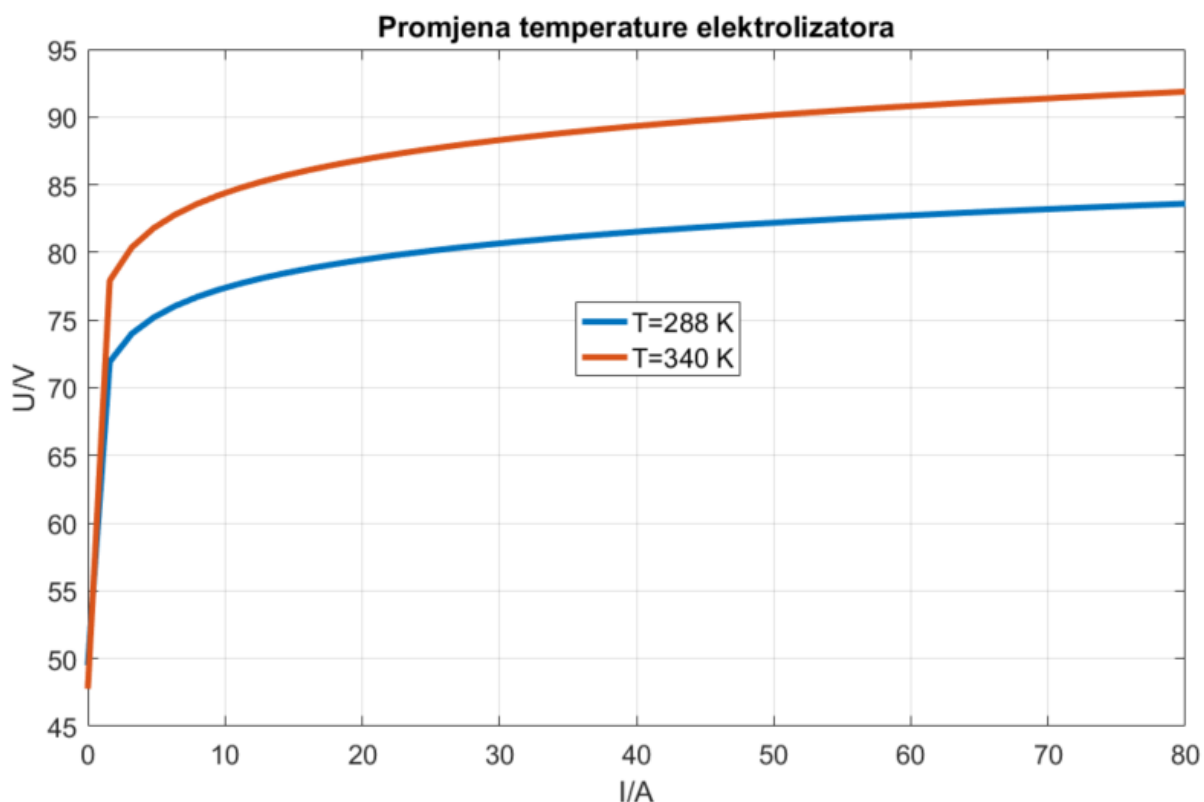
- 1) Broja članaka elektrolizatora,
- 2) Temperature elektrolizatora, anode i katode [K],
- 3) Struje [A],
- 4) Površine članka [cm<sup>2</sup>].



Slika 28. Simulink model bloka svežnja PEM elektrolizatora

Najvažnija izlazna varijabla je napon, koji pomnožen sa strujom daje trenutnu snagu. Nadalje, analiziran je utjecaj temperature na izlazni napon PEM elektrolizatora. Zaključuje se da uz konstantnu temperaturu anode i katode od 288 K, temperatura elektrolizatora ima dosta značajan utjecaj te da pri višim temperaturama daje veći napon (Slika 29.). Međutim, gornja granica temperature je ograničena samim materijalom te ona iznosi oko 80 °C. Na Slici 28. korišteni broj članaka je 40.





Slika 29. Utjecaj temperature na rad PEM elektrolizator

#### 4.2.3. Model kompresora

U ovom radu težnja je bila napraviti model elektrokemijskog kompresora te ga usporediti s klasičnim klipnim kompresorom.

##### 4.2.3.1. Elektrokemijski kompresor

Nernstov Potencijal:

Ukupni napon PEM članka uključuje Nernst-ov potencijal, polarizacijski (aktivacijski) napon i ohmski otpor.

Nernst-ov potencijal ovisi o razlici tlakova na anodi i katodi [27]:

$$U_{Nernst} = E_o + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{p_k}{p_a} \right) \quad (4.17)$$

Između elektrolizatora i elektrokemijskog kompresora nalazi se jedan međuspremnik koji osigurava da elektrolizator proizvodi vodik na tlaku do 10 bar što je ujedno i minimalni ulazni tlak za kompresor.

Aktivacijski napon:

Aktivacijski napon se sastoji od nepovratnih procesa koji se moraju prevladati primjenom potencijala na PEM članku prije nego što započne oksidacija i redukcija vodika. Za PEM članak koji radi kao elektrokemijski kompresor značajni su samo aktivacijski i omski prenaponi. Aktivacijska polarizacija je prenapon koji mora prevladati elektrokemijsku reakciju prije nego što reakcija nastupi. Taj se postupak modelira Tafelovom jednačbom. Tafelova jednačba za elektrokemijski postupak s neutralnom aktivacijskom polarizacijom na svakoj elektrodi može se opisati sljedećim jednačbama [27]:

$$E_{A,anode} = \frac{RT}{2\alpha_a F} \ln\left(\frac{i}{i_{oa}}\right) \quad (4.18)$$

$$E_{A,katode} = \frac{RT}{2\alpha_k F} \ln\left(\frac{i}{i_{ok}}\right) \quad (4.19)$$

gdje je  $i$  je trenutna gustoća struje, a površina članka je 300 cm<sup>2</sup>.

Stalni otpor PEM članka:

Stalni otpor primijenjenog napona na PEM članak predstavljen je kao omski prenapon. Veličina omskog gubitka ovisi o materijalu elektrode, materijalu elektrolita i kućištu između elektrode i elektrolita.

$$E_{\Omega} = \frac{\varphi}{\sigma} i \quad (4.20)$$

$$\sigma = 0,0007t' + 0,0574 \quad (4.21)$$

Ukupni napon se dobije iz:

$$U_{uk} = E_{Nernst} + E_{A,anode} + E_{A,katode} + E_{\Omega} \quad (4.22)$$

$$U_{uk} = E_o + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{p_k}{p_a}\right) + \frac{RT}{2\alpha_a F} \ln\left(\frac{i}{i_{oa}}\right) + \frac{RT}{2\alpha_k F} \ln\left(\frac{i}{i_{ok}}\right) + \frac{\varphi}{\sigma} i \quad (4.23)$$

Konstantne vrijednosti korištene u simulaciji nalaze se u Tablici 6.

Tablica 6. Konstantne vrijednosti elektrokemijskog kompresora

$E_o$	1 V
$T$	300 K
$i_{oa}$	$0,001 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$
$i_{ok}$	$0,001 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$
$p_k$	500 bar
$p_a$	10 bar
$\alpha_k$	0,5
$\alpha_a$	0,5
$\varphi$	0,000178 m
$t'$	20°C

#### 4.2.3.2. Klipni kompresor

Klipni kompresor je modeliran pomoću politrope s 2 stupnja i međuhlađenjem. Korištene su sljedeće jednačbe:

$$W_{komp} = n_{ul} * \frac{(W_I + W_{II})}{\eta_{komp}} \quad (4.24)$$

$$W_I = \frac{n * R * T_1}{n-1} * \left( 1 - \left( \frac{p_x}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right) \quad (4.25)$$

$$W_{II} = \frac{n * R * T_1}{n-1} * \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_x} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right) \quad (4.26)$$

$W_{komp}$  - ukupni obavljani rad kompresora [W]

$W_{I,II}$  - specifični radovi kompresora [J/mol]

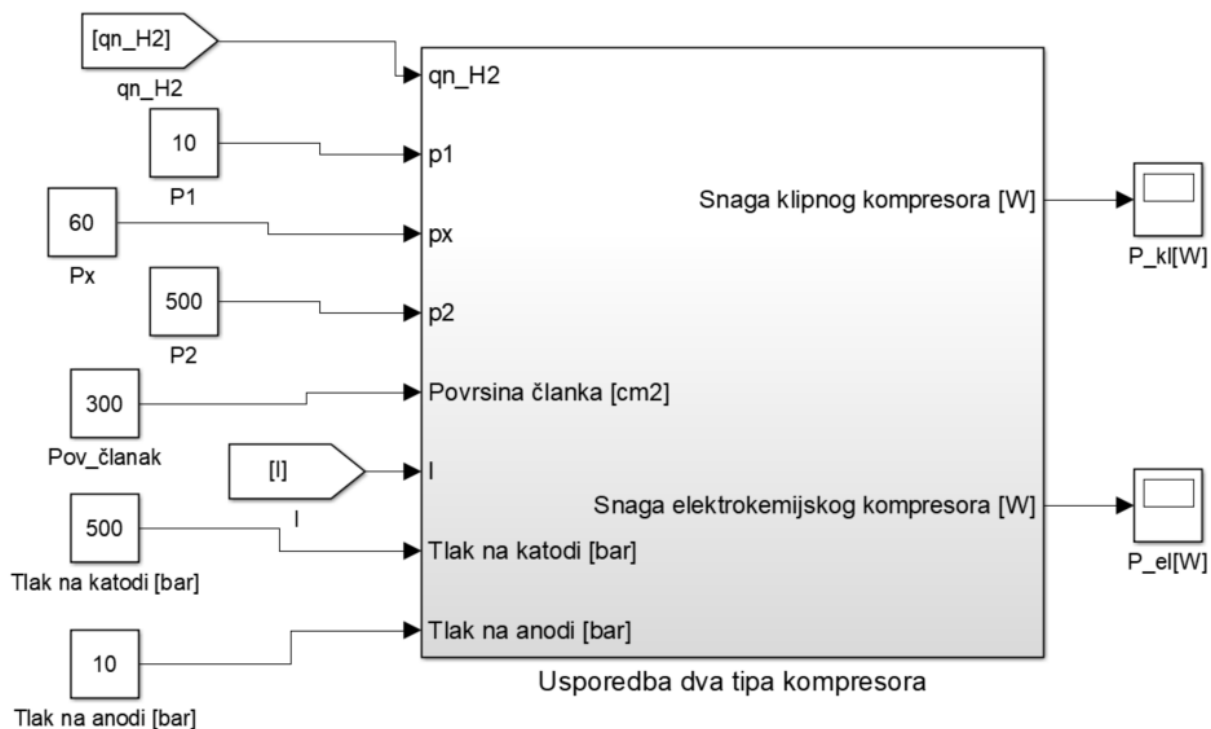
$n_{ul}$  - ulazni tok vodika u kompresor [mol/s]

Konstantne vrijednosti korištene u simulaciji nalaze se u Tablici 7.

Tablica 7. Konstantne vrijednosti klipnog kompresora

$n$	1,3
$R$	8314 J/kmolK
$T_1$	288 K
$p_1$	10 bar
$p_x$	60 bar
$p_2$	500 bar

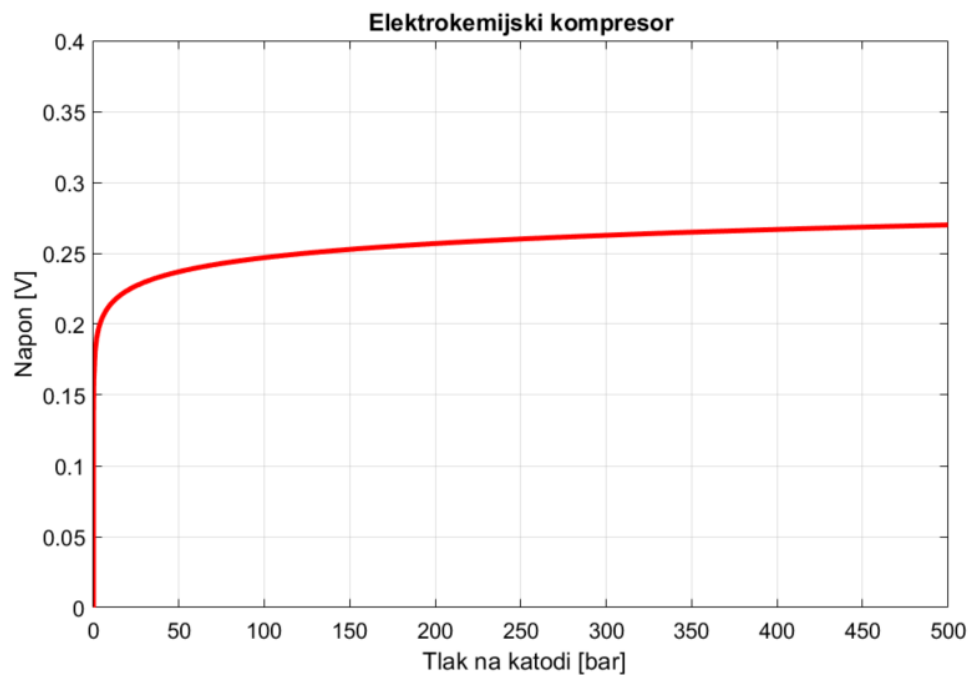
#### 4.2.3.3. Usporedba elektrokemijskog i klipnog kompresora



Slika 30. Simulink blok modela klipnog i elektrokemijskog kompresora

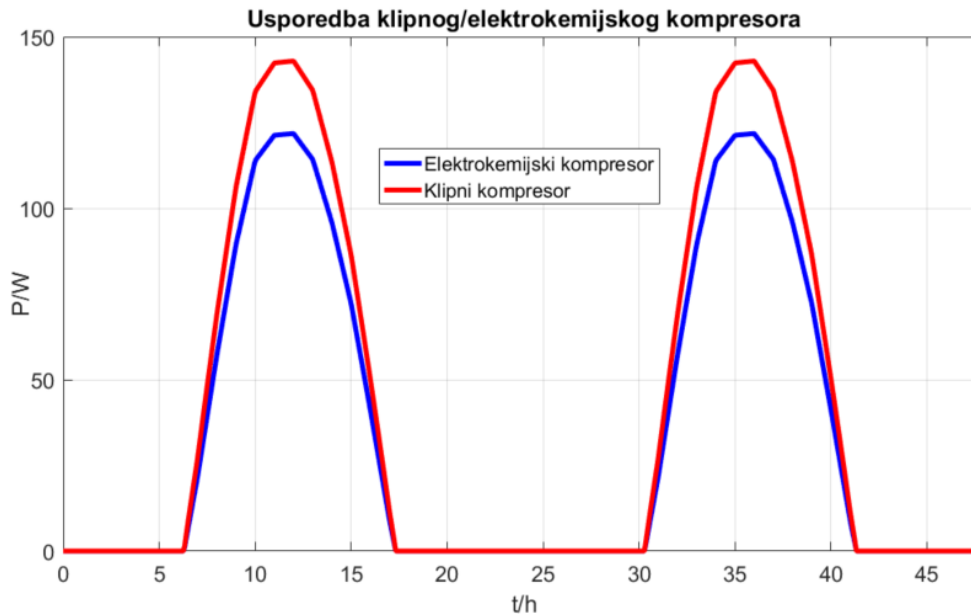
Za navedena dva tipa kompresora napravljena je usporedba (Slika 30.) kako bi se usporedila korištena snaga jednog odnosno drugog kompresora.

Na Slici 31. se može vidjeti pri kojim naponima se postiže tlak na katodi uz to da je tlak na anodi konstantan i iznosi 1 bar.



Slika 31. Tlak na katodi u ovisnosti o naponu za elektrokemijski kompresor

Nadalje, za cijeli sustav napravljena je usporedba klipnog i elektrokemijskog kompresora te se iz Slike 32. zaključuje da je za pogon elektrokemijskog kompresora potrebna manja ukupna snaga.



Slika 32. Snaga klipnog/elektrokemijskog kompresora

#### 4.2.4. Model svežnja gorivnih članaka

Matematički model PEM gorivnog članka je poprilično sličan modelu PEM elektrolizatora. Razlika je u tome što se oduzima aktivacijski i omski napon te se javlja nova varijabla koncentracijskog gubitka [43].

$$U_{g\check{c}} = U_{Nernst} - (U_{akt} + U_{ohm} + U_{konc}) \quad (4.27)$$

Pri čemu je  $E_{Nernst} = 1,23 \text{ V}$  te je to ujedno i maksimalni napon koji jedan gorivni članak može doseći.

Za aktivaciju kemijske reakcije potreban je određeni udio energije. Taj fenomen proizvodi nelinearni pad napona koji se naziva aktivacijska polarizacija te uzrokuje gubitke koji se javljaju i na anodnom i na katodnom katalizatoru. Međutim, smanjenjem kisika reakcija je mnogo sporija od reakcije oksidacije vodika te redukcijaska reakcija proizvodi puno veću količinu aktivacijskog polarizacijskog gubitka. Reakcija oksidacije na anodi je puno brža i praktički konstantna. Ako se uzme u obzir samo jedna reakcija onda se gubitak napona uslijed fenomena aktivacijske polarizacije može opisati Tafelovom jednadžbom [44].

$$\Delta U_{akt} = \frac{RT}{\alpha n F} * \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (4.28)$$

Pri čemu su vrijednosti uzete kao za model PEM elektrolizatora (Tablica 5.).

Otpor protoku elektrona kroz električno vodljiv gorivni članak i protok iona kroz membranu uzrokuje pad napona, što se može izraziti Ohmovim zakonom [43]:

$$\Delta U_{ohm} = i * R_i \quad (4.29)$$

Električni i kontaktni otpor mogu se smatrati konstantnim s obzirom na struju i temperaturu. Tako svaka promjena otpora ovisi samo o koncentraciji vode u membrani i temperaturi membrane [43].

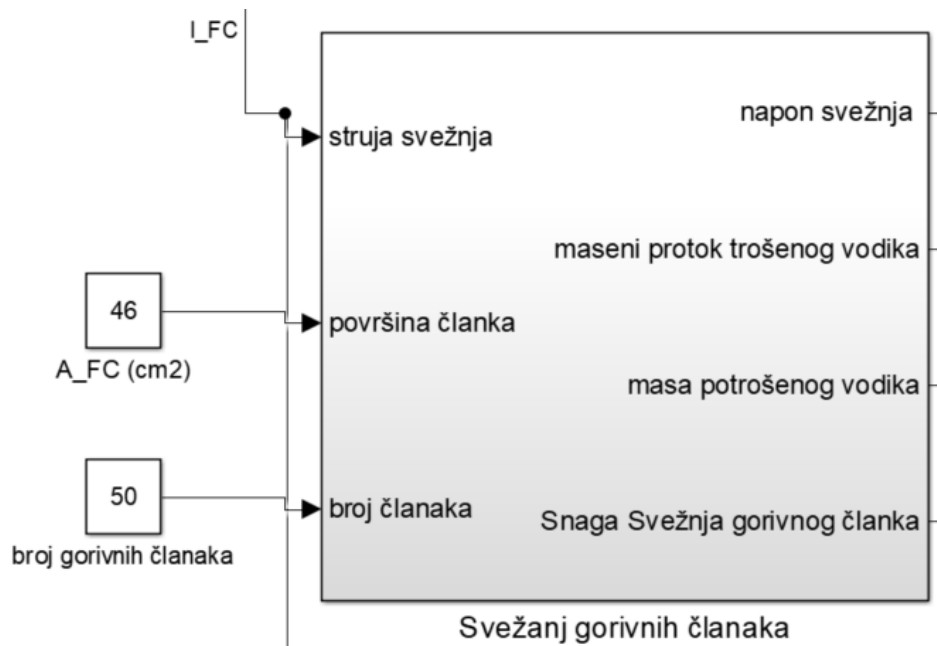
Što je veća gustoća struje, to je manja koncentracija reaktanta u sloju katalizatora. Gustoća struje pri kojoj koncentracija reaktanta dostiže nulu naziva se granična gustoća struje ( $i_L$ ) te iznosi  $1,6 \frac{A}{cm^2}$ . Uzimajući u obzir odnos mase reaktanata gustoće transporta i gustoće struje, gubici masenog toka mogu se izraziti kao [44]:

$$\Delta U_{konc} = \frac{RT}{nF} * \ln \left( \frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (4.30)$$

Ukupna snaga svežnja gorivnih članaka se računa tako da se ukupni napon pomnoži sa strujom te brojem članaka.

Tablica 8. Konstantne vrijednosti svežnja gorivnih članaka

$E_{Nernst}$	1,23 V
$R_i$	0,15 $\Omega cm^2$
$i_L$	$1,6 \frac{A}{cm^2}$
$p_1$	10 bar
$p_x$	60 bar
$p_2$	500 bar

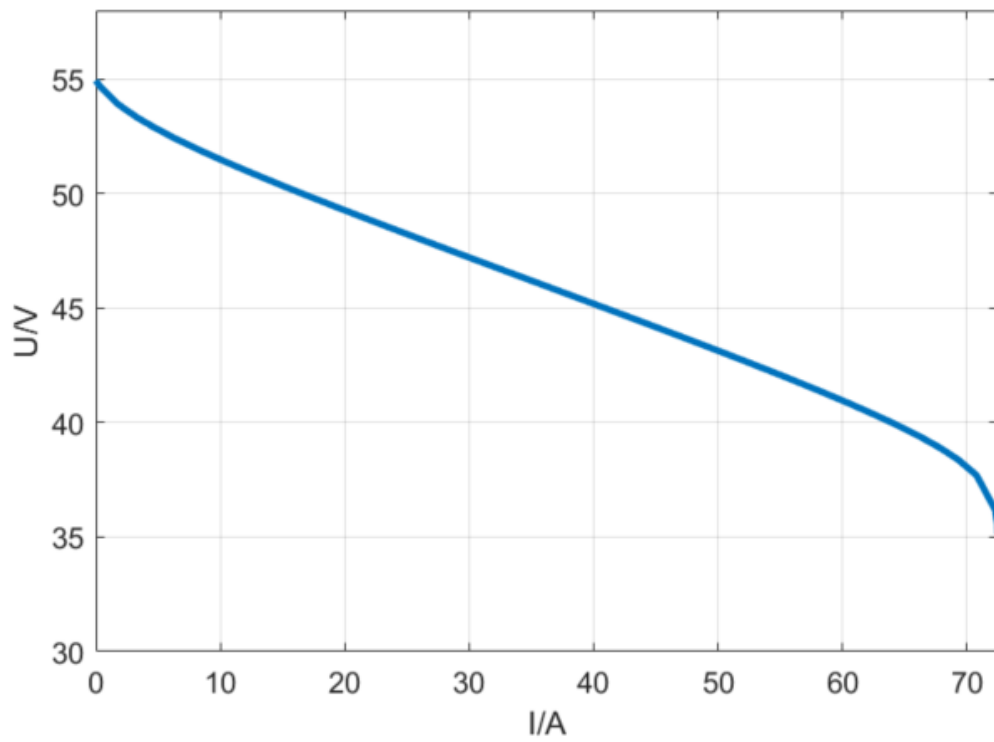


Slika 33. Simulink blok model svežnja gorivnih članaka

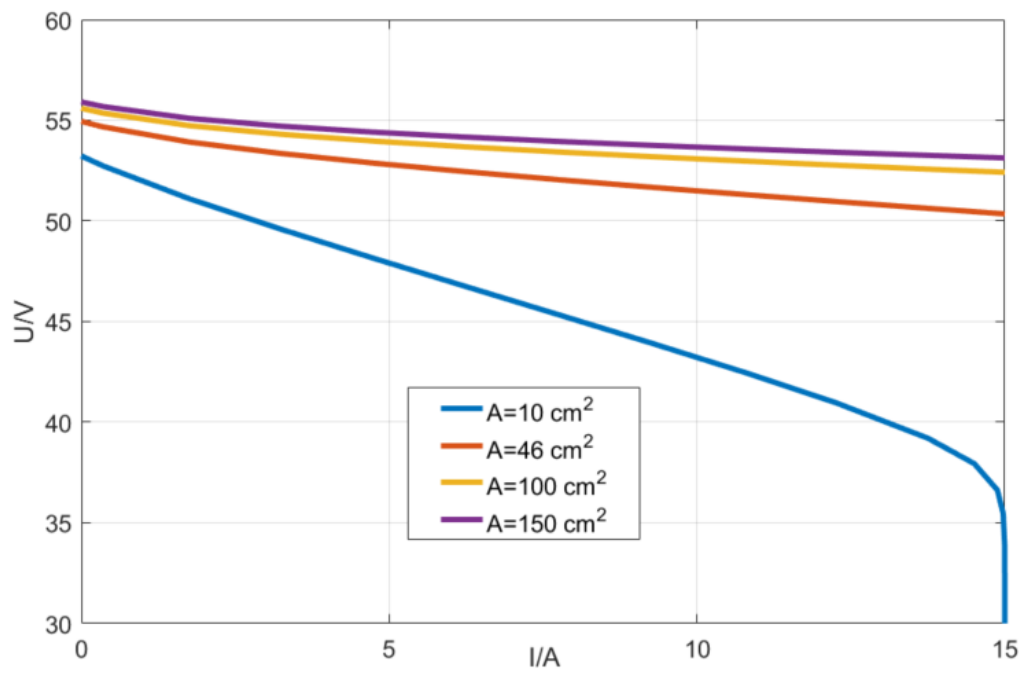
Za potrebe simulacije odabrani broj gorivnih članaka je 50 s površinom od 46 cm<sup>2</sup>. Ostale konstantne vrijednosti naleze se u Tablici 8.

Na Slici 34. može se vidjeti UI karakteristika napravljenog modela svežnja gorivnih članaka koji se sastoji od 50 gorivnih članaka.





Slika 34. UI karakteristika svežnja gorivnih članaka



Slika 35. UI karakteristika gorivnih članaka za različite površine

Na Slici 35. se može vidjeti utjecaj aktivne površine na svežanj gorivnih članaka od 50 članaka. Zaključuje se je da je bolje povećati sami broj gorivnih članka u svežnju nego povećati samo površinu jer napon ne raste linearno s povećanjem površine kao što je to slučaj kod povećanja broja članaka u svežnju gorivnih članaka.

#### 4.2.5. Model spremnika

Matematički model spremnika se temelji na zakonu očuvanja mase iz koje se dolazi do jednadžbe promjene tlaka u vremenu ( $\frac{dp}{dt}$ ):

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{ul} - \dot{m}_{iz} \quad (4.31)$$

gdje je  $\frac{dm}{dt}$  promjena mase vodika po vremenu,  $\dot{m}_{ul}$  ulazni maseni protok te  $\dot{m}_{iz}$  izlazni maseni protok. Nadalje, raspisuje se formula kako slijedi:

$$\frac{d(V\rho)}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} \quad (4.32)$$

$$\rho = \rho(p, T) \quad / \quad \frac{\partial}{\partial t} \quad (4.33)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial p} * \frac{dp}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial T} * \frac{dT}{dt} \quad (4.34)$$

Pretpostavlja se da je temperatura spremnika konstantna.

$$T = konst. \rightarrow \frac{dT}{dt} = 0 \quad (4.35)$$

$$V \frac{\partial \rho}{\partial p} * \frac{dp}{dt} = \dot{m}_{ul} - \dot{m}_{izl} \quad (4.36)$$

Nadalje, potrebno je izvesti Van der Waals-ovu jednadžbu za realnu tvar (vodik) iz jednadžbe idealnog plina:

$$p = \frac{RT}{V_m} \quad (4.37)$$

Sljedeća je pretpostavka da su sve čestice pravilne kugle polumjera  $r$ . Učinak konačnog volumena čestica je smanjenje raspoloživog praznog prostora u kojem se čestice mogu slobodno kretati. Zato se  $V_m$  zamjenjuje s  $V - b$ , gdje je  $b$  isključeni volumen.

$$p = \frac{RT}{V_m - b} \quad (4.38)$$

Izuzeti volumen  $b$  nije samo jednak volumenu koji zauzimaju krute čestice konačne veličine, već je zapravo četiri puta veći ukupni molekularni volumen za jedan mol van der Waalsova plina. Izuzeti volumen za dvije čestice (prosječnog promjera  $r$ ) je [48] :

$$b'_2 = \frac{32\pi r^3}{3} \quad (4.39)$$

Što podijeljeno s 2 daje volumen po čestici:

$$b' = \frac{16\pi r^3}{3} \quad (4.40)$$

Dakle,  $b'$  je četiri puta veći od odgovarajućeg volumena čestice. Van der Waalsu je bilo zabrinjavajuće što faktor četiri daje gornju granicu. Empirijske vrijednosti za  $b'$  obično su niže. Naravno, molekule nisu beskrajno tvrde, kako je mislio van der Waals, nego su često i poprilično mekane. Rezultantna sila na površinsku česticu koja je uvlači u posudu proporcionalna je gustoći broja čestica. Razmatrajući jedan mol plina, broj čestica će biti  $N_A$  [50].

$$C = \frac{N_A}{V_m} \quad (4.41)$$

Broj čestica u površinskim slojevima je, pretpostavljajući homogenost, također proporcionalan gustoći. Ukupno se sila smanjuje za faktor proporcionalan kvadratu gustoće, a tlak se smanjuje za: [48]

$$a' * C^2 = a' * \left(\frac{N_A}{V_m}\right) = \frac{a}{V_m^2} \quad (4.42)$$

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2} \quad (4.43)$$

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right) * (V_m - b) = RT \quad (4.44)$$

Uz  $nV_m = V$  dolazimo do jednadžbe stanja realnog plina:

$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right) * (V - nb) = nRT \quad (4.45)$$

U tablici 9. prikazane su konstantne vrijednosti koje ulaze u model spremnika vodika.

Tablica 9. Konstantne vrijednosti spremnika vodika

$a$	$0,2476 \frac{L^2 bar}{mol^2}$ , [45]
$b$	$0,02661 \frac{L}{mol}$ , [45]
$R$	$8,314 J/(molK)$
$M$	$2,01588 \frac{g}{mol}$
$V$	$0,35 m^3$
$T$	$288 K$
$R_g$	$4124,18 \frac{J}{kgK}$

Uvrštavanjem konstanti i sljedećih izraza  $\rho = \frac{m}{V}$ ,  $m = nM$ , dolazi se do jednadžbe tlaka:

$$p = \frac{0,0192962\rho^2 - 1,46181\rho + T}{0,120279\left(\frac{0,00201588}{\rho} - 0,00002661\right)} \quad (4.46)$$

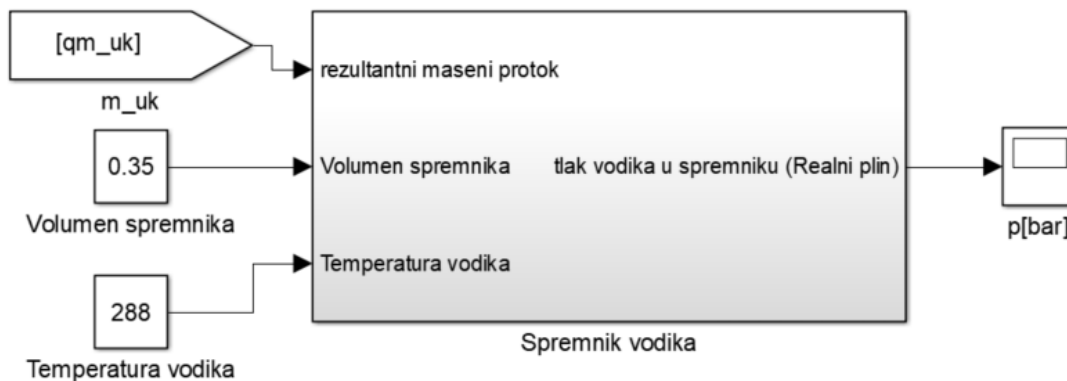
Te da bi se mogli vratiti u formulu (4.36) potreban nam je diferencijal tlaka po gustoći  $\left(\frac{dp}{d\rho}\right)$ :

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{-12057,8\rho^3 + 182691\rho^2 - 6,92 \cdot 10^7 \rho + 23669300 \cdot T}{(75,7565 - \rho)^2} \quad (4.47)$$

Uvrštavanjem (4.47) u (4.36) dolazi se do krajnjeg izraza promjene tlaka u vremenu:

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{-12057,8\rho^3 + 182691\rho^2 - 6,92 * 10^7\rho + 23669300 * T}{V * (75,7565 - \rho)^2} * (\dot{m}_{ul} - \dot{m}_{iz}) \quad (4.48)$$

Slika 35. Prikazuje ulazne i izlazne varijable sustava spremnika vodika. Odabran volumen spremnika iznosi 0,35 m<sup>3</sup> pri temperaturi od 288 K, dok je rezultatni maseni protok razlika između proizvedenog vodika na PEM elektrolizatoru i korištenog vodika na svežnju gorivnih članaka.



Slika 36. Simulink blok spremnika vodika koji se temelji na jednadžbi stanja realnog plina

Nadalje, za usporedbu je napravljen i model spremnika idealnog plina koji se također temelji na zakonu očuvanja mase, no koristi jednadžbu stanja idealnog plina:

$$pV = mR_g ZT \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{1}{Z * R_g * T} \quad (4.50)$$

Konstantne vrijednosti nalaze se u Tablici 9. Z je faktor stlačivosti za vodik koji je ovisan o gustoći i iznosi:

$$Z = 0,99704 + 6,4149 * 10^{-9} * p \quad (4.51)$$

$$\frac{dp_{idealni\ plin}}{dt} = \frac{Z(p) * R_g * T}{V} * (\dot{m}_{ul} - \dot{m}_{izl}) \quad (4.52)$$

Puni spremnik pri 500 bar, konstantnim volumenom i temperaturom po jednadžbi stanja idealnog plina (4.49) iznosi  $m_{idel.plin} = 11,18$  kg, dok po jednadžbi stanja realnog plina za vodik (4.53) iznosi 10,06 kg.

$$\left( p + 2,45 * 10^{-2} \left( \frac{m^2}{V^2 * M^2} \right) \right) * \left( \frac{V * M}{m} - 26,61 * 10^{-6} \right) = RT \quad (4.53)$$

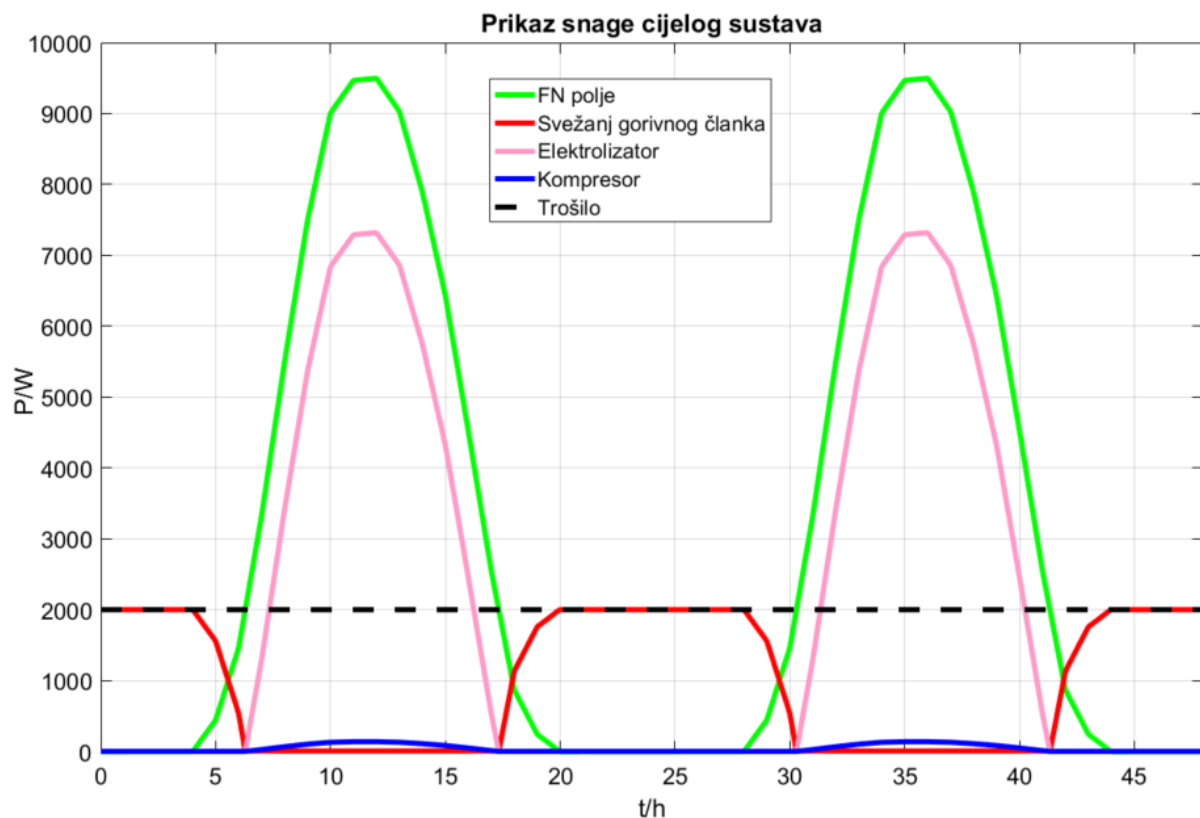
Na Slici 37. je provedena simulacija energetske jezgre sustava s korištenjem različitih jednadžbi stanja u simulink bloku modela spremnika. Uočava se razlika između trenutnog stanja plina u spremniku korištenjem jednadžbe stanja idealnog plina i jednadžbe stanja realnog plina za vodik. Pri korištenju jednadžbe stanja realnog plina manji je tlak u spremniku što proizlazi iz toga da je izračunom također dobivena manja masa punog spremnika korištenjem jednadžbe realnog plina.



Slika 37. Tlak vodika u spremniku

### 4.3. Rezultati simulacija energetske jezgre u MATLAB/Simulink-u

Prethodno navedeni matematički modeli sustava spojeni su u jedan veliki sustav te je napravljena simulacija od 48 sati. Iz Slike 38. zaključuje se kako je u svako doba dana zagarantirana snaga trošila koja iznosi 2 kW. Svežanj gorivnih članaka radi uglavnom kada nema sunca te tada troši vodik i opskrbljuje trošilo ukupnom snagom od 2 kW. U ovoj simulaciji odabrana su dva sunčana dana iz lipnja kako je objašnjeno u poglavlju matematičkog modela FN niza. Elektrolizator se uključuje tijekom dana te puni spremnik vodika novim vodikom. Međutim, njega neće snabdijevati kompletna snaga koju proizvodi FN niz nego ta snaga oduzeta sa snagom trošila i kompresora. Iz Slike 38. se također jasno zaključuje kako je u svakom trenutku rezultatna snaga jednaka 2 kW što osigurava trošilu konstantnu potrebu za snagom tijekom 48 sati.



Slika 38. Prikaz cijelog sustava u trajanju od 48 sati

Kako bi ova energetska jezgra nesmetano funkcionirala potrebno je uvijek imati određenu zalihu vodika koju osigurava spremnik vodika. Stoga je neizmjerljivo važno kontrolirati stanje, odnosno količinu (tlak) vodika u spremniku. Za potrebe ovog rada napravljene su dvije vrste

regulacije tlaka vodika u spremniku energetske jezgre te tri moguća realna scenarija (Tablica 10.). Regulatori su zamišljeni tako da očitavaju trenutno stanje vodika u spremniku te na temelju tih informacija uključuju/isključuju glavnu sklopku dovoda električne energije. Referentni scenarij je scenarij sa svim početnim uvjetima koji su navedeni pod matematičkim modelom svakog dijela energetske jezgre sustava.

Tablica 10. Regulacije i realni scenariji sustava energetske jezgre

Scenariji	FN niz	Priključeno na glavnu mrežu	Spremnik (početno Stanje)	Elektrolizator	Kompresor	Svežanj gorivnog članka
Referentni scenarij	+	-	Pun (500bar)	+	+	+
Regulacija tlaka spremnika PID regulacijom gorivnog članka	+	+(samo po noći)	Pun (500bar)	+	+	+
Regulacija tlaka spremnika-ON-OFF	+	Uključuje se po noći-stavljen dodatni relay	+	+	+	+
Scenarij 1	-	-	Pun (500bar)	-	-	+
Scenarij 2	-	+	0	+	+	-
Scenarij 3	+	-	0	+	+	-





Slika 39. Prikaz referentnog stanja tlaka vodika u spremniku

#### 4.3.1. Regulacija tlaka spremnika PID regulacijom

Cilj ove regulacije je bio regulirati stanje tlaka u spremniku od 500 bara PID regulatorom. Sustav se sastoji od svih dijelova energetske jezgre koji su prije navedeni. Međutim, za potrebe PID regulacije dodan je novi izvor snage koji regulira PID regulator. On je konstruiran tako da regulira dovod dodatne električne energije iz mreže koji se uključuje kada je potrebna dodatna snaga elektrolizatoru kako bi održavao konstantan tlak vodika u spremniku. Taj ciljani tlak dobiven je optimizacijom sustava kako maksimalan tlak ne bi prešao 500 bara te iznosi 475 bara (Slika 40.). Početno stanje tlaka vodika u spremniku iznosi 480 bara. Ma

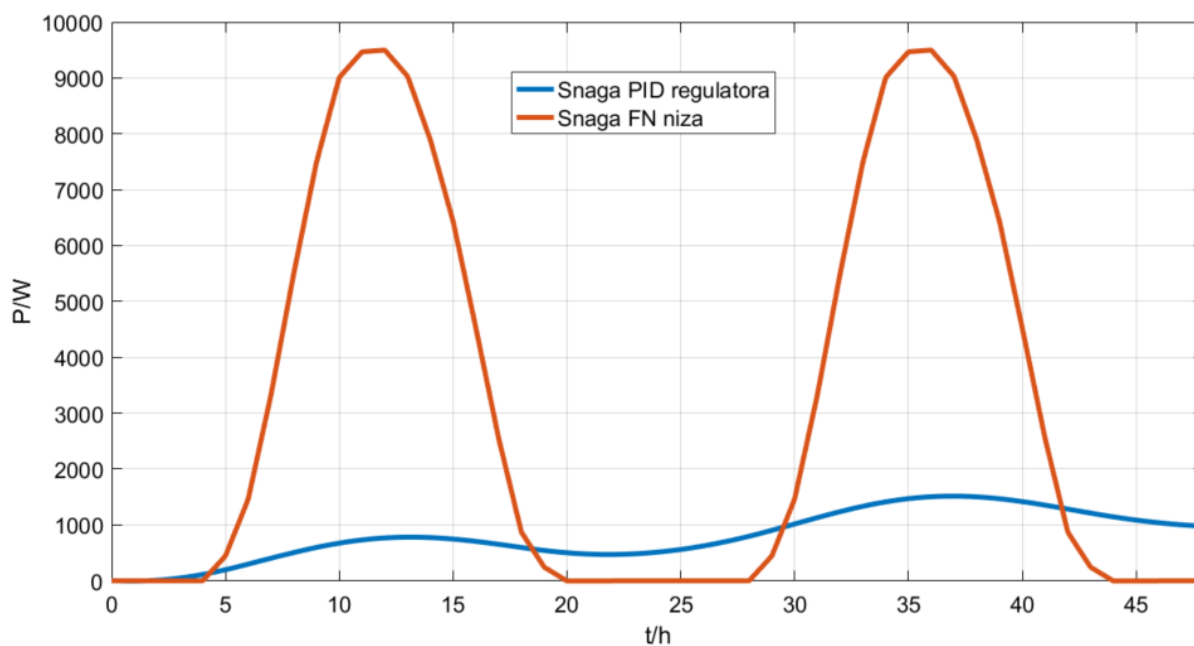
Konstante PID regulatora iznose:

- P: 0,01
- I: 0,001
- D: -72174,7867718226
- N: 8,70219239803862e-06



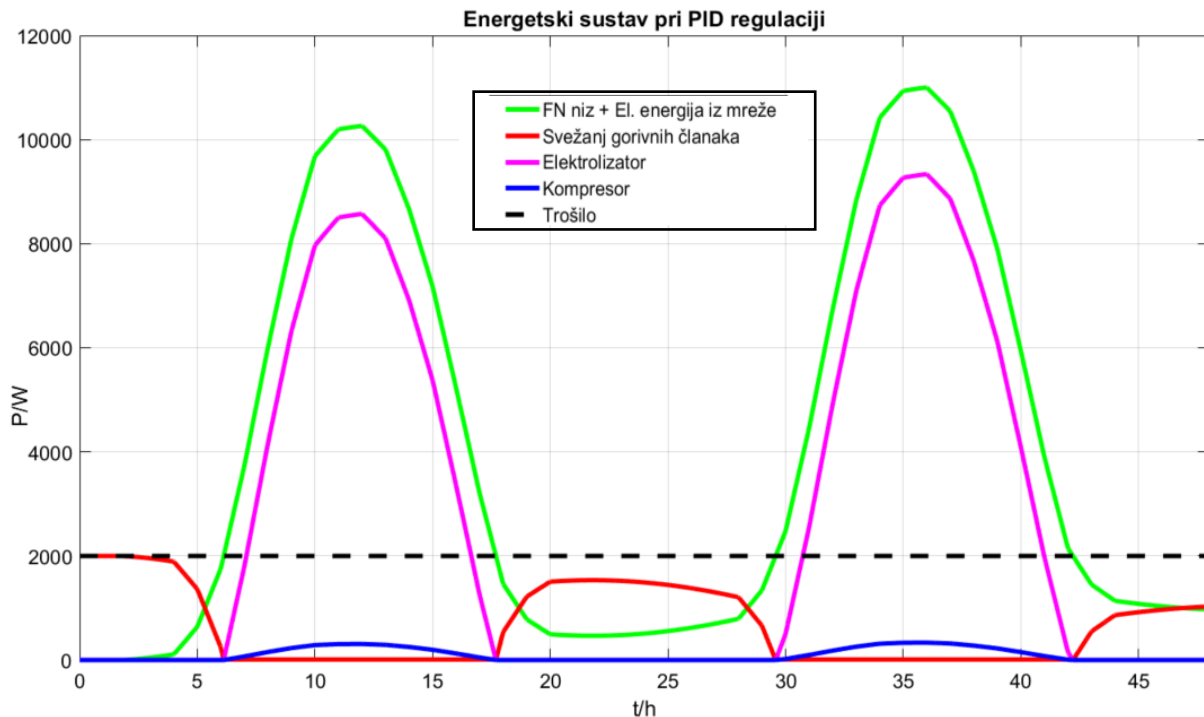
*Slika 40. PID regulacija tlaka vodika u spremniku*

Na Slici 41. Narančasta krivulja označava proizvedenu snagu iz FN niza, dok je plavom krivuljom prikazana količina snage koju PID regulator koristi pri regulaciji. Tu snagu čini električna energija preuzeta iz mreže koja se postepeno povećava na zahtjev PID regulatora. Njezin maksimum nalazi se u drugom danu te iznosi 1,5 kW.



Slika 41. Snaga iz FN niza i glavne mreže (PID regulacija)

Nadalje, Slika 42. prikazuje snagu dijelova sustava energetske jezgre. Djelovanje PID regulatora uočava se na zelenoj krivulji koja objedinjuje snagu proizvedenu iz FN polja te dodatno preuzetu snagu električne energije iz mreže. Rezultat takve simulacije u odnosu na referentni scenario je veća nazivna snaga elektrolizatora te manja nazivna snaga svežnja gorivnih članaka.



Slika 42. Energetski sustav pri PID regulaciji

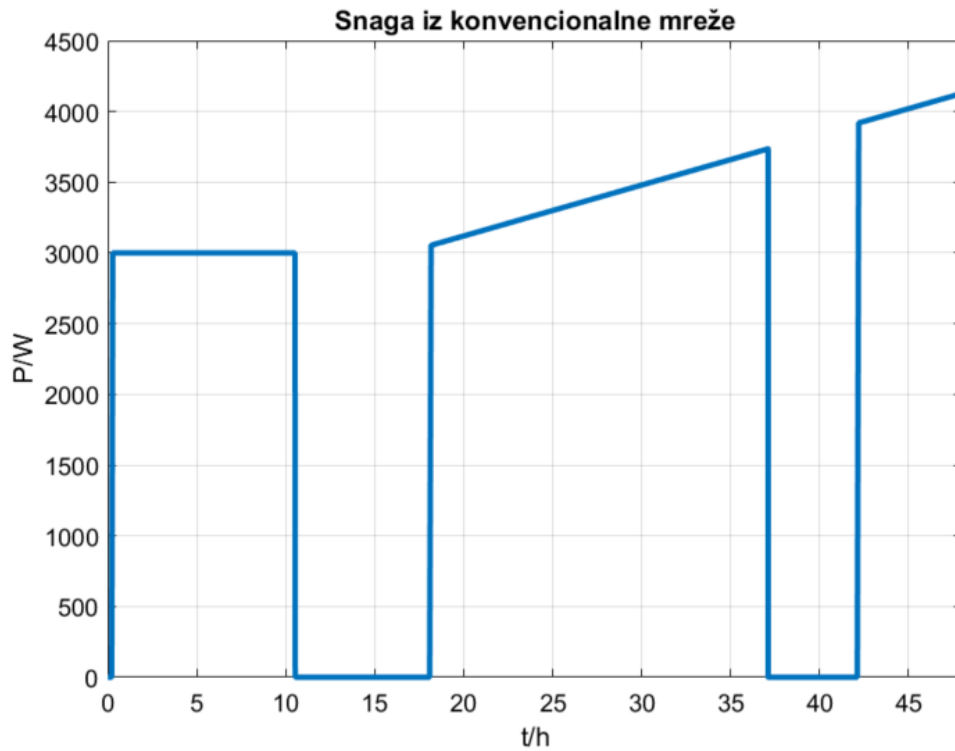
#### 4.3.2. „ON-OFF“ Regulacija tlaka vodika u spremniku

Pri „ON-OFF“ regulaciji tlaka vodika u spremniku cilj je bio također regulirati stanje tlaka vodika na 500 bara. Sustav se sastoji od svih dijelova energetske jezgre koji su ranije navedeni s dodatnim priključkom (snagom) na električnu mrežu kao kod PID regulacije. Regulacija je modelirana preko „Reley“ bloka koji regulira rad elektrolizatora i kompresora tako da ih isključuje pri 498 bara te uključuje na 500 bara. Međutim, zbog tromnosti sustava donji tlak postiže i puno niže vrijednosti od 498 bara (Slika 43.). Početno stanje spremnika vodika iznosi 500 bara.

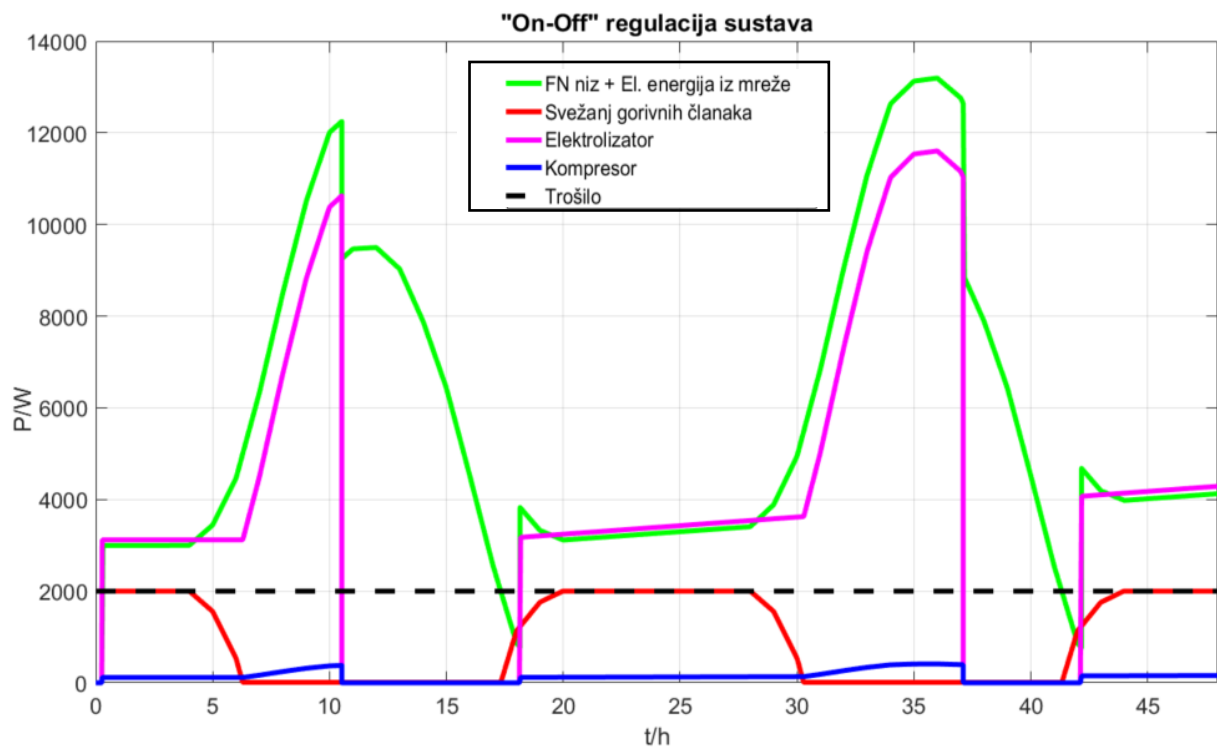


*Slika 43. Tlak spremnika pri "On-Off" regulaciji*

Sustav koristi električnu energiju iz konvencionalne mreže uglavnom po noći (Slika 44.) kada FN niz ne radi i kada se električna energija plaća po nižoj tarifi. Tada nadoknađuje potrebe za vodikom kako bi se održalo stanje tlaka u spremniku od 500 bara. Na slici 45. se može vidjeti kako funkcionira cijeli sustav pri navedenoj regulaciji. Glavna razlika je u tome što se elektrolizator uključuje po noći kako bi nadoknadio potrebu za vodikom te se isključuje preko dana kada je tlak vodika u spremniku 500 bara.



Slika 44. Snaga iz konvencionalne mreže



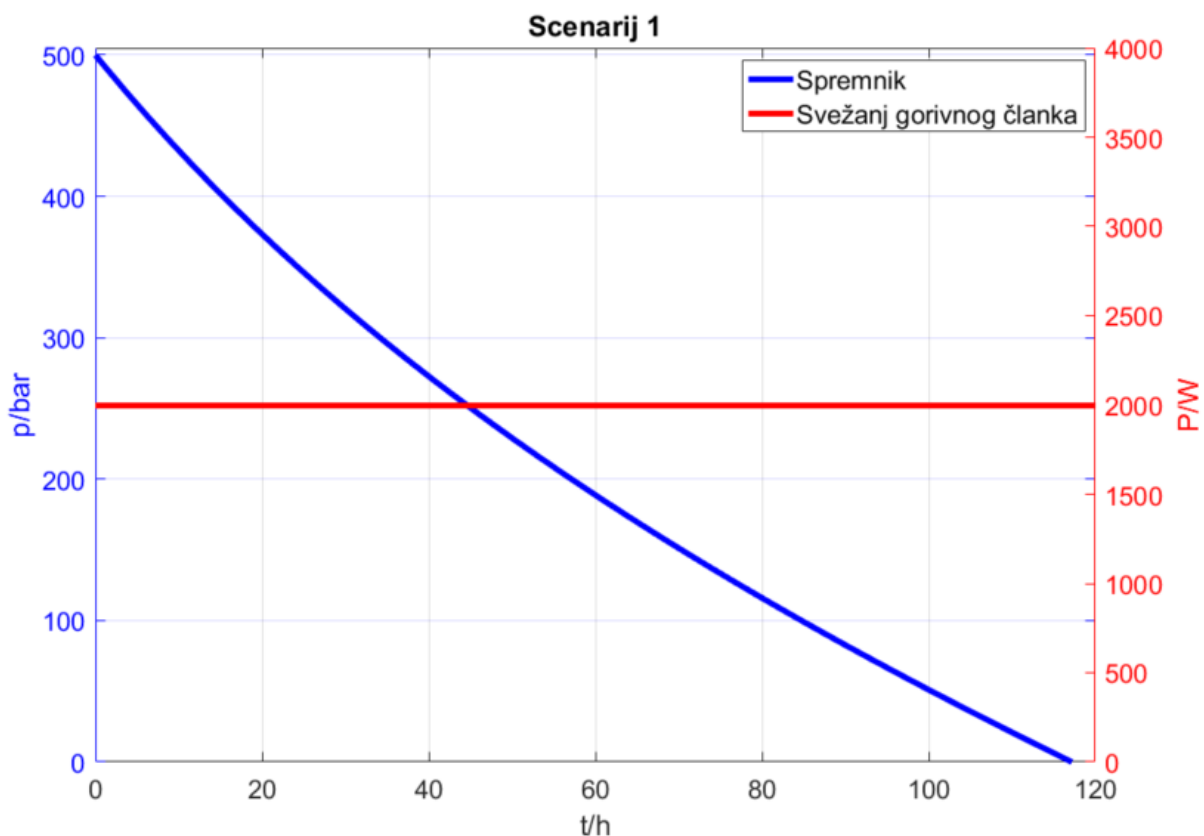
Slika 45. Sustav energetske jezgre pri "On-Off" regulaciji

### 4.3.3. Scenarij 1

Scenarij 1 modeliran je tako da se sastoji od sljedećih dijelova energetske jezgre:

- Spremnika – kojemu je početno stanje 500 bara (pun),
- Svežnja gorivnih članaka,
- Trošila (2kW).

U ovom scenariju željelo se prikazati koliko dugo sustav s trošilom od 2 kW može preživjeti ukoliko posjeduje samo puni spremnik vodika od 0,35 m<sup>3</sup> pri 500 bara i svežanj gorivnih članaka. Time se želi simulirati najgori mogući scenarij kada FN niz ne proizvodi uopće električnu energiju, odnosno kada nema uopće sunca ili FN niz iz nekog razloga ne radi. Svežanj gorivnih članaka ima sve iste značajke koje su navedene u poglavlju matematičkog modela svežnja gorivnih članaka.



Slika 46. Scenarij 1

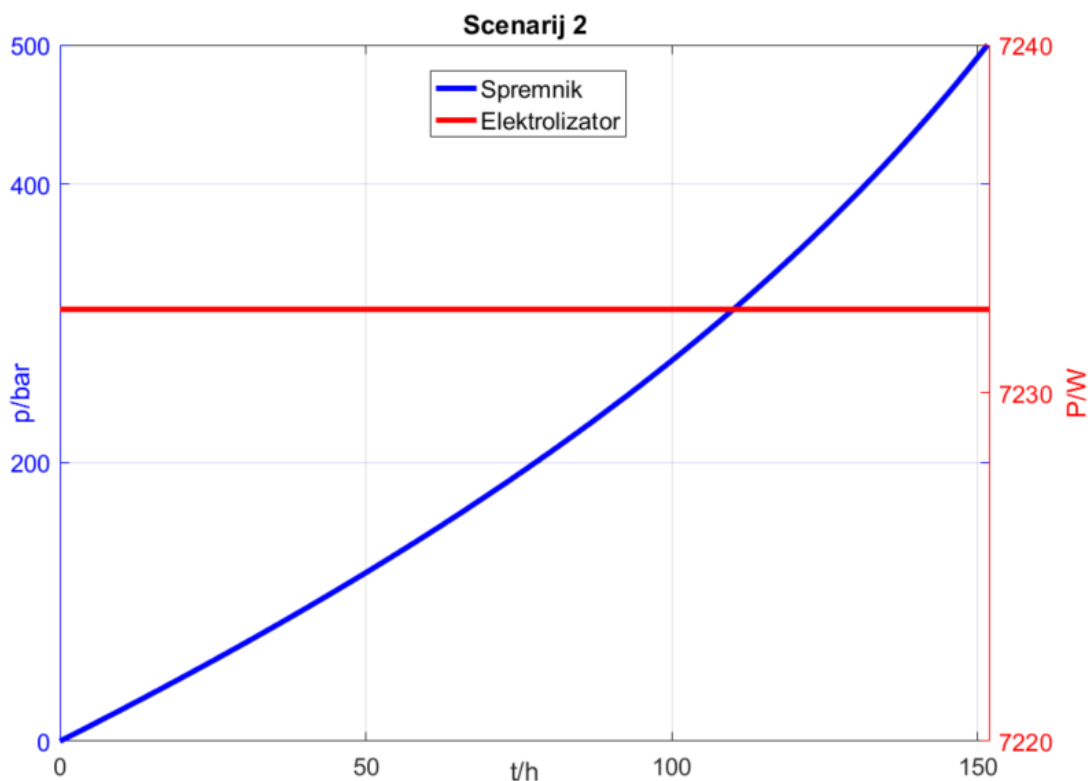
Iz rezultata simulacije (Slika 46.) zaključuje se da pri zadanim uvjetima trošilo od 2 kW može preživjeti 117,5 sati što je 4 dana i 21,5 sati.

#### 4.3.4. Scenarij 2

Scenarij 2 modeliran je tako da se sastoji od sljedećih dijelova energetske jezgre:

- Priključka na konvencionalnu električnu mrežu (9352 W),
- Praznog spremnika vodika,
- Elektrolizatora,
- Kompresora,
- Trošila (2kW).

Cilj scenarija 2 bio je napraviti model s navedenim dijelovima energetske jezgre te simulirati punjenje praznog spremnika vodika koristeći snagu (električnu energiju) iz konvencionalnog izvora. Time se simulira slučaj u kojem FN niz ne proizvodi električnu energiju iz bilo kojeg razloga te je spremnik također u potpunosti prazan. Značajke svih dijelova sustava nalaze se pod poglavljem Matematički modeli sustava te se isti koriste u ovom scenariju. Ulazni signal električne energije koji pogoni elektrolizator i kompresor je konstantan te iznosi 9352 W. Trošilo nazivne snage 2 kW je i dalje priključeno.



Slika 47. Scenarij 2



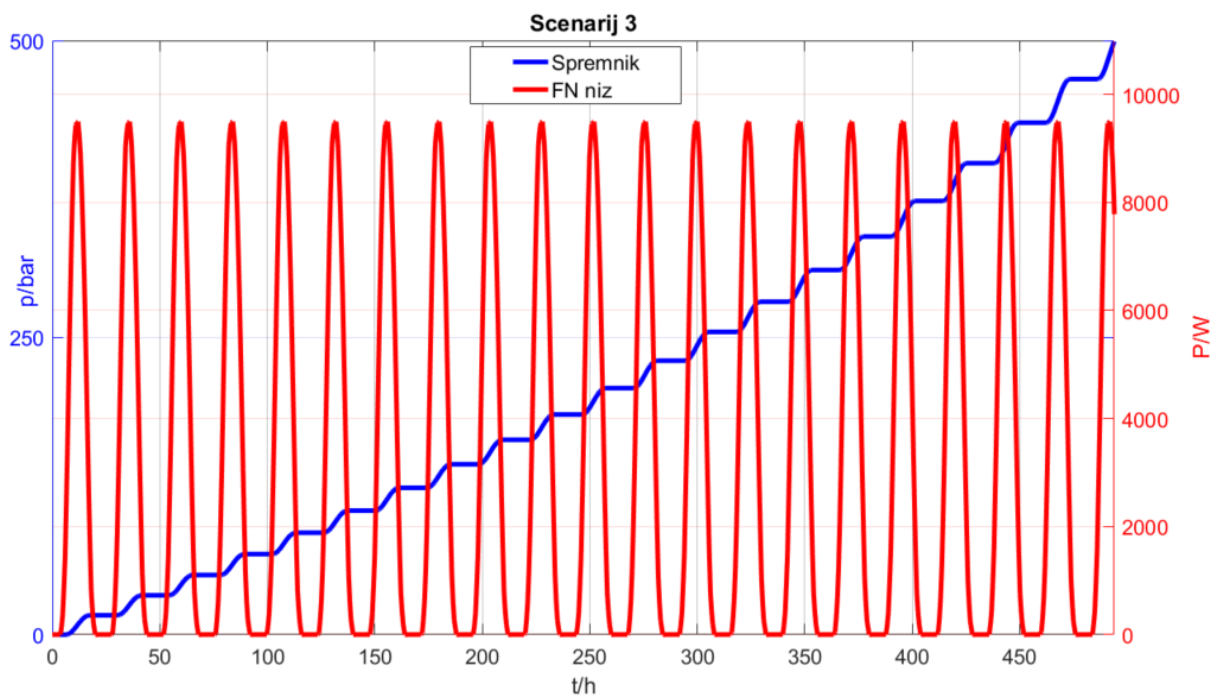
Iz Slike 47. zaključuje se da će spremnik vodika biti pun nakon 152 sata, što je 6 dana i 8 sati.

#### 4.3.5. Scenarij 3

Scenarij 3 modeliran je tako da se sastoji od sljedećih dijelova energetske jezgre:

- FN niza,
- Praznog spremnika,
- Elektrolizatora,
- Kompresora,
- Trošila (2kW)

Jedina razlika između Scenarija 3 i Scenarija 2 je u tome što se u Scenariju 3 elektrolizator, kompresor i trošilo napajaju pomoću električne energije iz konvencionalnog izvora, dok je u Scenariju 3 FN nis jedini izvor električne energije.



Slika 48. Scenarij 3

Za simulaciju je korišten sunčan dan u lipnju kao i u ostalim simulacijama te se pretpostavlja da je svaki dan sunčan i identičan. Pod tim uvjetima spremniku je potrebno 494 sati, što je 20 dana i 14 sati (Slika 48.)

## 5. Odabir tržišno raspoloživih komponenta energetske jezgre sustava

Za odabir tržišno raspoloživih komponenta energetske jezgre sustava analizirano je 5 glavnih dijelova sustava energetske jezgre.

### 5.1. FN modul

Za dimenzioniranje FN niza simuliran je prosječan dan u lipnju kako je već objašnjeno u matematičkom modelu FN modula. Također, iz Scenarija 1 se zaključilo da sustav može raditi čak 4 dana ukoliko dođe do kvara ili kompletne pomrčine sunca. Kao tržišno raspoloživ sustav odabrano je monokristalno FN polje nazivne snage 30 kW. Značajke odabranog FN modula nalaze se u Tablici 11.

Tablica 11. Značajke FN monokristalnog modula

Monokristalni FN modul	
Tip	LONGI 430W
Dimenzije	2131 x 1052 x 35 mm
Količina	70
Ukupna površina [m <sup>2</sup> ]	156,92 m <sup>2</sup>
Ukupna snaga [W]	30000
Učinkovitost	19,2%
Područje radne temperature	-40 – 80°C
Broj FN članaka	144



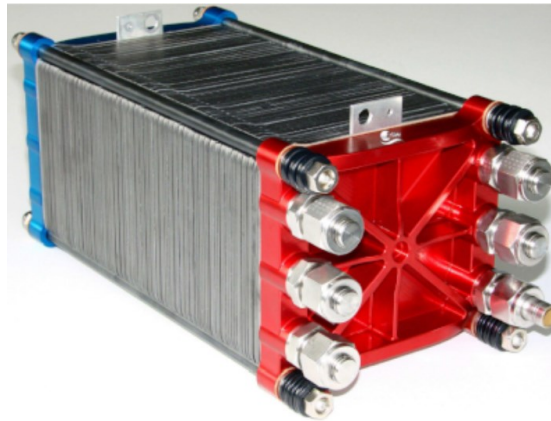
Slika 49. Odabrani monokristalni FN moduli [36]

## 5.2. Svežanj PEM elektrolizatora

Uvidom u odrađene simulacije zaključuje se da je potreban PEM elektrolizator nazivne snage od 7307 W pri ukupnom naponu od 84 V. Slijedom toga odabran je PEM elektrolizator sljedećih značajki (Tablica 12.):

Tablica 12. Značajke odabranog svežnja PEM elektrolizatora

PEM Elektrolizator	
Nazivna snaga [W]	7307
Dimenzije aktivne površine	190 x 160 x 125 mm
Nazivni napon [V/članak]	2,09
Ukupni nazivni napon [V]	83,6
Nazivna struja [A]	87,4
Hlađenje	voda
Broj članaka	25
Površina članka [cm <sup>2</sup> ]	304



Slika 50. Odabrani svežanj PEM elektrolizatora [46]

### 5.3. Kompresor

Odabran je elektrokemijski kompresor ukupne nazivne snage 120 W te sa značajkama iz Tablice 13.

Tablica 13. Značajke elektrokemijskog kompresora

Elektrokemijski kompresor	
Nazivna snaga [W]	120
Površina članka [cm <sup>2</sup> ]	300
Nazivni napon [V/članak]	1,38
Nazivna struja [A]	87,4
Tlak na anodi [bar]	10
Tlak na katodi [bar]	500



Slika 51. Elektrokemijski kompresor[47]

#### 5.4. Svežanj gorivnih članaka

Tržišno odabrani svežanj PEM gorivnih članaka se sastoji od dva svežnja gorivnih članaka nazivne snage 1 kW koji zajedno povezan čine ukupnu nazivnu snagu od 2 kW. U Tablici 14. se nalaze značajke jednog svežnja gorivnih članaka. Maksimalni dopušteni protok odgovara dobivenim protokom u simulaciji koji iznosi  $1,98 \cdot 10^{-5}$  kg/s.

Tablica 14. Značajke svežnja PEM gorivnih članaka [33]

Svežanj PEM gorivnih članaka	
Nazivna snaga [W]	1000
Komada	2
Dimenzije aktivne površine	268 x 219 x 122,5 mm
Nazivni napon [V/članak]	0,8
Ukupni nazivni napon [V]	28,8
Nazivna struja [A]	35
Hlađenje	zrak
Broj članaka	48
Čistoća vodika	99,995%
Maksimalni protok vodika [l/min]	13
Max. temperatura svežnja [°C]	65
Temperatura okoline [°C]	5-30



Slika 52. Odabrani svežanj PEM gorivnih članaka [33]

## 5.5. Spremnik

Za navedeni energetski sustav potrebna su dva spremnika. Glavni spremnik gdje će vodik biti pohranjen na 500 bara te međuspremnik s tlakom vodika od 20 bara. Korištenjem formule (4.53) potreban volumen međuspremnika je 1,204 m<sup>3</sup>. Ostale značajke spremnika nalaze se u Tablici 15. Slika navedenog spremnika nalazi se na Slici 5.

Tablica 15. Značajke spremnika

	Spremnik	Međuspremnik
<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	0,35	1,204
<b>Temperatura vodika [K]</b>	288	288
<b>Materijal</b>	Ugljično vlaknasti kompozit	Ugljično vlaknasti kompozit
<b>Masa vodika [kg]</b>	10,06	2
<b>Tlak [bar]</b>	500	20

## 5.6. Troškovnik sustava energetske jezgre

U troškovniku su uzeti u obzir samo glavni dijelovi energetske jezgre sustava (Tablica 16.). Bitno je napomenuti da je ovaj troškovnik samo okviran. Uglavnom je temeljen na iznosima iz znanstvenih članaka u kojima nije uračunat PDV i ostale stavke same montaže i transporta.

Međutim, za FN niz cijena uključuje gotovu sunčanu elektranu što uključuje montažu, puštanje u pogon i dodatne dijelove sustava kao što su pretvarač, kablovi, itd. Također, cijena svežnja gorivnih članaka proizlazi iz komercijalne cijena za svežanj gorivnih članaka nazivne snage od 1 kW koja ne uključuje PDV. Ostale cijene su, kako je i navedeno, preuzete iz različitih znanstvenih članaka. Zaključuje se da trenutno najveći udio troškova iznosi FN niz i to čak 57%, dok su cijene ostalih komponentna sustava poprilično ujednačene.

Tablica 16. Troškovnik glavnih dijelova energetske jezgre

Komponente	P <sub>nazivno</sub> [W]	Cijena	Opis
Monokristalni FN moduli (ključ u ruke)	30000	26,000.00 €	Cijena ključ u ruke(195 000 kn) [36]
Svežanj PEM elektrolizatora	7307	5,114.90 €	700euro/kW [32]
Elektrokemijski kompresor	120	480.00 €	4euro/w [35]
Svežanj PEM gorivnih članaka	2000	8,506.26 €	4253,13 euro/kW [33]
Spremnik	*10,06 kg	4,289.48 €	426,39 eura/kg <sub>H2</sub> [34]
Međuspremnik	*2 kg	852.78 €	426,39 eura/kg <sub>H2</sub> [34]
<b>Ukupna cijena</b>		<b>45,243.42 €</b>	

\*Masa vodika punog spremnika

Nadalje, napravljen je troškovnik za pojedine regulacije i scenarije iz ovog rada (Tablica 17.). Treba napomenuti da su razmatrane cijene samo glavnih komponentna energetske jezgre bez dodatni regulatora, ventila i sličnog. Zaključuje se da je Scenarij 1 i 2 najjeftiniji zbog toga što nije potrebno investirati u sunčanu elektranu, no treba uzeti u obzir potrošnju električne struje iz konvencionalne mreže te dugoročno gledano ugradnja sunčane elektrane, pogotovo danas uz državne poticaje, je mnogo isplativija.

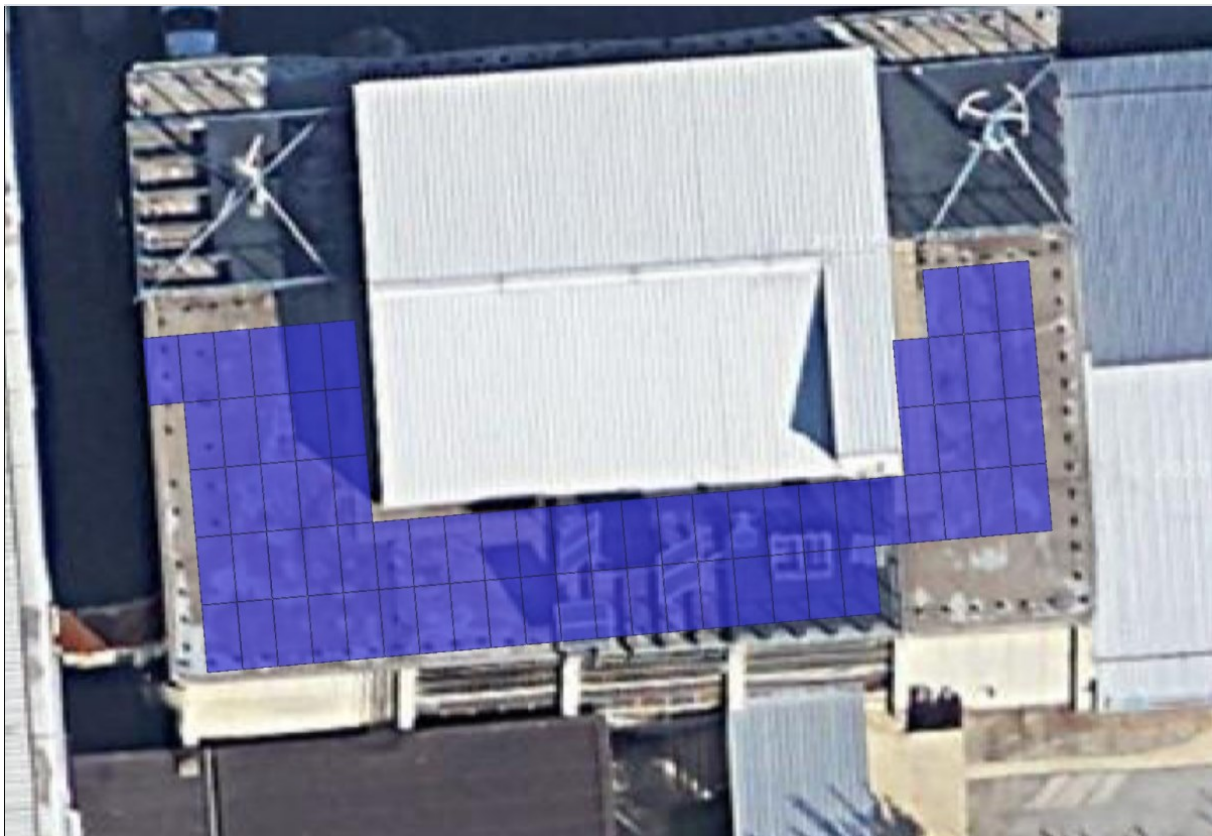
Tablica 17. Troškovnik pojedinih scenarija

Komponente	Regulacija PID	Regulacija On/Off	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3
Monokristalni FN moduli (ključ u ruke)	26,000.00 €	26,000.00 €	/	/	26,000.00 €
Svežanj PEM elektrolizatora	5,114.90 €	5,114.90 €	5,114.90 €	5,114.90 €	5,114.90 €
Elektrokemijski kompresor	480.00 €	480.00 €	480.00 €	480.00 €	480.00 €
Svežanj PEM gorivnih članaka	8,506.26 €	8,506.26 €	8,506.26 €	/	/
Spremnik	4,289.48 €	4,289.48 €	4,289.48 €	4,289.48 €	4,289.48 €
Međuspremnik	852.78 €	852.78 €	852.78 €	852.78 €	852.78 €
<b>Ukupna cijena</b>	<b>45,243.42 €</b>	<b>45,243.42 €</b>	<b>19,243.42 €</b>	<b>10,737.16 €</b>	<b>36,737.16 €</b>



## 6. Smještaj eksperimentalnog energetskeg sustava temeljenog na vodiku i sunčevoj energiji u Laboratoriju za energetska postrojenja FSB-a

Nakon provedenih simulacija i odabira tržišno raspoloživih komponentni sustava potrebno je smjestiti cijeli sustav u Laboratorij za energetska postrojenja na FSB-u u Zagrebu. Prikaz eksperimentalne staze svih dijelova energetske jezgre s dodacima i mjernim instrumentima nalazi se na Slici 53. Svi dijelovi energetske jezgre planiraju se postaviti u središte prostora Laboratorija, dok je za sunčanu elektranu rezerviran njegov krov. Prijedlog smještaja FN modula nalazi se na Slici 54.



Slika 53. Planirani smještaj FN modula



## 7. ZAKLJUČAK

Usljed sve većeg broja elementarnih nepogoda, kojima su u velikoj mjeri uzrok klimatske promjene, dolazi do sve učestalijih ispada elektroenergetske mreže. Cilj ovog rada bio je napraviti „back-up“ sustav energetske jezgre temeljene na sunčevoj energiji i vodiku koji će zamijeniti klasične dizel agregate koji se trenutno koriste za tu svrhu.

Navedena energetska jezgra sastoji se od 5 glavnih komponenata: FN modula, svežnja PEM elektrolizatora, svežnja PEM gorivnih članaka, kompresora i spremnika. Za svaku komponentu sustava napravljen je matematički model koji je u konačnici povezan u jednu veliku cjelinu. Svežanj PEM gorivnih članaka je optimiran tako da skupa s FN nizom u bilo kojem trenutku osigurava nazivnu snagu trošila od 2 kW. Volumen odabranog spremnika iznosi  $0,35 \text{ m}^3$  s maksimalnim tlakom vodika od 500 bara. Pri tim uvjetima i temperaturom vodika od 288 K, masa vodika punog spremnika po jednadžbi stanja idealnog plina iznosi 11,18 kg dok po jednadžbi stanja realne tvari iznosi 10,06 kg.

Nadalje, kako bi se dobila realnija slika simulacija zamišljena su dva tipa regulacije i tri scenarija. Cilj PID regulacije i ON-Off regulacije bio je regulirati tlak vodika u spremniku na 500 bara uz pomoć dodatne električne energije iz mreže. Nakon provedenih simulacija sustava s oba tipa regulacije zaključuje se da je s PID regulacijom nazivna snaga FN polja i korištene električne energije iz mreže za 20 % manja u odnosu na On-Off regulaciju.

U slučaju kvara sunčane elektrane ili izuzetno lošeg vremena bez sunčevog zračenja sustav može izdržati 4 dana i 21,5 sati što se vidi iz Scenarija 1. Međutim, za kompletno punjenje praznog spremnika vodika korištenjem samo električne energije iz mreže bez rada sunčane elektrane potrebno je 6 dana i 8 sati. Scenarij 3 se od prethodnog jedino razlikuje po izvoru električne energije gdje se umjesto glavne električne mreže koristi samo sunčanu elektranu. Pri takvim uvjetima prazan spremnik vodika će se u potpunosti napuniti za 20 dana i 14 sati.

Nakon odrađenih svih simulacija odabrane su tržišno raspoložive komponentne sustava, navedene njihove značajke te je napravljen okvirni troškovnik iz kojeg se zaključuje da je trenutno najveći trošak izgradnja sunčane elektrane koji iznosi čak 57% ukupnog iznosa. Nadalje, napravljena je shema eksperimentalne staze odabranog sustava energetske jezgre te prikazan smještaj FN modula i glavnih komponenta sustava.

## LITERATURA

- [1] Ankica Kovač: Doktorski rad - Proizvodnja energije elektrolizom vode pomoću sunčeve energije i fotonaponskoga modula, 2013.
- [2] Professor Jim Al-Khalili (21 January 2010). "Discovering the Elements". Chemistry: A Volatile History. 25:40 minutes in. BBC. BBC Four.
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen> , Datum pristupa: 19.11.2020.
- [4] <https://www.alfalaval.cn/industries/energy-and-utilities/crude-oil-refinery/hydrogen-treating-processing/hydrogen-production/> , Datum pristupa: 2.3.2020.
- [5] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=17624> , Datum pristupa: 6.3.2020.
- [6] <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/h/spojevi.html> , Datum pristupa: 6.3.2020.
- [7] [http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/study%20electrolyser\\_0-Logos\\_0\\_0.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/study%20electrolyser_0-Logos_0_0.pdf) , Datum pristupa: 6.3.2020.
- [8] [https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/4\\_OIE\\_Jukic\\_vodik\[1\].pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/4_OIE_Jukic_vodik[1].pdf) , Datum pristupa: 4.3.2020.
- [9] <https://zenodo.org/record/1258818> , Datum pristupa: 2.3.2020.
- [10] [https://www.h2planet.eu/nl/detail/myh2%c2%ae\\_slim\\_35](https://www.h2planet.eu/nl/detail/myh2%c2%ae_slim_35) , Datum pristupa: 8.3.2020.
- [11] <https://www.fortressuav.com/doorsan/hydrogen-tank> , Datum pristupa: 10.3.2020.
- [12] Frano Barbir: "Vodik i gorivni članci", priručnik
- [13] <https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-applications> , Datum pristupa: 10.3.2020.
- [14] [https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen-powered\\_aircraft#/media/File:Boeing\\_Fuel\\_Cell\\_Demonstrator\\_AB1.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen-powered_aircraft#/media/File:Boeing_Fuel_Cell_Demonstrator_AB1.JPG) , Datum pristupa: 10.3.2020.
- [15] <https://www.energy-reporters.com/storage/worlds-first-hydrogen-powered-boat-leaves-europe/> , Datum pristupa: 2.3.2020.
- [16] <https://www.railjournal.com/fleet/alstom-hydrogen-train-french-regions/> , Datum pristupa: 12.3.2020.
- [17] <https://www.toyotaforklift.com/blog/hydrogen-fuel-cell-forklifts-an-alternative-energy-solution> , Datum pristupa: 12.3.2020.
- [18] <https://fuelcellbuses.eu/> Datum pristupa: 12.3.2020.

- [19] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d2/Toyota\\_Mirai\\_%E2%80%93\\_Frontansicht%2C\\_11.\\_November\\_2018%2C\\_D%C3%BCsseldorf.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d2/Toyota_Mirai_%E2%80%93_Frontansicht%2C_11._November_2018%2C_D%C3%BCsseldorf.jpg) , Datum pristupa: 14.3.2020.
- [20] <http://www.unizg.hr/nc/vijest/article/prvi-hrvatski-bicikl-na-vodik-docentice-ankice-dukic-s-fsb-a/> , Datum pristupa: 16.3..2020.
- [21] "HYDROGEN PRODUCTION FROM SOLAR ENERGY",I. ENGIN TÜRE\*  
UNIDO-ICHET
- [22] <https://www.energysage.com/solar/101/types-solar-panels/> , Datum pristupa: 15.9.2020.
- [23] Carmo, M., Fritz, D.L., Mergel, J., Stolten, D., 2013. A comprehensive review on PEM water electrolysis. Int. J. Hydrogen Energy 38, 4901e4934.
- [24] Lamy, C., 2016. From hydrogen production by water electrolysis to its utilization in a PEM fuel cell or in a SO fuel cell: some considerations on the energy efficiencies. Int. J. Hydrogen Energy 41.
- [25] E.Tzimas, C. Filiou, S.D.Peteves & J.B.Veyret: Hydrogen Storage:State-of-the art and future perspective, European Commision Joint Research Center, 2003.
- [26] R.Srobel,M.Oszcipok,M.Fasil,B.Rohland: The compression of hydrogen in an electrochemical cell based on a PE fuel cell design, J.of Power sources, 2002(105).
- [27] Modeling and analysis of electrochemical hydrogen compression N.V. Dale1,\* , M. D. Mann1, H. Salehfar2 , A. M. Dhirde2, T. Han2
- [28] [https://web.archive.org/web/20150924025946/http://www.hfcletter.com/issues/XXI\\_9/stories/739-1.html](https://web.archive.org/web/20150924025946/http://www.hfcletter.com/issues/XXI_9/stories/739-1.html) , Datum pristupa: 25.9.2020.
- [29] <https://www.prnewsprime.com/2019/10/hydrogen-compressor-market-professional-survey-report-2019/> , Datum pristupa: 26.9.2020.
- [30] <https://www.cambridgeindependent.co.uk/news/apollo-11-mission-50-years-on-the-cambridge-scientist-who-helped-put-man-on-the-moon-9077166/> , Datum pristupa: 28.9.2020.
- [31] Nice, Karim and Strickland, Jonathan. "How Fuel Cells Work: Polymer Exchange Membrane Fuel Cells". How Stuff Works, accessed 4 August 2011
- [32] SCALING PEM ELECTROLYSIS TO 100MW, HANNOVER MESSE | APRIL 2017, SIMON BOURNE | CTO

- [33] <https://www.fuelcellearth.com/fuel-cell-products/horizon-1000w-pem-fuel-cell/> , Datum pristupa: 1.10.2020.
- [34] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage> , Datum pristupa: 1.10.2020.
- [35] "Power-to-Gas Hydrogen: techno-economic assessment of processes towards a multi-purpose energy carrier",Domenico Ferreroa , Martina Gamba, Andrea Lanzinia, Massimo Santarellia
- [36] <https://www.solarno.hr/katalog/proizvod/SET-10kW/set-10kw-solarna-ektranakljuc-u-ruke> , Datum pristupa: 20.10.2020.
- [37] Nafeh, A.E.-S.A., 2011. Hydrogen production from a PV/PEM electrolyzer system using a neural-network-based MPPT algorithm. Int. J. Numer. Model. Electron. Network. Dev. Field. 24, 282e297.
- [38] M. Miri, »Autonomous solar-hydrogen power system,« 2012.
- [39] García-Valverde, R., Espinosa, N., Urbina, A., 2012. Simple PEM water electrolyser model and experimental validation. Int. J. Hydrogen Energy 37, 1927e1938.
- [40] Bessarabov, D., wang, H., Li, H., Zhao, N., 2015. PEM Electrolysis for Hydrogen Production: Principles and Applications
- [41] Aouali, F.Z., Becherif, M., Ramadan, H.S., Emziane, M., Khellaf, A., Mohammedi, K., 2017. Analytical modelling and experimental validation of proton exchange membrane electrolyser for hydrogen production. Int. J. Hydrogen Energy 42, 1366e1374
- [42] Ruuskanen, V., Koponen, J., Huoman, K., Kosonen, A., Niemelä, M., Ahola, J., 2017. PEM water electrolyzer model for a power-hardware-in-loop simulator. Int. J. Hydrogen Energy 42, 10775e10784.
- [43] Experimental Characterization Methodology for the Identification of Voltage Losses of PEMFC: Applied to an Open Cathode Stack A. Husar\*, S. Strahl, J. Riera
- [44] F. Barbir, PEM Fuel Cells: Theory and Practice, Elsevier Academic Press, 2005
- [45] R. C. Weast (1972). Handbook of Chemistry and Physics 53rd Edition. Chemical Rubber Pub
- [46] <https://www.quintech.de/en/produkte/pem-fuel-cell-stacks/laboratory-stacks-with-me/bz100-135kw-24z/> , Datum pristupa: 1.11.2020.

[47] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146428591470149X> , Datum pristupa: 1.11.2020.

[48] [https://en.wikipedia.org/wiki/Van\\_der\\_Waals\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Van_der_Waals_equation) , Datum pristupa: 1.11.2020.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc