

# Modeliranje i parametrizacija rada punionice vodika

---

**Bošnjak, Antun**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:533985>

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

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



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**MODELIRANJE I PARAMETRIZACIJA RADA PUNIONICE VODIKA**

Diplomski rad

Antun Bošnjak

N391

Zagreb, 2022.

## ZAHVALA

*Zahvaljujem od srca mojem dragom mentoru izv. prof. dr. sc. Luki Perkoviću na velikodušnom doprinosu i uloženom vremenu od samog početka izrade ovog diplomskog rada.*

*Posebno sam zahvalan mojim roditeljima Borisu i Kati koji su mi omogućili studij u Zagrebu i mojoj sestri Heleni na velikoj podršci i razumijevanju za vrijeme studiranja. Hvala susjedi Veri na razgovorima uz kavu kada bih došao doma. Također, mojem bratiću Davidu na svim našim avanturama i ostatku obitelji na podršci tijekom studija.*

*Iz zahvale ne smijem izostaviti mojeg prijatelja Juru Romića koji mi je u proteklih 6 godina omogućio boravak u svom stanu kada mi je to bilo potrebno. Hvala ostatku društva Filipu Čatiću, Filipu Šargaču, Mislavu i Leonu na svim nezaboravnim trenucima našeg prijateljstva.*

*Za kraj želim zahvaliti prijateljima i prijateljicama iz Speleološkog kluba Ozren Lukić uz koje je diplomski studij bio nezaboravno iskustvo.*

## MODELIRANJE I PARAMETRIZACIJA RADA PUNIONICE VODIKA

ANTUN BOŠNJAK

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

U programskom jeziku Python napisan je kod koji simulira rad hipotetske punionice sa ukapljenim vodikom na području Grada Zagreb. Simulacija računa termodinamičke parametre sustava na temelju ulaznih podataka. Glavni dijelovi sustava obuhvaćaju glavni spremnik sa ukapljenim vodikom, kriogenu pumpu, isparivač, visokotlačni međuspremnik i vozilo na vodikove gorivne ćelije. Ulazni podatci su meteorološki podatci, geometrija glavnog spremnika, isparivača, visokotlačnog međuspremnika te krivulja punjenja vozila s vodikovim ćelijama, kao i procesni parametri i parametri ograničenja vođenja procesa. Napravljena je jednogodišnja simulacija uz nultu potrošnju vodika koja omogućuje praćenje rada samo punionice bez vozila te je provedena analiza i interpretacija rezultata. Provedena je simulacija uz konačnu potrošnju vodika unutar dva zimska i ljetna tjedna koja omogućuje praćenje rada punionice i vizualizaciju punjenja vozila koja nasumično dolaze na punionicu.

Ključne riječi: Punionica vodika, ukapljeni vodik, simulacija, analiza podataka, Python

Diplomski rad sadrži: 87 stranica, 10 tablica, 41 sliku i 72 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNf

Ocjenjivači: Dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNf-a  
Dr. sc. Tomislav Kurevija, redoviti profesor RGNf-a  
Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNf-a

Datum obrane: 21. rujna 2022., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

MODELING AND PARAMETERISATION OF HYDROGEN REFUELING STATION

ANTUN BOŠNJAK

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

Abstract

Using the Python programming language, a simulation of hypothetical liquid hydrogen refueling station for the City of Zagreb is designed. The simulation calculates thermodynamic parameters of the system based on data input. The main components of the system are liquid hydrogen storage tank, cryogenic pump, ambient air vaporizer, buffer storage tank and fuel cell electric vehicle. The input data are meteorological data, liquid hydrogen storage tank data, vaporizer and buffer storage tank geometry, charging performance curve, process and regulation parameters. The python code simulates one-year performance of a hydrogen refueling station without hydrogen demand and results are analyzed and interpreted. Also, a performance of hydrogen refueling station with hydrogen demand is run over the period of two summer and winter months. This simulation provides a visualization of the charging performance of fuel cell electric vehicles, which are randomly attached to the fuel dispenser.

Keywords: Hydrogen refueling station, liquid hydrogen, simulation, data analysis, Python

Thesis contains: 87 pages, 10 tables, 41 figures and 72 references.

Original in: Croatian

Archived at: The library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Luka Perković, PhD

Reviewers: Associate Professor Luka Perković, PhD  
Full Professor Tomislav Kurevija, PhD  
Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Date of defence: September 16, 2022., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
University of Zagreb.

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA</b> .....	I
<b>POPIS TABLICA</b> .....	III
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA</b> .....	IV
<b>POPIS KORIŠTENIH KRATICA</b> .....	VI
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. OSNOVNA SVOJSTVA VODIKA</b> .....	5
2.1. Fazni dijagram vodika .....	7
<b>3. TEMELJNI PRINCIP RADA PUNIONICE VODIKA</b> .....	11
3.1. The Hydrogen Filling Simulation (H2FillS) software.....	14
<b>4. METODOLOGIJA</b> .....	18
4.1. Glavni spremnik .....	18
4.2. Zračni isparivač (AAV).....	28
4.3. Visokotlačni međuspremnik.....	31
4.4. FCEV spremnik .....	33
4.5. Kontrolne varijable.....	34
4.6. Dijagram toka izračuna.....	36
<b>5. ANALIZA SLUČAJA ZA PUNIONICU VODIKA U GRADU ZAGREBU</b> .....	40
5.1. Postavke i ulazni podatci .....	40
5.1.1. <i>Meteorološki ulazni podatci</i> .....	40
5.1.2. <i>Tehnički podaci za komponente sustava</i> .....	41
5.1.3. <i>Dijagram potražnje za vodikom</i> .....	46
5.1.4. <i>Parametri vođenja procesa i njihova ograničenja</i> .....	47
5.2. Analiza rezultata za promjenu debljine izolacije spremnika pri nultoj potražnji .....	48
5.2.1. <i>Debljina izolacije 40 cm</i> .....	49
5.2.2. <i>Debljina izolacije 48 cm</i> .....	56
5.2.3. <i>Debljina izolacije 56 cm</i> .....	61
5.3. Analiza rezultata za debljinu izolacije 56 cm pri konačnoj potražnji.....	66
5.3.1. <i>Modeliranje potražnje vodika</i> .....	67
5.3.2. <i>Analiza rezultata simulacije pri konačnoj potražnji unutar dva zimska tjedna</i>	67

5.3.3.	<i>Analiza rezultata simulacije pri konačnoj potražnji unutar dva ljetna tjedna</i>	75
5.3.4.	<i>Procjena potrebe za punjenjem glavnog spremnika</i>	80
<b>6.</b>	<b>ZAKLJUČAK</b>	81
<b>7.</b>	<b>POPIS LITERATURE</b>	82

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Fazni dijagram vodika u podkritičnom području .....	7
<b>Slika 2-2.</b> Kretanje pojedinih svojstava vodika u nadkritičnom području pri konstantnoj temperaturi.....	9
<b>Slika 3-1.</b> Model punionice sa ukapljenim vodikom (modificirano prema Decker, 2019) .....	12
<b>Slika 3-2.</b> Model punionice sa stlačenim vodikom (modificirano prema Linde engineering, 2021).....	13
<b>Slika 3-3.</b> Sučelje programa H2Fills .....	14
<b>Slika 3-4.</b> NREL konfiguracija punionice vodika sa prethlađenjem vodika.....	15
<b>Slika 3-5.</b> Grafički prikaz rezultata simulacije punjenja vodikom iz programa H2Fills.....	17
<b>Slika 4-1.</b> Shematski prikaz prodora toplinskog toka iz okoliša u glavni spremnik .....	22
<b>Slika 4-2.</b> Simulacija rada punionice vodika .....	36
<b>Slika 5-1.</b> Meteorološki ulazni podatci .....	40
<b>Slika 5-2.</b> Spremnik ukapljenog vodika (preuzeto sa Linde Englineering, 2021) .....	43
<b>Slika 5-3.</b> Modul visokotlačnog međuspremnika (preuzeto sa Steelhead Composites, 2022) .	44
<b>Slika 5-4.</b> Presjek isparivača (modificirano prema Sun et al., 2018).....	45
<b>Slika 5-5.</b> Nasumični odabir potražnje za vodikom.....	46
<b>Slika 5-6.</b> Shema simulacije punionice vodika pri nultoj potražnji .....	48
<b>Slika 5-7.</b> Toplinski tok koji prodire u glavni spremnik i temperature stijenki spremnika .....	49
<b>Slika 5-8.</b> Parametri unutar glavnog spremnika vodika .....	50
<b>Slika 5-9.</b> Toplinski tok koji prodire u visokotlačni međuspremnik i temperature stijenki.....	52
<b>Slika 5-10.</b> Parametri unutar visokotlačnog međuspremnika .....	53
<b>Slika 5-11.</b> p-h dijagram.....	55
<b>Slika 5-12.</b> Prodor toplinskog toka u glavni spremnik.....	56
<b>Slika 5-13.</b> Parametri unutar glavnog spremnika.....	57
<b>Slika 5-14.</b> Prodor toplinskog toka u visokotlačni međuspremnik .....	59
<b>Slika 5-15.</b> Parametri unutar visokotlačnog međuspremnika .....	60
<b>Slika 5-16.</b> Prodor toplinskog toka u glavni spremnik.....	61
<b>Slika 5-17.</b> Parametri unutar glavnog spremnika vodika .....	62
<b>Slika 5-18.</b> Prodor toplinskog toka u visokotlačni međuspremnik .....	63



<b>Slika 5-19.</b> Parametri unutar visokotlačnog međuspremnika .....	64
<b>Slika 5-20.</b> Shema simulacije punionice vodika pri konačnoj potražnji .....	66
<b>Slika 5-21.</b> Toplinski tok i temperature stijenki glavnog spremnika .....	68
<b>Slika 5-22.</b> Parametri unutar glavnog spremnika .....	69
<b>Slika 5-23.</b> Toplinski tok i temperature stijenki visokotlačnog međuspremnika.....	70
<b>Slika 5-24.</b> Parametri unutar visokotlačnog međuspremnika .....	71
<b>Slika 5-25.</b> Profil temperature unutar isparivača .....	72
<b>Slika 5-26.</b> Parametri unutar vozila.....	73
<b>Slika 5-27.</b> p-h dijagram.....	74
<b>Slika 5-28.</b> Toplinski tok i temperature stijenki glavnog spremnika .....	75
<b>Slika 5-29.</b> Parametri unutar glavnog spremnika .....	76
<b>Slika 5-30.</b> Toplinski tok i temperature stijenki visokotlačnog međuspremnika.....	77
<b>Slika 5-31.</b> Parametri unutar visokotlačnog međuspremnika .....	78
<b>Slika 5-32.</b> Profil temperature unutar isparivača .....	79

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 2-1.</b> Osnovna svojstva vodika pri standardnim uvjetima (modificirano prema The Englineering Toolbox, 2022).....	6
<b>Tablica 3-1.</b> Ulazni parametri koje je potrebno definirati za pojedinu komponentu prije provođenja simulacije.....	16
<b>Tablica 4-1.</b> Konduktivni toplinski otpori na plaštu i pločama glavnog spremnika.....	23
<b>Tablica 4-2.</b> Poveznice parametara između kontrolnih volumena .....	31
<b>Tablica 4-3.</b> Ulazni podatci za simulaciju rada punionice vodika.....	37
<b>Tablica 4-4.</b> Radni vektori koje je potrebno inicijalizirati prije simulacije.....	38
<b>Tablica 5-1.</b> Tehnički ulazni parametri.....	42
<b>Tablica 5-2.</b> Procesni parametri i njihova ograničenja .....	47
<b>Tablica 5-3.</b> Usporedba rezultata provedenih simulacija .....	65
<b>Tablica 5-4.</b> Procjena potrebe za punjenjem glavnog spremnika s obzirom na rezultate simulacije.....	80

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

### Latinske oznake

$c_p$	spec. topl. kapacitet	J/kg/K
$q_m$	maseni protok	kg/s
$q^r$	komponenta zračenja	W/m <sup>2</sup>
$h$	spec. entalpija	J/kg/K
$A$	površina	m <sup>2</sup>
$D$	vanjski promjer plašta	m
$E$	energija	J, kJ
$L$	duljina	m
$P$	snaga	W, kW
$R$	toplinski otpor	K/W
$T$	temperatura	K, °C
$V$	volumen	m <sup>3</sup>
$d$	promjer cijevi	m
$f$	funkcija	
$m$	masa	kg
$p$	tlak	Pa, bar
$r$	brzina isparavanja	kg/s
$r$	polumjer	m
$s$	specifična entropija	J/kg/K
$t$	vrijeme	s
$u$	spec. unutarnja energija	J/kg/K
$v$	spec. volumen	m <sup>3</sup> /kg
$w$	brzina	m/s
$x$	sadržaj pare	-

### Grčke oznake

$\alpha$	koeficijent prijelaza topline	W/m <sup>2</sup> /K
$\beta$	koeficijent izobarnog širenja	-
$\delta$	debljina	m
$\lambda$	koeficijent topl. vodljivosti	W/m/K
$\rho$	gustoća	kg/m <sup>3</sup>
$\nu$	kinematička viskoznost	m <sup>2</sup> /s
$\varphi$	proizvoljna fizikalna veličina	-
$\chi$	omjer višesl. izol. i nosača	-
$\phi$	snaga toplinskog toka	W, kW

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

### Indeksi

*IS* unutarnja stijenka (engl. *Inner Shell*)

*L* kapljevita faza (engl. *Liquid*)

*OS* vanjska stijenka (engl. *Outer Shell*)

*V* plinovita faza (engl. *Vapor*)

*in* ulaz

*kond* konduktivni

*konv* konvektivni

*ok* vanjski, okolišni

*out* izlaz

*potp* potporanj

*s* stijenka

### Kratice

AAV zračni isparivač (engl. *Ambient Air Vaporizer*)

Buff međuspremnik, *buffer*

FCEV električno vozilo pogonjeno gorivnim člancima (engl. *Fuel Cell Electric Vehicle*)

GS glavni spremnik

Krio kriogeni

MLI višeslojna izolacija (engl. *Multi Layer Insulation*)

## 1. UVOD

Prije 148 godina, Jules Verne je u romanu Tajanstveni otok napisao izjavu o vodiku kao gorivu budućnosti, s obzirom na masovno korištenje ugljena 1874. godine: "*Vjerujem da će se jednog dana voda koristiti kao gorivo. Njeni konstituenti, vodik i kisik, u primjeni zajedno ili pojedinačno, pružati će neiscrpan izvor topline i svjetlosti intenzitetom kojemu ugljen ne može parirati*" (Verne, 1875).

Fosilna goriva (ugljen, nafta i prirodni plin) su u 20. stoljeću bila dominantan energent zaslužan za razvoj mnogih gospodarstava, ali i za pokretanje brojnih sukoba i ratova. Nadalje, u 21. stoljeću također je nastavljen trend dominacije fosilnih goriva na energetsom tržištu (Ritchie i Hoser, 2020). Europska unija (EU) pretežito je ovisna o uvozu energenata, pogotvo nafte i naftnih derivata i plina (Kemfert, 2019). U 2020. godini EU je uvozila 67 % primarne energije od čega 63 % otpada na uvoz nafte i naftnih derivata, a 27 % na prirodni plin (Eurostat, 2020). Od sredine 2021. godine, svjedoci smo ekstremnih stanja na tržištu energije u EU. Podzemna skladišta prirodnog plina ostala su na rekordno niskim stopama zapunjenosti (AGSI, 2022) i cijena prirodnog plina na europskim čvorištima dosegla je povijesno nezapamćene cijene (CEGH, 2022). U okolnostima ratnog stanja u Ukrajini, cijena nafte na tržištu također je narasla (Trading Economics, 2022). S obzirom na trenutno stanje na tržištu energije, geopolitičke okolnosti i na ovisnost o uvozu energije, EU je prisiljena na drastičnije ulaganje napora u cilju povećanja udjela obnovljivih izvora energije (OIE) kako bi se osigurala energetska neovisnost i stabilnost gospodarstva unutar članica EU (European Commission, 2019). Trenutno stanje na tržištu ide u korist intenzivnijem ulaganju u razvoj vodikove tehnologije, koja ima značajnu ulogu u energetskej tranziciji prema OIE (Bruch, 2022).

Europska unija ima vrlo pozitivan stav glede implementacije vodika u energetskej sektor (European Commission, 2020). Do 2050. godine, predviđa se da će udio vodika u europskom energetskej miksu porasti sa trenutačnih 2 % na 13 do 14 %. Europska strategija za vodik podijeljena je u 3 faze. Plan EU je instalirati kapacitete za proizvodnju zelenog vodika, elektrolizatore koji će viškove električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energija (vjetar i sunce) pohranjivati u obliku vodika. U 1. fazi, od 2020. do 2024. godine, EU planira instalirati elektrolizatore snage 6 GW, koji će proizvoditi milijun tona vodika godišnje. U 2. fazi, od 2025. do 2030., EU treba instalirati elektrolizatore snage najmanje 40 GW, koji će

proizvoditi 10 milijuna tona vodika. U 3. fazi, od 2030. do 2050., vodikova tehnologija bi se trebala široko primjenjivati u svim sektorima. Kako bi se ostvarili ciljevi do 2030., bit će potrebno uložiti između 24 i 42 milijarde EUR za elektrolizatore, 220 do 340 milijardi EUR za povećanje kapaciteta obnovljivih izvora energije, oko 65 milijardi EUR u sektor transporta, distribuciju i skladištenje vodika te 850 do 1000 milijuna EUR za uvođenje dodatnih 400 punionica vodika.

U Europi postoji potencijal za proizvodnju 2250 TWh vodika do 2050., što je dovoljno za pogon 42 milijuna automobila, 1,7 milijuna kamiona, 250000 buseva i više od 5500 vlakova (Hydrogen Europe, 2019). Do 2030., vozila na vodikove gorivne čelije (FCEV) mogla bi činiti 1 od 22 osobna automobila i 1 od 12 lakih kamiona, što je ukupno 3,7 milijuna FCEV-a i 500000 lakih kamiona. Vlakovi na vodikove gorivne čelije mogli bi zamijeniti oko 570 dizel vlakova do 2030. godine. Skandinavske države (Norveška, Danska i Švedska) planiraju implementirati više od 90 punionica vodika do 2025. EU će morati uložiti veliki napor kako bi ostvarila zadane ciljeve. Do 2030. nastojat će uspostaviti otvoreno, konkurentno i jedinstveno tržište vodika, planirati lokalnu proizvodnju vodika na mjestima lokalne potrošnje, izgraditi vodikovu infrastrukturu kako bi se vodik mogao implementirati u sektor transporta. Cilj Europe do kraja 2025. godine je uvesti 1000 punionica vodika.

U razdoblju od 2021. do 2030. godine, Hrvatska planira implementirati električna i hibridna vozila te vozila na vodikove gorivne čelije, čiji udio u ukupnoj putničkoj aktivnosti u cestovnom prometu dostiže 3,5 % u 2030. godini (Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, 2019). Republika Hrvatska je 7.2.2022. donijela Prijedlog Hrvatske strategije za vodik do 2050., a 25.3.2022. donesena je Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine. Prema Hrvatskoj strategiji za vodik do 2050. godine (NN 40/2022) važan preduvjet za njegovu primjenu u prometu je, uz nabavu vozila na vodikove gorivne čelije, istovremeni razvoj potrebne infrastrukture za punjenje i transport vodika. Pretpostavlja se da će do 2030. biti instalirano 70 MW elektrolizatora, a udio vodika u ukupnoj potrošnji energije iznositi 0,2 %. Do 2050. godine predviđa se instalacija 2750 MW elektrolizatora, a udio vodika bi u ukupnoj potrošnji energije trebao iznositi 11 %. Za ostvarenje navedenih ciljeva, potrebno je uložiti sveukupno 23,8 milijardi HRK. Ako Hrvatska uloži veliki napor, u potencijalnom scenariju ubrzanog razvoja vodikove tehnologije, do 2030. se predviđa instalacija 1272,73 MW elektrolizatora, pri čemu bi

udio vodika u ukupnoj potrošnji energije iznosio 3,75 %. Do 2050. godine predviđa se instalacija 7328,65 MW elektrolozatora uz udio vodika u ukupnoj potrošnji energije 15 %. Za ostvarenje ovih ciljeva, potrebno je uložiti sveukupno 70,2 milijardi HRK. Kako bi se osigurala primjena vodika u sektoru transporta, potrebno je do 2030. izgraditi 15 punionica vodika, a do 2050. godine 100 punionica. Realizacija navedenih 100 punionica zahtjeva kapitalnu investiciju u iznosu od 1,5 milijardi HRK.

Vodik se u SAD-u najviše primjenjuje kao sirovina u rafinerijama i proizvodnji amonijaka, a u manjoj mjeri za proizvodnju biogoriva i sintetičkih goriva (Menezes et al., 2020). Do 2050., udio vodika u ukupnoj potrošnji energije mogao bi iznositi od 1 % do 14 %, ovisno o mjerama ulaganja. U sektoru transporta, aktivno je 8800 osobnih vozila na vodikove gorivne čelije i 45 punionica vodika. Cilj SAD-a je postići cijenu vodika od \$2/kg na punionica vodika za sektor transporta, \$1/kg vodika za industrijsku primjenu i proizvodnju električne energije.

Japan je predvodnik u vodikovoj tehnologiji, prvenstveno u automobilima na vodikove gorivne čelije te nastoji zauzeti poziciju glavnog izvoznika vodikove tehnologije (Nakano, 2021). Cilj japanske strategije do 2030. je postići udio vodika od 1 % u ukupnoj potrošnji energije te ostvariti proizvodnju od 3 milijuna tona vodika godišnje. Ciljevi u sektoru transporta uključuju 200000 FCEV do 2025. i 800000 FCEV do 2030., za što će biti potrebno implementirati 320 punionica vodika do 2025. i 900 punionica do 2030. Financijski budget za ostvarivanje zacrtanog broja punionica procenjen je na \$120 milijuna. U Japanu je u 2021. godini zabilježeno 134 punionice vodika (Statista, 2022).

Potrošnja vodika u 2020. godini u svijetu iznosila je oko 90 milijuna tona (International Energy Agency [IEA], 2021). Glavnina se koristila u rafinerijama i industriji, a mali dio za proizvodnju metanola i u metalurškoj industriji. U sektoru transporta, udio vodika u 2020. godini zauzimao je manje od 0,01 % potrošnje energije. U 2021. godini, u prometu je bilo oko 40000 FCEV, pri čemu je u istoj godini prodano najviše vozila, više od 8000. Kina je prihvatila implementaciju vodikove tehnologije u sektor prometa te se većinom bazira na uvođenju buseva i teretnih vozila na tržište, dok se SAD više orijentira na primjenu vodika u osobnim automobilima. Europa se do 2030. također više orijentira na primjenu vodikove tehnologije za buseve, teretna vozila i vlakove. Prema procjeni IEA, do 2030. bi na tržištu bilo oko 6 milijuna FCEV. Krajem 2020., u svijetu je bilo aktivno više od 553 punionica vodika (PR Newswire,



2022). U Europi je u 2020. zabilježeno 200 punionica vodika. U Kini je u 2020. godini bilo aktivno 69 punionica vodika, a do 2030. planira izgraditi 1000 punionica vodika.

U EU je u 2021. zabilježeno 136 punionica vodika (European Alternative Fuels Observatory [EAFO], 2022). Njemačka je sa 89 punionica predvodnik u EU. Nakon Njemačke slijedi Francuska sa 19 punionica, Nizozemska sa 7 punionica, Danska sa 6 punionica te Austrija sa 5 punionica. Njemačka planira proširiti infrastrukturu na 400 punionica vodika do 2023. (Linde Englineering, 2022).

Prema Hydrogen Mobility Europe (2021) do kraja srpnja 2020. godine, u Europi je implementirano 138 punionica vodika. 84 u Njemačkoj, 12 u Francuskoj, 11 u Ujedinjenom Kraljevstvu, 9 u Danskoj, 5 u Austriji, 4 u Nizozemskoj, 4 u Švedskoj, 3 u Norveškoj, 2 u Belgiji i 1 u Italiji.

U ovome diplomskom radu, naglasak je prvenstveno na simulaciji rada hipotetske punionice vodika uz primjenu vlastitog računalnog modela.

## 2. OSNOVNA SVOJSTVA VODIKA

Vodik je najmanja i najlakša molekula u periodnom sustavu elemenata (American Chemical Society, 2020). Pri atmosferskim uvjetima bezbojan je plin, lakši od zraka, lako zapaljiv u mješavini sa zrakom pri čemu gori plavičastim plamenom (Pub Chem, 2022). Produkt gorenja vodika je vodena para (Energy education, 2017). U Tablica 2-1. prikazana su osnovna svojstva vodika pri standardnim uvjetima. Veoma niske točke isparavanja i kondenzacije su posljedica ekstremno slabih privlačnih sila između molekula vodika (Jolly, 2020).

Vodik ima najvišu energetska gustoću od svih goriva izraženu po masi, ali ne i po volumenu (Hydrogen Tools). U usporedbi sa prirodnim plinom, vodik sadrži 120 MJ/kg (Molloy, 2019), dok plin ovisno o njegovom sastavu sadrži oko 55 MJ/kg (World Nuclear Association, 2022). Problem kod vodika je izrazito mala energetska gustoća izražena po volumenu. Ukapljeni vodik sadrži svega 8 MJ/L, a u plinovitom stanju pri 700 bar oko 4 MJ/L (U.S. Department of Energy). Niske vrijednosti energije izražene po volumenu predstavljaju problem prilikom skladištenja vodika, u plinovitom stanju mora se stlačiti na izrazito visoke vrijednosti tlaka (700 bar) kako bi se zadovoljila potreba za energijom.

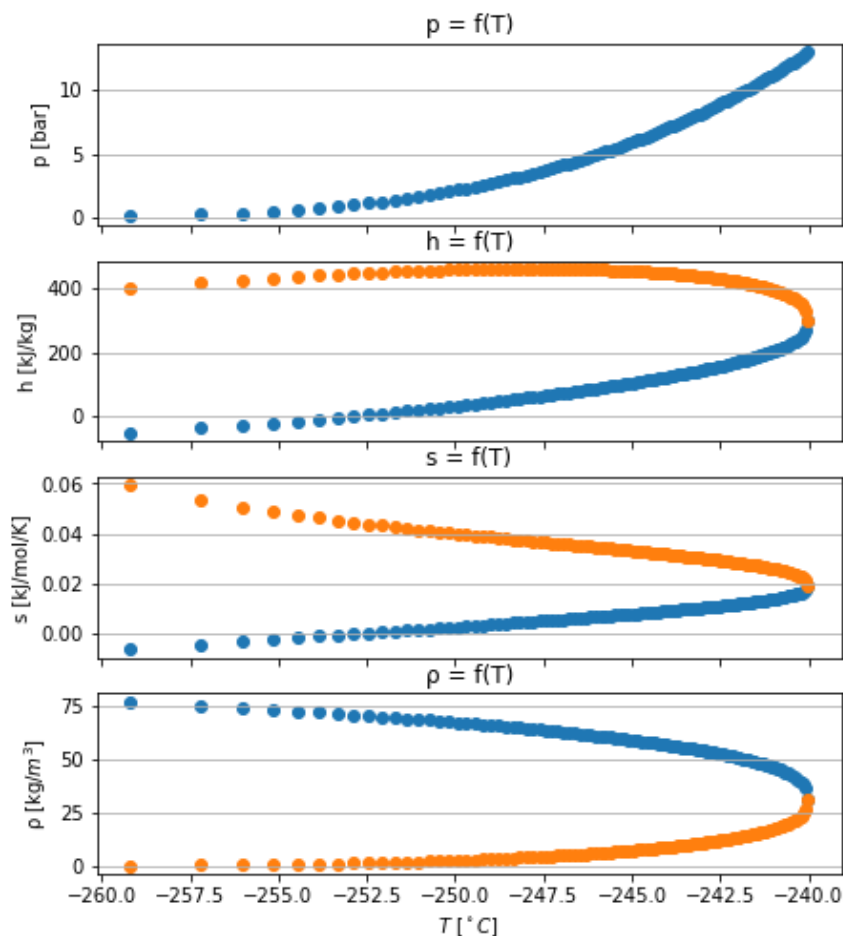
**Tablica 2-1.** Osnovna svojstva vodika pri standardnim uvjetima (modificirano prema The Engineering Toolbox, 2022)

Molarna masa [kg/mol]	2,016
Specifična težina [-]	0,07
Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	0,0813
Specifični toplinski kapacitet [kJ/kgK]	14,31
Plinska konstanta [J/kg °C]	4126
Toplinska vodljivost [W/m °C]	0,182
Kritični tlak [bar]	12,86
Kritična temperatura [°C]	-240,2
Točka isparavanja [°C]	-252,9
Točka kondenzacije [°C]	-259,1
Tlak u trojnoj točki [bar]	0,074
Temperatura u trojnoj točki [°C]	-259,15

Joule-Thompsonov efekt opisuje promjenu temperature prilikom ekspanzije realnog plina kroz ventil (Fleming, 2022). Na atmosferskoj temperaturi, prilikom ekspanzije plina kroz ventil sa većeg ka manjem tlaku, dolazi do smanjenja temperature plina (Horbaniuc, 2004). Ekspanzija plina kroz ventil je izentalpski proces, ne dolazi do izmjene topline sa okolinom (Moran et al., 2006). U odnosu na ostale realne plinove, kada vodik ekspandira kroz ventil, dolazi do povećanja njegove temperature (Chen et al., 2018).

## 2.1. Fazni dijagram vodika

Na Slika 2-1. prikazani su dijagrami pojedinih svojstava vodika u podkritičnom području u ovisnosti o promjeni temperature. Podkritično područje vodika kreće se od trojne točke, koja je na tlaku od 0,74 bar i temperaturi od  $-259,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  do kritične točke, čija je vrijednost tlaka 12,86 bar i temperature  $-240,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Trojna točka je točka na faznom dijagramu u kojoj su plinovito, tekuće i kruto agregatno stanje tvari u termodinamičkoj ravnoteži, a definirana je vrijednostima tlaka i temperature (The Englineering Toolbox, 2022). Kritična točka je zadnja točka na faznom dijagramu u kojoj mogu koegzistirati tekuća i plinovita faza, u njoj završava krivulja tlaka para, a definirana je kritičnim vrijednostima tlaka i temperature (Englineers edge, 2022). Iznad kritične temperature, fluid se ne može ukapljiti bez obzira na promjenu tlaka.



Slika 2-1. Fazni dijagram vodika u podkritičnom području

Prvi dijagram na Slika 2-1. predstavlja fazni dijagram vodika. S obzirom na činjenicu da se radi o jednodimenzionalnom sustavu (samo vodik), u p-T dijagramu plava krivulja povezuje uvjete tlaka i temperature pri kojima mogu postojati tekuća i plinska faza te se naziva krivulja tlaka para (Goričnik, 2006). To znači da je vodik pri uvjetima tlaka i temperature u području lijevo od krivulje u kapljevitom stanju, dok je pri uvjetima tlaka i temperature u području desno od krivulje u plinovitom stanju.

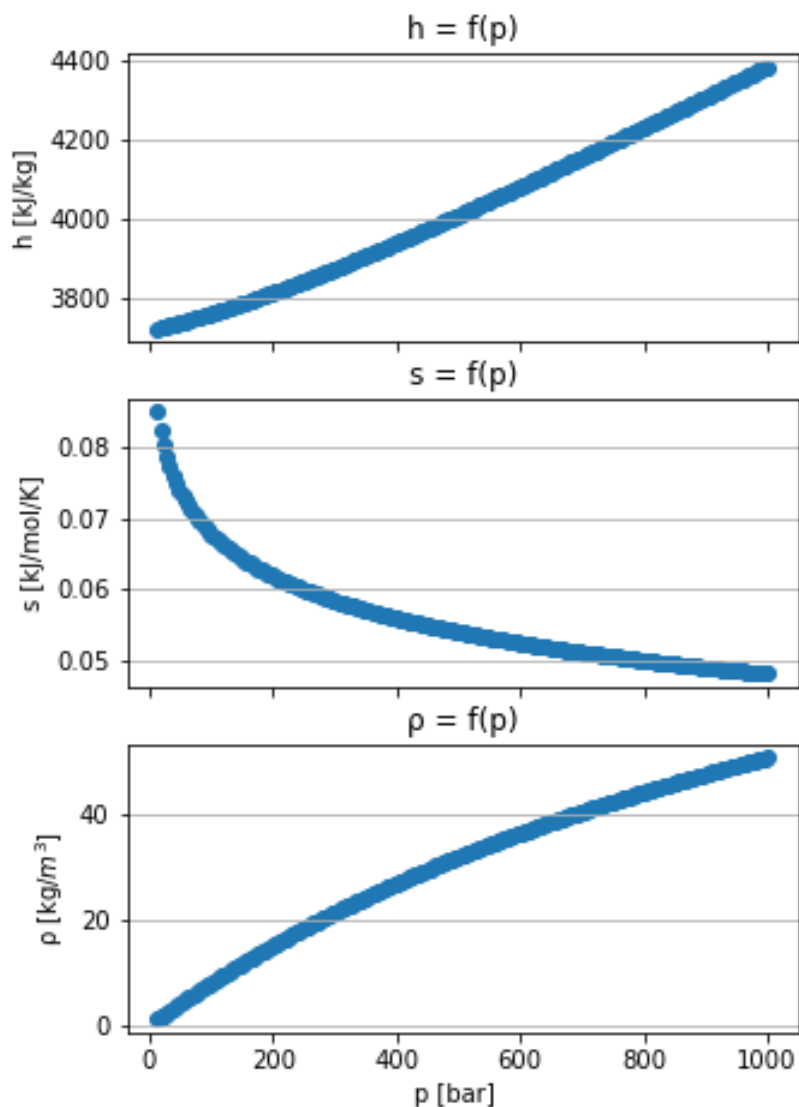
Na drugom dijagramu, plava krivulja prikazuje promjenu entalpije u ovisnosti o promjeni tlaka u podkritičnom području pri uvjetu zasićene kapljevine. Narančasta krivulja prikazuje promjenu entalpije u ovisnosti o promjeni tlaka u podkritičnom području pri uvjetu zasićene pare. Entalpija je termodinamičko stanje koje je jednako zbroju unutarnje energije sustava i umnoška tlaka i volumena (Budini i Bogdanić, 2012). Sadržaj pare predstavlja maseni udio pare u ravnotežnom stanju kapljevine-plin (Cengel i Boles, 2014). Pri uvjetu zasićene kapljevine, sadržaj pare je 0 %, odnosno maseni udio pare u kapljevine jednak je nula. Pri uvjetu zasićene pare, sadržaj pare je 100 %, odnosno maseni udio pare jednak je jedan. Iz dijagrama je vidljivo da pri uvjetu zasićene kapljevine, entalpija kontinuirano raste od trojne do kritične točke. Na tlaku u trojnoj točki ima vrijednost -53,93 kJ/kg, a na tlaku u kritičnoj točki 298,16 kJ/kg. Pri uvjetu zasićene pare, na tlaku u trojnoj točki entalpija iznosi 399,83 kJ/kg i dostiže maksimum na tlaku od 3,59 bar te iznosi 463,44 kJ/kg. Daljnjim povećanjem tlaka, entalpija pada do kritične točke.

Na trećem dijagramu, plava krivulja prikazuje promjenu entropije u ovisnosti o promjeni tlaka u podkritičnom području pri uvjetu zasićene kapljevine. Narančasta krivulja prikazuje promjenu entropije u ovisnosti o promjeni tlaka u podkritičnom području pri uvjetu zasićene pare. Entropija je termodinamičko stanje koje je jednako omjeru beskonačno male promjene topline i konstantne temperature (Britannica, 2022). Pri uvjetu zasićene kapljevine, entropija raste s porastom tlaka od trojne do kritične točke, a pri uvjetu zasićene pare pada s porastom tlaka od trojne do kritične točke.

Zadnji dijagram prikazuje promjenu gustoće vodika u podkritičnom području u ovisnosti o promjeni tlaka. Plava krivulja prikazuje promjenu gustoće u ovisnosti o promjeni tlaka u podkritičnom području pri uvjetu zasićene kapljevine. Maksimalna vrijednost gustoće vodika u ovom području je u trojnoj točki i iznosi 77,0 kg/m<sup>3</sup>, a pada s povećanjem tlaka prema kritičnoj

točci. Narančasta krivulja prikazuje promjenu gustoće u ovisnosti o promjeni tlaka u podkritičnom području pri uvjetu zasićene pare. Minimalna vrijednost je u trojnoj točki i iznosi  $0,13 \text{ kg/m}^3$ , raste s povećanjem tlaka i u kritičnoj točki dostiže vrijednost od  $31,26 \text{ kg/m}^3$ .

Na Slika 2-2. prikazani su dijagrami pojedinih svojstava vodika u nadkritičnom području pri konstantnoj temperaturi od  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tlak se kreće u rasponu od kritičnog tlaka do  $1000 \text{ bar}$ . Nadkritično područje predstavlja sve vrijednosti tlaka i temperature iznad kritične točke, gdje se vodik nalazi samo u plinovitom stanju.



**Slika 2-2.** Kretanje pojedinih svojstava vodika u nadkritičnom području pri konstantnoj temperaturi

Prvi dijagram prikazuje promjenu entalpije u nadkritičnom području. Iz dijagrama se može vidjeti da entalpija kontinuirano raste s porastom tlaka te se kreće u rasponu od 3865,33 kJ/kg do 4537,07 kJ/kg.

Drugi dijagram prikazuje promjenu entropije u nadkritičnom području. Porastom tlaka pri konstantnoj temperaturi, entropija pada.

Treći dijagram prikazuje promjenu gustoće u nadkritičnom području. Gustoća raste sa porastom tlaka. Pri konstantnoj temperaturi od 20 °C, vodik pri kritičnom tlaku ima gustoću 1,06 kg/m<sup>3</sup>, a pri 1000 bar iznosi 49,94 kg/m<sup>3</sup>.

Dijagrami na Slika 2-1. i Slika 2-2. napravljeni su u programskom jeziku Python koristeći CoolProp modul. Python je interpreterski, viši programski jezik opće namjene (Python™, 2022). Široko se primjenjuje u znanstvenom i numeričkom računanju zbog mogućnosti rada sa različitim bazama podataka i velikog broja modula, koji su dostupni korisnicima. CoolProp je baza podataka iz C++ programskog jezika, koja sadrži fundamentalne jednadžbe stanja i korelacije za 122 fluida (CoolProp, 2022). Ova baza podataka kompaktibilna je sa Python-om. Za izradu faznog dijagrama vodika i njegovih svojstava, iz CoolProp-a se uzimaju podatci o svojstvima fluida.

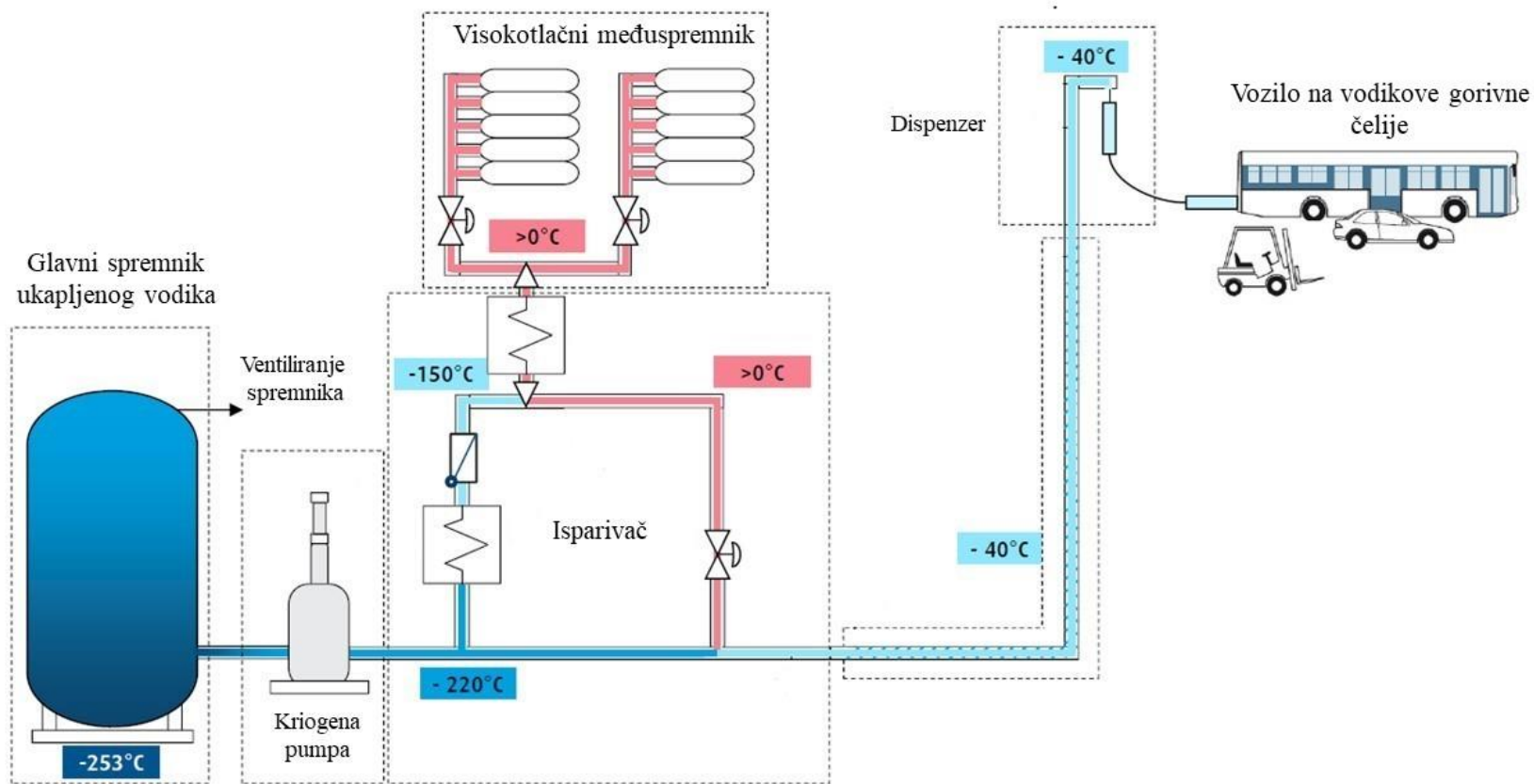
Za izradu faznog dijagrama, prvo je potrebno unijeti početne uvjete kojima se definira podkritično područje. U ovom slučaju, početni uvjet je tlak u rasponu od trojne do kritične točke. Zatim se poziva CoolProp koji za svaki korak tlaka u navedenom rasponu daje vrijednost temperature pri uvjetu zasićene kapljevine. Analogno izradi faznog dijagrama izrađuju se svi ostali dijagrami.

### 3. TEMELJNI PRINCIP RADA PUNIONICE VODIKA

Postoje dva osnovna tipa punionice vodika, punionica sa ukapljenim i stlačenim vodikom. U punionici sa ukapljenim vodikom, plin je u tekućem stanju uskladišten u spremnik vodika pri kriogenim uvjetima. U punionici sa stlačenim vodikom, plin je uskladišten u glavnom spremniku u plinovitom stanju na visokim vrijednostima tlaka.

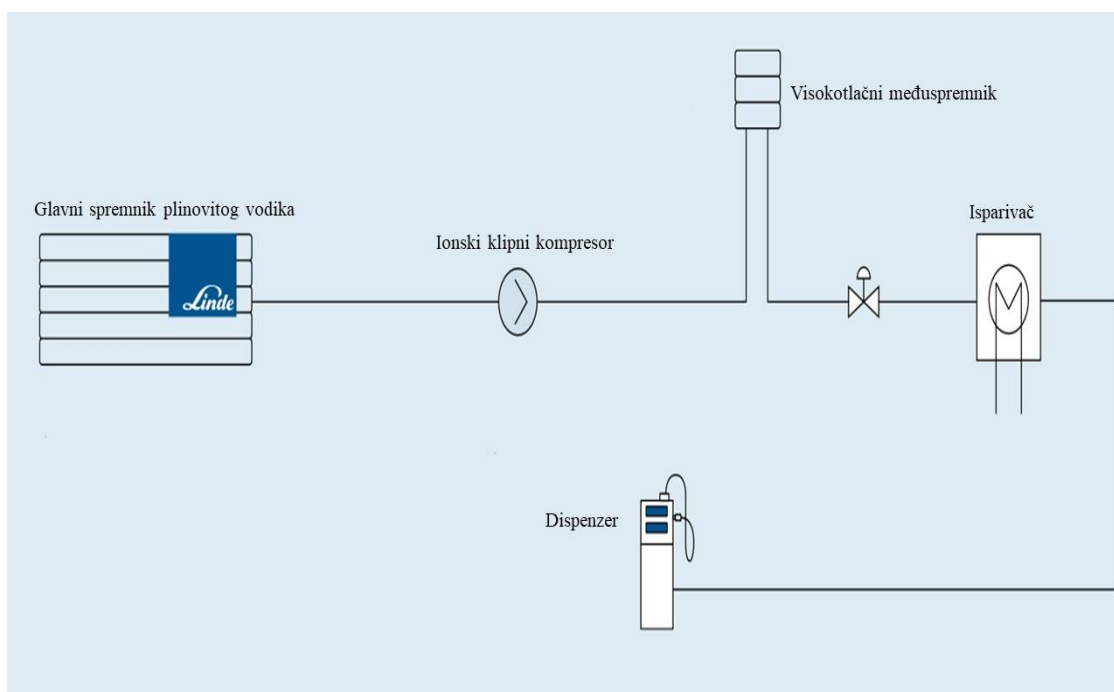
Osnovni elementi punionice sa ukapljenim vodikom su glavni spremnik vodika, kriogena pumpa, isparivač, visokotlačni međuspremnik i dispenzer (Linde englineering, 2022). U glavnom spremniku nalazi se ukapljeni vodik na  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Iz glavnog spremnika, vodik ulazi u kriogenu pumpu, a iz nje izlazi u plinovitom stanju na 900 bar i  $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vodik u ovim uvjetima prolazi kroz isparivač gdje mu se povećava tlak uslijed izmjene topline sa okolnim zrakom. Iz isparivača ulazi u visokotlačni međuspremnik gdje je privremeno uskladišten na 1000 bar i atmosferskoj temperaturi. Nakon što se vozilo spojilo na dispenzer, vodik iz visokotlačnog međuspremnika i kriogene pumpe kreće prema dispenzeru. U cijevi koja vodi do dispenzera, miješanjem vodika iz visokotlačnog međuspremnika koji je na atmosferskoj temperaturi i vodika iz pumpe koji je na  $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ , postiže se optimalna temperatura vodika od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  pri kojoj ulazi u spremnik u vozilu (Reddi, 2017). U vozilu, vodik se nalazi u plinovitom stanju na 700 bar. Shematski prikaz rada punionice sa ukapljenim vodikom prikazan je na Slika 3-1.





Slika 3-1. Model punionice sa ukapljenim vodikom (modificirano prema Decker, 2019)

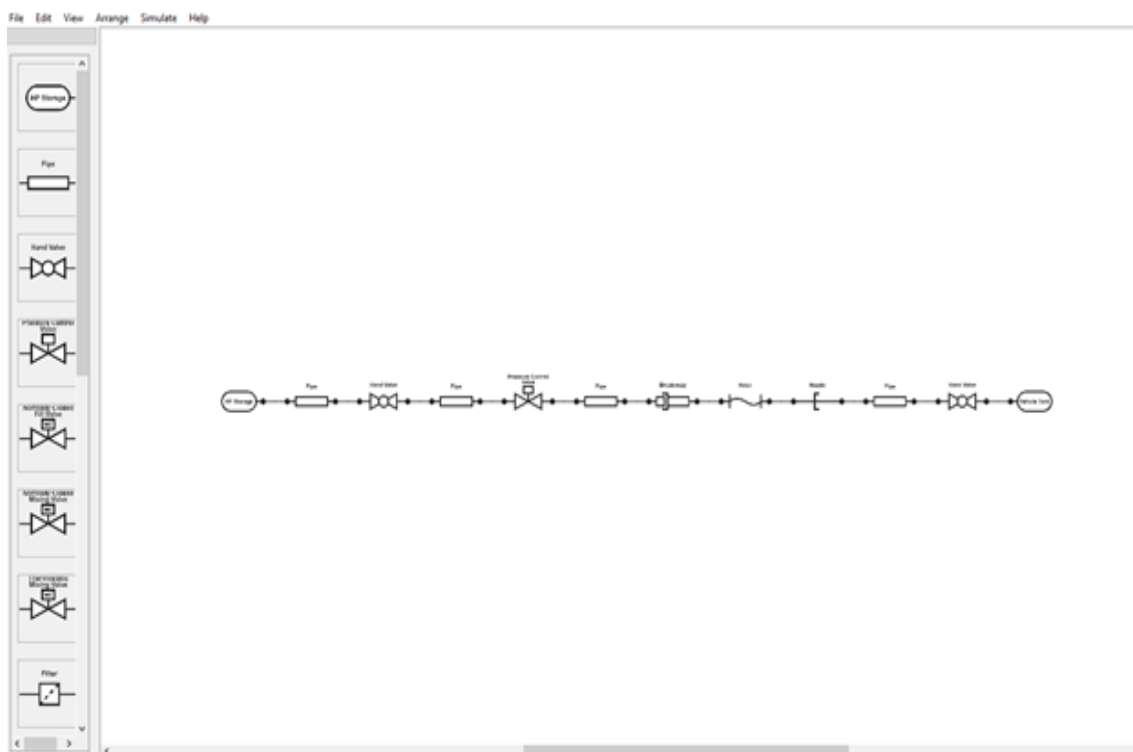
Punionica sa stlačenim vodikom, radi na sličnom principu kao i prethodno opisana punionica. Osnovni elementi punionice sastoje se od glavnog spremnika plinovitog vodika, ionskog klipnog kompresora, visokotlačnog međuspremnika, kontrolnih ventila, isparivača i dispenzera (Slika 3-2.). Priključivanjem vozila na dispenzer, vodik iz glavnog spremnika ulazi u klipni ionski kompresor. Spremnik vodika je na tlaku manjem od 200 bar, s obzirom da je ulazni tlak kompresora od 6 do 200 bar (Linde engineering, 2021), a vodik izlazi pod tlakom od 900 bar. Stlačeni vodik se privremeno skladišti u visokotlačnom međuspremniku te prolazi kroz isparivač gdje se prethlađuje na temperaturu od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  prije ulaska u dispenzer.



**Slika 3-2.** Model punionice sa stlačenim vodikom (modificirano prema Linde engineering, 2021)

### 3.1. The Hydrogen Filling Simulation (H2Fills) software

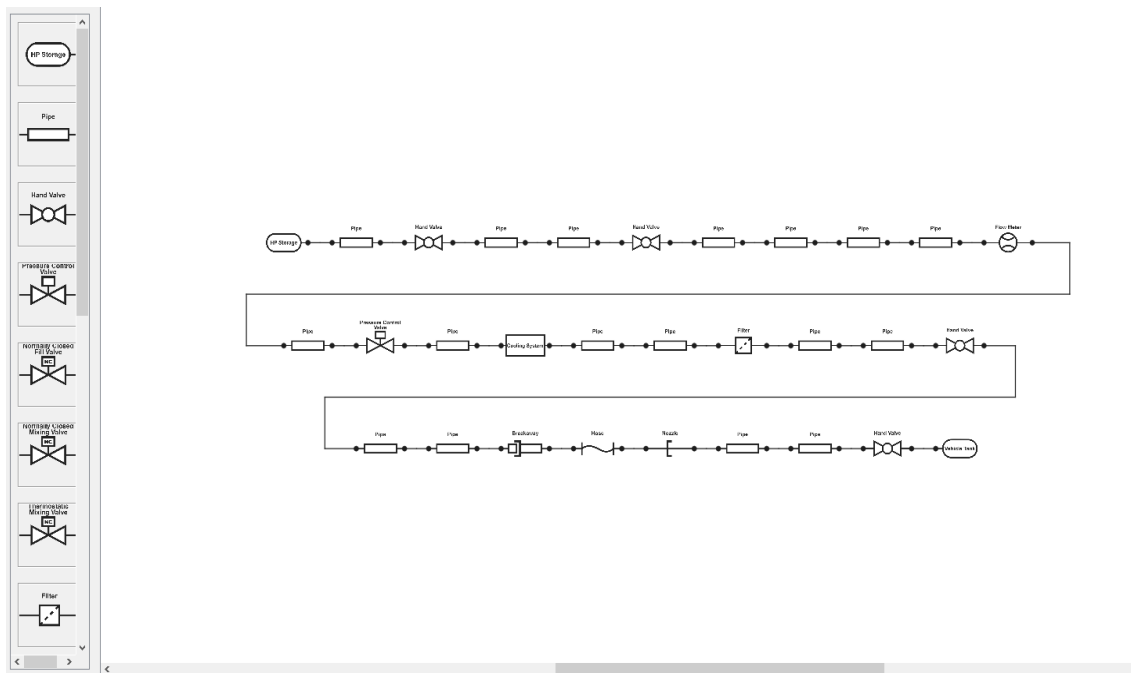
H2Fills je software čija je glavna zadaća računanje termodinamičkih parametara vodika (tlak, temperatura, protok) prilikom punjenja vozila (National renewable energy laboratory [NREL], 2022). Ovaj software razvio je NREL, institucija u vlasništvu Ministarstva energetike Sjedinjenih Američkih Država, koja se bavi znanstvenim istraživanjem i razvojem obnovljivih izvora energije, održivog transporta, energetske učinkovitosti i optimizacijom energetskih sustava. H2Fills simulira protok vodika od punionice do vozila kako bi se odredili parametri potrebni za dizajniranje punionice vodika. Postavke H2Fills software-a pretpostavljaju da je vodik u plinovitom stanju cijelo vrijeme, od spremnika vodika do spremnika u vozilu.



**Slika 3-3.** Sučelje programa H2Fills

Program omogućava vizualizaciju redosljeda komponenata punionice vodika, od spremnika vodika do vozila. Klikom na pojedinu komponentu sustava definiraju se ulazni parametri modela (Tablica 3-1.). Na Slika 3-3. prikazana je najosnovnija konfiguracija sa minimalnim brojem komponenata potrebnim za pokretanje simulacije. Ona uključuje visoko tlačni spremnik

vodika, cijevi, ventile za kontrolu tlaka, dispencer, crijevo i mlaznicu te spremnik u vozilu (Kuroki et al., 2021).



**Slika 3-4.** NREL konfiguracija punionice vodika sa prethlađenjem vodika

Na Slika 3-4. prikazana je konfiguracija stvarne punionice vodika koju je NREL konstruirao i na njoj provodio simulacije. Važna promjena u odnosu na osnovnu konfiguraciju je dodavanje sustava za prethlađenje vodika na  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  prije ulaska u dispencer.

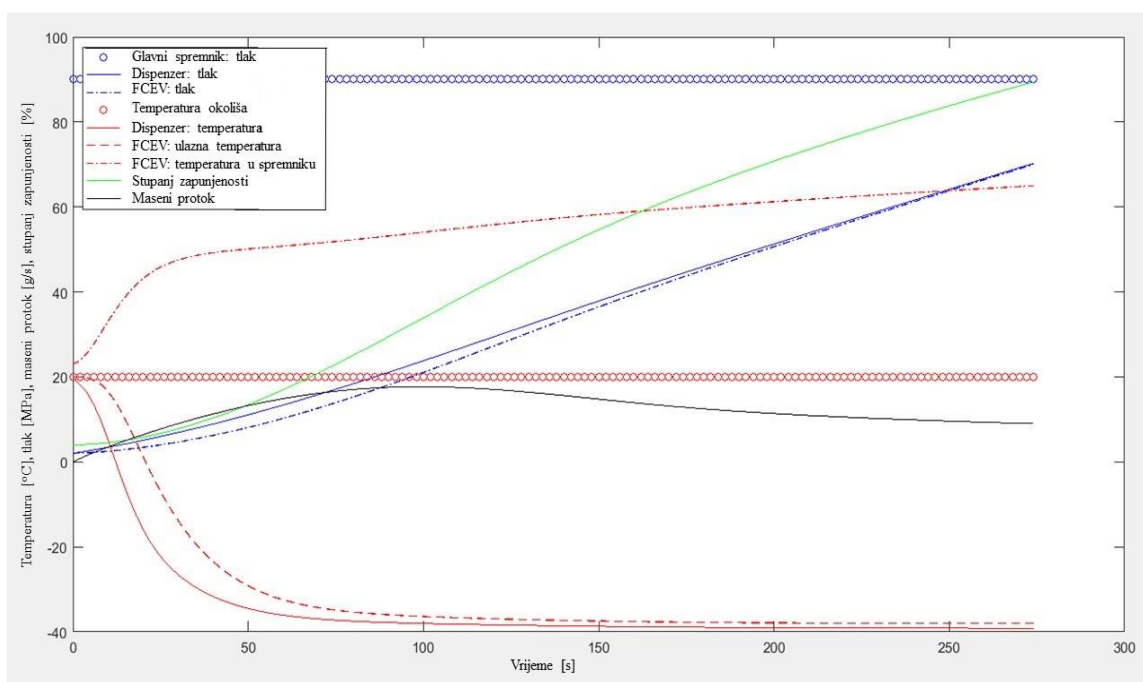
**Tablica 3-1.** Ulazni parametri koje je potrebno definirati za pojedinu komponentu prije provođenja simulacije.

Spremnik vodika	tlak [bar]
Cijevi	vanjski promjer [m], duljina [m]
Ventili	Koeficijent protoka [-]
Sustav prethlađivanja vodika	Izlazna temperatura vodika [°C]
Dispenser	vanjski promjer [m], unutarnji promjer [m] duljina [m], toplinska vodljivost materijala [W/mK], koeficijent prijenosa topline [W/m <sup>2</sup> K], koeficijent protoka [-]
Crijevo	vanjski promjer [m], unutarnji promjer [m] duljina [m], toplinska vodljivost materijala [W/mK], koeficijent prijenosa topline [W/m <sup>2</sup> K], koeficijent protoka [-]
Mlaznica	vanjski promjer [m], unutarnji promjer [m] duljina [m], toplinska vodljivost materijala [W/mK], koeficijent prijenosa topline [W/m <sup>2</sup> K], koeficijent protoka [-]
Spremnik u vozilu	Temperatura [°C], početni tlak [MPa], unutarnja površina [m <sup>2</sup> ], volumen [m <sup>3</sup> ], duljina [m], promjer [m], debljina [m], toplinska vodljivost materijala [W/mK].

Prije pokretanja simulacije, potrebno je postaviti profil punjenja, na način da se definiraju opći uvjeti i konačni uvjeti. Opći uvjeti su atmosferska temperatura, a konačni uvjeti su tlak u spremniku u vozilu, temperatura u spremniku vozila i postotak zapunjenosti spremnika.

Rezultati simulacije punjenja vozila vodikom obuhvaćaju niz podataka o predikciji protoka vodika, temperature i kretanja tlaka na pojedinim komponentama u ovisnosti o proteklom vremenu (Slika 3-5.). U postavkama H2Fills programa zadano je da ciklus punjenja traje 5 minuta. Početna pretpostavka proračuna glasi, tlak prije kontrolnog ventila jednak je tlaku

spremnika vodika, a tlak iza kontrolnog ventila jednak je konačnom tlaku spremnika u vozilu, temperatura u cijelom sustavu je atmosferska. Program računa iznos tlaka iza kontrolnog ventila, na dispenceru i u spremniku u vozilu. S obzirom na padove tlaka kroz ostale komponente sustava, realna vrijednost tlaka na dispenceru i u spremniku je nešto manja od vrijednosti tlaka neposredno iza kontrolnog ventila. Osim iznosa tlaka, program računa i vrijednost temperature vodika na izlazu iz kontrolnog ventila, na dispenceru, na ulazu u spremnik vozila i u samom spremniku vozila.



**Slika 3-5.** Grafički prikaz rezultata simulacije punjenja vodikom iz programa H2FillS

## 4. METODOLOGIJA

Model se sastoji od jednadžbi održanja mase i energije:

- glavnog spremnika,
- zračnog isparivača (AAV) i
- visokotlačnog međuspremnik,
- spremnika vozila (FCEV)

kao i od pomoćnih jednadžbi koje definiraju tijek procesa, odn. vrijednosti upravljačkih varijabli.

Termodinamičke varijable određujemo modulom CoolProp (Bell, 2014.) u kojem na temelju dviju nezavisnih specifičnih termodinamičkih varijabli možemo odrediti treću, nepoznatu:

$$\varphi_{out} = f_{CoolProp}(\varphi_{in1}, \varphi_{in2}) \quad (4-1)$$

gdje su:  $\varphi_{out}$  - treća nepoznata proizvoljna fizikalna veličina (-),

$f_{CoolProp}$  - CoolProp funkcija (-),

$\varphi_{in1}$  - prva nezavisna proizvoljna fizikalna veličina (-),

$\varphi_{in2}$  - druga nezavisna proizvoljna fizikalna veličina (-).

Termodinamička svojstva su računata temeljem pojedinih jednadžbi stanja (Leachman, 2009.), kao i dodatnim relacijama za korekcije za koeficijent toplinske vodljivosti (Assael, 2011.) i viskoznost (Muzny, 2013.).

### 4.1. Glavni spremnik

U glavnom spremniku se nalazi vodik u faznoj ravnoteži na vrlo niskim temperaturama i tlaku koji je blizu okolišnom. Osim prodora toplinskog toka uslijed razlika temperatura, spremnik energiju izmjenjuje i kod nadopunjavanja kapljevitim vodikom (stanje „0“) i kod pražnjenja strujanjem kapljevitog vodika prema AAV-u i visokotlačnom međuspremniku preko pumpe koja je uronjena u kapljeviti vodik u samom spremniku. Model je tzv. homogeni model,

koji pretpostavlja da su unutar kapljevite i plinovite faze, odn. volumenu koje iste zauzimaju unutar glavnog spremnika svojstva konstantna. Drugim riječima, ne uzima se moguća povišena temperatura vodika u blizini stijenke u odnosu na centralni dio spremnika. Glavni spremnik modeliramo kao jedan jedinstveni kontrolni volumen. Također, tlak i temperatura su isti za obje faze. Razlikuju se gostoće, specifični volumeni i entalpije kapljevite i plinovite faze.

$$\frac{dm^{GS}}{dt} = -q_{m,V,out}^{GS} + q_{m,L,in}^{GS} - q_{m,L,out}^{GS} \quad (4-2)$$

$$\frac{dE^{GS}}{dt} = -q_{m,V,out}^{GS} h_V^{GS} + q_{m,L,in}^{GS} h_{L,in}^0 - q_{m,L,out}^{GS} h_L^{GS} + \phi^{GS} \quad (4-3)$$

gdje su:  $\frac{dm^{GS}}{dt}$  - promjena mase unutar glavnog spremnika u vremenu;

$q_{m,V,out}^{GS}$  - izlazni maseni protok plinovitog dijela (kg/s),

$q_{m,L,in}^{GS}$  - ulazni maseni protok kapljeviteg dijela (kg/s),

$q_{m,L,out}^{GS}$  - izlazni maseni protok kapljeviteg dijela (kg/s),

$\frac{dE^{GS}}{dt}$  - promjena energije unutar glavnog spremnika;

$h_V^{GS}$  - specifična entalpija plinovitog dijela unutar glavnog spremnika (kJ/kg),

$h_L^{GS}$  - specifična entalpija kapljeviteg dijela unutar glavnog spremnika (kJ/kg),

$\phi^{GS}$  - prodor topline u glavni spremnik (W).

Pri čemu se energija u glavnom spremniku može raspisati kao kao umnožak mase glavnog spremnika i specifične unutarnje energije.

$$E^{GS} = m^{GS} u^{GS} \quad (4-4)$$

odn. u diferencijalnom obliku

$$dE^{GS} = m^{GS} \partial(u^{GS}) + u^{GS} \partial(m^{GS}) \quad (4-5)$$

čime se gornja jednadžba za održanje energije može zapisati u obliku



$$m^{GS} \frac{\partial u^{GS}}{\partial t} + u^{GS} \frac{\partial m^{GS}}{\partial t} = -q_{m,V,out}^{GS} h_V^{GS} + q_{m,L,in}^{GS} h_{L,in}^0 - q_{m,L,out}^{GS} h_L^{GS} + \phi^{GS} \quad (4-6)$$

gdje su:  $E^{GS}$  - energija u glavnog spremniku (J),

$m^{GS}$  - masa u glavnog spremniku (kg),

$u^{GS}$  - specifična unutarnja energiju u glavnom spremniku (J/kg).

Gornje jednadžbe rješavamo integriranjem

$$m^{GS} = m^{GS,0} + \int_{t_0}^{t_1} (-q_{m,V,out}^{GS} + q_{m,L,in}^{GS} - q_{m,L,out}^{GS}) dt \quad (4-7)$$

$$u^{GS} = u^{GS,0} + \int_{t_0}^{t_1} \left( -q_{m,V,out}^{GS} h_V^{GS} + q_{m,L,in}^{GS} h_{L,in}^0 - q_{m,L,out}^{GS} h_L^{GS} + \phi^{GS} - u^{GS,0} \frac{\partial m^{GS}}{\partial t} \right) dt \quad (4-8)$$

Pri čemu dobijemo nove vrijednosti za  $m^{GS}$  i  $u^{GS}$ .

Varijable  $q_{m,V,out}^{GS}$ ,  $q_{m,L,in}^{GS}$  i  $q_{m,L,out}^{GS}$  su upravljačke varijable koje ovise o tijeku procesa i biti će objašnjene u zasebnom poglavlju. Specifična entalpija novo dobavljenog ukapljenog vodika je određena unaprijed određenim parametrima ( $T_L^0, p_L^0$ ) koje namješta korisnik

$$h_{L,in}^0 = f_{CoolProp}(T_L^0, p_L^0) \quad (4-9)$$

gdje su:  $T_L^0$  - temperatura ukapljenog vodika (K),

$p_L^0$  - tlak ukapljenog vodika (Pa).

Prosječna gustoća i prosječni specifični volumen u glavnom spremniku se mogu odrediti pomoću formule

$$\rho^{GS} = \frac{1}{v^{GS}} = \frac{m^{GS}}{V^{GS}} \quad (4-10)$$

gdje su:  $\rho^{GS}$  - gustoća u glavnom spremniku (kg/m<sup>3</sup>),  
 $v^{GS}$  - specifični volumen u glavnom spremniku (m<sup>3</sup>/kg),  
 $m^{GS}$  - masa u glavnom spremniku (kg),  
 $V^{GS}$  - volumen u glavnom spremniku (m<sup>3</sup>).

I time dobivamo dvije nezavisne varijable koje mogu poslužiti za određivanje ostalih prosječnih termodinamičkih veličina u glavnom spremniku pomoću CoolProp-a:

$$x^{GS}, h^{GS}, p^{GS}, T^{GS} = f_{CoolProp}(u^{GS}, \rho^{GS}) \quad (4-11)$$

gdje su:  $x^{GS}$  - sadržaj pare (-),  
 $h^{GS}$  - specifična entalpija u glavnom spremniku (kJ/kg),  
 $p^{GS}$  - tlak u glavnom spremniku (Pa),  
 $T^{GS}$  - temperatura u glavnom spremniku (K).

Naposlijetku možemo pronaći specifičnu entalpiju i gustoću (i specifični volumen) kapljevitog i plinovite faze vodika u spremniku.

$$h_L^{GS}, \rho_L^{GS} = f_{CoolProp}(T^{GS}, x = 0) \quad (4-12)$$

$$h_V^{GS}, \rho_V^{GS} = f_{CoolProp}(T^{GS}, x = 1) \quad (4-13)$$

gdje su:  $\rho_L^{GS}$  - gustoća ukapljenog vodika (kg/m<sup>3</sup>),  
 $\rho_V^{GS}$  - gustoća plinovitog vodika (kg/m<sup>3</sup>),  
 $h_V^{GS}$  - specifična entalpija plinovitog vodika (kJ/kg).

Konačne mase kapljevitog i plinovite faze u spremniku su:

$$m_V^{GS} = m^{GS} x^{GS} \quad (4-14)$$

$$m_L^{GS} = m_V^{GS}(1 - x^{GS}) \quad (4-15)$$

gdje su:  $m_V^{GS}$  - masa plinovitog vodika (kg),

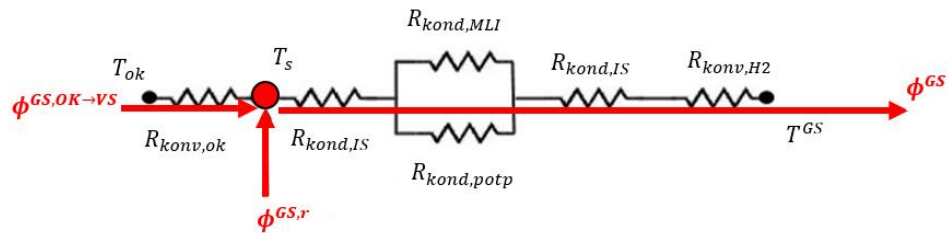
$m_L^{GS}$  - masa ukapljenog vodika (kg).

Brzinu isparavanja možemo izračunati iz formule

$$r_{L \rightarrow V}^{GS} = \frac{dm_V^{GS}}{dt} \quad (4-16)$$

gdje je:  $r_{L \rightarrow V}^{GS}$  - brzina isparavanja (kg/s).

Prodor topline u glavni spremnik ( $\phi^{GS}$ ) je određen toplinskim tokom između okolnog zraka i vodika u glavnom spremniku. Sastoji se od konvektivno-konduktivnog toplinskog toka i toplinskog toka uslijed zračenja između svih komponenata izmjene topline zračenjem i vanjske stijenke spremnika. Konvektivno-konduktivni toplinski tok je proporcionalan površini i razlici temperatura, a obrnuto proporcionalan veličini toplinskog otpora. Shematski prikaz komponenti toplinskog toka, kao i otpora, dan je na sljedećoj slici.



**Slika 4-1.** Shematski prikaz prodora toplinskog toka iz okoliša u glavni spremnik

S obzirom na to da je izmjena toplinskog toka složena od različitih segmenata izmjene topline (provođenje kroz stijenke, konvekcija s vanjske strane stijenke, zračenje na vanjsku stijenku), ključno je pravilno odrediti jednadžbe održanja za sve pod-elemente prijenosa toplinskog toka u glavni spremnik čiju načelnu formulu možemo zapisati u obliku:

$$\phi^{GS} = \frac{T_s - T^{GS}}{R^{GS}} \quad (4-17)$$

gdje su:  $T_s$  - temperatura stijenke (K),

$R^{GS}$  - toplinski otpor (K/W).

Između vanjske temperature, vanjske stijenke i fluida unutar glavnog spremnika imamo konduktivni prijelaz u vanjskoj stijenci, paralelni konduktivni prijelaz u prostoru između stijenki, konduktivni prijelaz u unutarnjoj stijenci glavnog spremnika, kao i konvektivni prijelaz topline između unutarnje površine unutarnje stijenke i vodika. Ako pretpostavimo da je konvektivni prijelaz na strani vodika beskonačan, tj. da nema toplinskog otpora

$$R_{konv,H2} = 0 \quad (4-18)$$

Toplinski otpor samog spremnika možemo izračunati prema formuli:

$$R^{GS} = R_{kond,OS} + \frac{R_{kond,MLI} \cdot R_{kond,potp}}{R_{kond,MLI} + R_{kond,potp}} \quad (4-19)$$

gdje su:  $R_{kond,OS}$  - konduktivni otpor vanjske stijenke (K/W),

$R_{kond,MLI}$  - konduktivni otpor višeslojne izolacije (K/W),

$R_{kond,potp}$  - konduktivni otpor potpornog stupa (K/W).

Konduktivni toplinski otpori ovise o geometrijskom segmentu kojeg promatramo te nije svejedno radi li se o plaštu cilindra ili o kružnim stijenkama na vrhu i dnu.

**Tablica 4-1.** Konduktivni toplinski otpori na plaštu i pločama glavnog spremnika

Dio površine	Plašt	Gornja ploča	Donja ploča
$R_{kond,OS}$	$\frac{\ln(r_{OS,1}/r_{OS,2})}{2\pi\lambda_s L}$	$\frac{\delta_{OS}}{\lambda_s(r_{OS}^2\pi)}$	$\frac{\delta_{OS}}{\lambda_s(r_{OS}^2\pi)}$
$R_{kond,MLI}$	$\frac{\ln(r_{OS,2}/r_{IS,1})}{2\pi\lambda_{MLI}L\chi}$	$\frac{\delta_{MLI}}{\lambda_{MLI}(r_{OS}^2\pi)\chi}$	$\frac{\delta_{MLI}}{\lambda_{MLI}(r_{OS}^2\pi)\chi}$
$R_{kond,potp}$	$\frac{\ln(r_{OS,2}/r_{IS,1})}{2\pi\lambda_s L(1-\chi)}$	$\frac{\delta_{MLI}}{\lambda_{MLI}(r_{OS}^2\pi)(1-\chi)}$	$\frac{\delta_{MLI}}{\lambda_{MLI}(r_{OS}^2\pi)(1-\chi)}$
$R_{kond,IS}$	$\frac{\ln(r_{IS,1}/r_{IS,2})}{2\pi\lambda_s L}$	$\frac{\delta_{IS}}{\lambda_s(r_{IS}^2\pi)}$	$\frac{\delta_{IS}}{\lambda_s(r_{IS}^2\pi)}$
$R_{konv,H2}$	0	0	0

U gornjim izrazima  $\chi$  predstavlja omjer višeslojne izolacije i nosača. Pri izračunu toplinskog toka moramo poznavati i vanjsku temperaturu vanjske stijenke glavnog spremnika ( $T_s$ ) za koju možemo postaviti jednadžbu održanja energije:

$$\underbrace{\phi^{GS,r} + \phi^{GS,OK \rightarrow VS}}_{\text{dovedeni toplinski tok}} = \underbrace{\phi^{GS}}_{\text{odvedeni toplinski tok (prema H2)}} \quad (4-20)$$

Kako se radi o dvodimenzionalnom objektu (nulti volumen), u njemu nemamo akumulaciju topline, tj. sav toplinski tok koji ulazi na površinu mora biti jednak toplinskom toku koji izlazi iz površine. Između okoline i stijenke imamo konvektivnu komponentu prijelaza topline i komponentu zračenja uslijed zračenja okoline.

Konvektivni prijelaz topline računamo prema odabranim formulama za slobodnu i prisilnu konvekciju. Slobodna konvekcija je uzrokovana razlikom temperatura, a prisilna nekim vanjskim čimbenikom, npr. vjetrom. Toplinski otpor konvektivnog prijelaza topline se može zapisati kao

$$R_{konv,ok} = \frac{1}{\alpha_{ok}A} \quad (4-21)$$

gdje su:  $R_{konv,ok}$  - toplinski otpor konvektivnog prijelaza topline (K/W),

$\alpha_{ok}$  - koeficijent prijelaza topline (W/m<sup>2</sup>),

$A$  - površina (m<sup>2</sup>).

Pri čemu je koeficijent prijelaza topline ovisan o Nusseltovom broju, kao i toplinskoj vodljivosti zraka i karakterističnoj duljini  $d$ :

$$\alpha_{ok} = \frac{Nu \cdot \lambda_{zrak}}{d} \quad (4-22)$$

gdje su:  $Nu$  - Nusselt-ov broj (-),

$\lambda_{zrak}$  - toplinska vodljivost zraka (W/mK),

$d$  - duljina (m).

Nusselt-ov bezdimenzijski se računa emirijski i ovisi o tipu strujanja. Općenito se može zapisati da je  $Nu$  funkcija geometrije, kao i Nusselt-ovog broja pri prirodnoj i prisilnoj konvekciji. Kod plašta možemo pisati

$$Nu^n = Nu_{pr}^n + Nu_{sl}^n \quad (4-23)$$

EkspONENT  $n$  ovisi o geometriji i kod okomite stijenke/plašta on iznosi 3 (Bergman, 2011). Nusselt-ovi brojevi za prisilnu i prirodnu konvekciju se računaju prema izrazima:

$$Nu_{pr} = 0.30 + \frac{0.62 \cdot Re_D^{0.5} Pr^{0.33}}{[1 + (0.4/Pr)^{0.66}]^{0.25}} \left[ 1 + \left( \frac{Re_D}{282000} \right)^{0.625} \right]^{0.8} \quad (4-24)$$

$$Nu_{pr} = 0.68 + \frac{0.670 \cdot Ra_L^{0.25}}{[1 + (0.492/Pr)^{0.5625}]^{0.444}} \quad (4-25)$$

gdje su:  $Re_D$  - Reynolds-ov broj (-),

$Pr$  - Prandtl-ov broj (-),

$Ra_L$  - Rayleigh-ov broj (-).

Za prisilnu konvekciju potreban nam je Reynolds-ov broj kojeg računamo kao

$$Re_D = \frac{w_{ok} D}{\nu} \quad (4-26)$$

gdje su:  $w_{ok}$  - brzina (m/s),

$D$  - promjer (m),

$\nu$  - specifični volumen (m<sup>3</sup>/kg).

Za prirodnu konvekciju potreban nam je Rayleigh-ov broj kojeg računamo iz umnoška Grasshoff-ovog i Prandtl-ovog broja:

$$Ra_L = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_s - T_{ok})L^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (4-27)$$

gdje su:  $Gr$  - Grasshoff-ov broj (-),

$\beta$  - koeficijent toplinskog širenja zraka (-),

$T_{ok}$  - temperatura okoliša (K),

$L$  - duljina (m).

Prandtl-ov broj ovisi o fizikalnim svojstvima samog zraka:

$$Pr = \frac{c_p \nu \rho}{\lambda} \quad (4-28)$$

gdje je:  $c_p$  - specifični toplinski kapacitet (J/kgK).

Kod konvektivnog prijenosa topline na gornjoj stijenci koristimo jednadžbe:

$$\alpha = \eta \frac{\lambda}{L_n} 0.27 Ra_{L_n}^{0.25} + \frac{\lambda}{L_{eff}} R_f \left( 0.664 Re_{L_{eff}}^{0.5} Pr^{0.33} \right) \text{ za } (L_{eff} < X_c) \quad (4-29)$$

$$\begin{aligned} \alpha = \eta \frac{\lambda}{L_n} 0.27 Ra_{L_n}^{0.25} \\ + \frac{\lambda}{L_{eff}} R_f \left[ 0.37 \left( Re_{L_{eff}}^{0.8} - Re_{X_c}^{0.8} \right) \right. \\ \left. + 0.664 Re_{X_c}^{0.5} \right] Pr^{0.33} \text{ za } (L_{eff} \geq X_c) \end{aligned} \quad (4-30)$$

gdje su:  $L_{eff}$  - karakteristična duljina za prirodnu konvekciju (m),

$R_f$  - hrapavost površine (m),

$\eta$  - korekcijski faktor za utjecaj prirodne konvekcije (-).

Na donjoj stijenci koristimo jednadžbe

$$\alpha = \eta \frac{\lambda}{L_n} 0.54 Ra_{L_n}^{0.25} + \frac{\lambda}{L_{eff}} R_f \left( 0.664 Re_{L_{eff}}^{0.5} Pr^{0.33} \right) \text{ za } (L_{eff} < X_c) \quad (4-31)$$

$$\begin{aligned} \alpha = \eta \frac{\lambda}{L_n} 0.15 Ra_{L_n}^{0.33} \\ + \frac{\lambda}{L_{eff}} R_f \left[ 0.37 \left( Re_{L_{eff}}^{0.8} - Re_{X_c}^{0.8} \right) \right. \\ \left. + 0.664 Re_{X_c}^{0.5} \right] Pr^{0.33} \text{ za } (L_{eff} \geq X_c) \end{aligned} \quad (4-32)$$

Pri čemu je  $L_n$  karakteristična duljina za prirodnu konvekciju ( $L_n = D/4$ ), a  $L_{eff}$  karakteristična duljina za prisilnu konvekciju ( $L_{eff} = 0.81D$  za laminarno i  $L_{eff} = 0.82D$  za turbulentno strujanje). Karakteristična duljina koja razdvaja područja laminarnog i turbulentnog strujanja je kritična duljina  $X_c = 5 \cdot 10^5 (v/w_{ok})$ . Faktor  $R_f$  predstavlja faktor hrapavosti

površine, a faktor  $\eta$  korekcijski faktor za utjecaj prirodne konvekcije kojeg računamo prema izrazu

$$\eta = \frac{\ln\left(1 + \frac{Gr_{Leff}}{Re_{Leff}^2}\right)}{1 + \ln\left(1 + \frac{Gr_{Leff}}{Re_{Leff}^2}\right)} \quad (4-33)$$

Sve fizikalne vrijednosti za zrak kod izračuna konvektivnih izmjena toplinskog toka ( $c_p, \nu, \rho, \lambda, \beta$ ) određujemo pomoću modula CoolProp te ih moramo uzeti u ovisnosti o srednjoj temperaturi zraka između okolišne i temperature stijenke.

$$T = 0.5 \cdot (T_{ok} + T_s) \quad (4-34)$$

Toplinski tok uslijed zračenja je proporcionalan umnošku koeficijenta apsorpcije i zbroju izravnog i difuznog zračenja

$$\phi^{GS,r} = \alpha_s G^r = \alpha_s (G^{r,Dir} \cos\theta + G^{r,Diff}) \quad (4-35)$$

gdje su:  $G^{r,Dir}$  - izravno zračenje (W/m<sup>2</sup>),

$G^{r,Diff}$  - difuzno zračenje (W/m<sup>2</sup>),

$\theta$  - kut upada zrake i normale na površinu (°).

Kut  $\theta$  predstavlja kut između kuta upada zraka i normale na površinu. Normala na bočnu stranicu (plašt) cilindra je potpuno vodoravna, a na gornju plohu cilindra je potpuno okomita. Na donjoj plohi cilindra nemamo izravno, nego samo difuzno zračenje. Komponente zračenja prikazujemo kao umnožak specifičnog zračenja i površine

$$G^{r,D} = q^{r,Dir} A' \quad (4-36)$$

$$G^{r,Diff} = q^{r,Diff} A' \quad (4-37)$$

Podaci za specifično izravno i difuzno zračenje ( $q^{r,Dir}, q^{r,Diff}$ ) se mogu pronaći na mrežnim izvorima, a mi ćemo koristiti PVGIS (Huld, 2012.).

Rezultirajuća vanjska temperatura stijenke je:



$$\begin{aligned} \frac{T_{ok} - T_s}{R_{konv,ok}} + \phi^{GS,r} &= \frac{T_s - T^{GS}}{R^{GS}} \Rightarrow T_s \\ &= \left( -\phi^{GS,r} - \frac{T_{ok}}{R_{konv,ok}} - \frac{T^{GS}}{R^{GS}} \right) \left( \frac{R^{GS} R_{konv,ok}}{-R^{GS} - R_{konv,ok}} \right) \end{aligned} \quad (4-38)$$

Zbog velike razlike temperatura između temperature okoline i unutar spremnika, a koja iznosi i više nego 250 K, izolacijski materijali moraju imati izuzetno nizak koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$ , te se nazivaju višeslojni izolacijski materijali (engl. *multi layer insulation* – MLI).

#### 4.2. Zračni isparivač (AAV)

Uloga zračnog isparivača je da uplini kapljeviti vodik pod visokim tlakom strujanjem kroz cijevi s vertikalnim orebrenjima koje se pasivno zagrijavaju okolnim zrakom. S obzirom na to da vodik mijenja značajno svoja svojstva strujanjem kroz AAV, potrebno ga je podijeliti na manji broj segmenata, odnosno kontrolnih volumena. Na svaki segment se može zapisati jednačba održanja mase i energije. Pretpostavke su:

- svojstva unutar svakog kontrolnog volumena (segmenta) su konstantna
- strujanje je nestlačivo, odn. promjena gustoće dolazi isključivo uslijed promjene iz kapljevite u plinovitu fazu, pri čemu se mijenja brzina strujanja
- uplinjavanje vodika je na natkritičnom tlaku i temperaturi (nemamo vidljivu razliku između kapljevite i plinovite faze)

Slijedeći istu logiku kao i za glavni spremnik, integrirani oblici jednačbi očuvanja mase i energije za svaki segment  $i$  glase:

$$\frac{dm^{AAV,i}}{dt} = q_{m,in}^{AAV,i} - q_{m,out}^{AAV,i} = 0 \Rightarrow \rho_{in}^{AAV,i} w_{in}^{AAV,i} = \rho_{out}^{AAV,i} w_{out}^{AAV,i} \quad (4-39)$$

$$\begin{aligned} \bar{u}^{AAV,i} = \bar{u}^{AAV,i,0} \\ + \int_{t_0}^{t_1} \left( q_{m,in}^{AAV,i} h_{in}^{AAV,i} - q_{out,in}^{AAV,i} h_{out}^{AAV,i} + \bar{\phi}^{AAV,i} \right. \\ \left. - \bar{u}^{AAV,i,0} \frac{\partial m^{AAV,i}}{\partial t} \right) dt \end{aligned} \quad (4-40)$$

gdje su:  $q_m^{AAV,i}$  - maseni protok u isparivaču (kg/s),  
 $\rho^{AAV,i}$  - gustoća vodika u isparivaču (kg/m<sup>3</sup>),  
 $w^{AAV,i}$  - brzina vodika u isparivaču (m/s),  
 $\bar{u}^{AAV,i}$  - specifična unutarnja energija u isparivaču (J/kg),  
 $h^{AAV,i}$  - specifična entalpija u isparivaču (kJ/kg),  
 $\bar{\phi}^{AAV,i}$  - prodor topline u isparivač (W).

Iz Bernoullijeve jednadžbe možemo odrediti vezu između brzina na ulazu i izlazu iz kontrolnog volumena u ovisnosti o padu tlaka. Srednja brzina u kontrolnom volumenu je ovisna o razlici tlakova, hidrauličkim svostvima (faktor trenja  $f$ ) i srednjoj gustoći unutar volumena.

$$\bar{w}^{AAV,i} = \left( \frac{p_{in}^{AAV,i} - p_{out}^{AAV,i}}{f \frac{L^{AAV,i}}{d_{in}^{AAV}} \frac{1}{2} \bar{\rho}^{AAV,i}} \right)^{0.5} = \frac{1}{2} (w_{in}^{AAV,i} + w_{out}^{AAV,i}) \quad (4-41)$$

gdje su:  $\bar{w}^{AAV,i}$  - brzina vodika u isparivaču (m/s),  
 $p^{AAV,i}$  - tlak u isparivaču (Pa),  
 $L^{AAV,i}$  - duljina kontrolnog volumena (m),  
 $d_{in}^{AAV}$  - promjer cijevi isparivača (m),  
 $\bar{\rho}^{AAV,i}$  - gustoća vodika unutar isparivača (kg/m<sup>3</sup>),  
 $f$  - faktor trenja (-).

Sada možemo odrediti brzine strujanja na ulazu i izlazu iz kontrolnog volumena:

$$w_{in}^{AAV,i} = \frac{2\bar{w}^{AAV,i}}{1 + \frac{\rho_{in}^{AAV,i}}{\rho_{out}^{AAV,i}}}, w_{out}^{AAV,i} = w_{in}^{AAV,i} \frac{\rho_{in}^{AAV,i}}{\rho_{out}^{AAV,i}} \quad (4-42)$$

Srednju gustoću i masu u kontrolnom volumenu možemo odrediti iz izraza:

$$\bar{\rho}^{AAV,i} = \frac{1}{2} (\rho_{in}^{AAV,i} + \rho_{out}^{AAV,i}) \quad (4-43)$$

$$m^{AAV,i} = \bar{\rho}^{AAV,i} A^{AAV} L^{AAV,i} \quad (4-44)$$

gdje su:  $m^{AAV,i}$  - masa vodika u isparivaču (kg),  
 $A^{AAV}$  - površina isparivača (m<sup>2</sup>).

Maseni protoci na ulazu i izlazu iz svakog od kontrolnog volumena su:

$$q_{m,in}^{AAV,i} = \rho_{in}^{AAV,i} w_{in}^{AAV,i} A^{AAV}, q_{m,out}^{AAV,i} = \rho_{out}^{AAV,i} w_{out}^{AAV,i} A^{AAV} \quad (4-45)$$

Srednju temperaturu unutar kontrolnog volumena, kao i ulazne i izlazne entalpije možemo izračunati iz modula CoolProp

$$\bar{T}^{AAV,i} = f_{CoolProp}(\bar{u}^{AAV,i}, \bar{\rho}^{AAV,i}) = \frac{1}{2} (T_{in}^{AAV,i} + T_{out}^{AAV,i}) \quad (4-46)$$

$$h_{in}^{AAV,i} = f_{CoolProp}(p_{in}^{AAV,i}, \rho_{in}^{AAV,i}), h_{out}^{AAV,i} = f_{CoolProp}(p_{out}^{AAV,i}, \rho_{out}^{AAV,i}) \quad (4-47)$$

gdje je:  $\bar{T}^{AAV,i}$  - temperatura u isparivaču (K).

Izmijenjeni toplinski svakog segmenta računamo prema formuli

$$\bar{\phi}^{AAV,i} = \frac{T_{ok} - \bar{T}^{AAV,i}}{R^{AAV,i}} \quad (4-48)$$

gdje je:  $R^{AAV,i}$  - toplinski otpor isparivača (K/W).

Toplinski otpor se sastoji od dva konvektivna (vanjska i unutarnja stijenka AAV-a i konduktivnog toplinskog otpora.

$$R^{AAV,i} = R_{konv,ok}^{AAV,i} + R_{kond}^{AAV,i} + R_{konv,H2}^{AAV,i} \quad (4-49)$$

$$R^{AAV,i} = \frac{1}{d_{out}^{AAV} \pi L^{AAV,i} \alpha_{out}^{AAV}} + \frac{\ln(d_{out}^{AAV}/d_{in}^{AAV})}{2\pi \lambda_s L^{AAV,i}} + \frac{1}{d_{in}^{AAV} \pi L^{AAV,i} \alpha_{in}^{AAV}} \quad (4-50)$$

gdje su:  $R_{konv,ok}^{AAV,i}$  - konvektivni toplinski otpor vanjske stijenke (K/W),

$R_{kond}^{AAV,i}$  - konduktivni toplinski otpor (K/W),

$R_{konv,H2}^{AAV,i}$  - konvektivni otpor unutarnje stijenke (K/W),

$d^{AAV}$  - promjer isparivača (m).

Koeficijenti prijelaza topline su određeni fiksno s vrijednostima  $\alpha_{out}^{AAV} = 10000$  i  $\alpha_{in}^{AAV} = 100$ .

Cilj izračuna prema gornjim jednadžbama je pronaći srednje tlakove, gustoće i temperature, kao i masene protoke u kontrolnim volumenima svih segmenata. Pri tome treba razlikovati prvi i zadnji segment AAV-a. Sljedeća tablica prikazuje vrijednosti parametara na ulasku u kontrolni volumen, odn. poveznice varijabli između kontrolnih volumena:

**Tablica 4-2.** Poveznice parametara između kontrolnih volumena

Segment	$i = 1$	$1 < i < N$	$i = N$
$p_{in}^{AAV,i}$	$p_{out}^{Krio}$	$p_{out}^{AAV,i-1}$	$p_{out}^{AAV,N-1}$
$p_{out}^{AAV,i}$	izračun	izračun	$p^{Buffer}$
$\rho_{in}^{AAV,i}$	$\rho_{out}^{Krio}$	$\rho_{out}^{AAV,i-1}$	$\rho_{out}^{AAV,N-1}$
$\rho_{out}^{AAV,i}$	izračun	izračun	izračun
$T_{in}^{AAV,i}$	$T_{out}^{Krio}$	$T_{out}^{AAV,i-1}$	$T_{out}^{AAV,N-1}$
$T_{out}^{AAV,i}$	izračun	izračun	izračun

#### 4.3. Visokotlačni međusprennik

U visokotlačnom međusprenniku se nalazi vodik pri natkričnom tlaku i temperaturi. Postavljanjem jednadžbi očuvanja mase i energije dobijemo nove vrijednosti za  $m^{Buff}$  i  $u^{Buff}$ .

$$m^{Buff} = m^{Buff,0} + \int_{t_0}^{t_1} (q_{m,in}^{Buff} - q_{m,out}^{Buff}) dt \quad (4-51)$$

$$u^{Buff} = u^{Buff,0}$$

$$+ \int_{t_0}^{t_1} \left( q_{m,in}^{Buff} h_{in}^{Buff} - q_{m,out}^{Buff} h_{out}^{Buff} + \phi^{Buff} - u^{Buff,0} \frac{\partial m^{Buff}}{\partial t} \right) dt \quad (4-52)$$

gdje su:  $m^{Buff}$  - masa vodika u visokotlačnom međuspremniku (kg),  
 $q^{Buff}$  - maseni protok u visokotlačnom međuspremniku (kg/s),  
 $u^{Buff}$  - specifična unutarnja energija u visokotlačnom međuspremniku (J/kg),  
 $h_{in}^{Buff}$  - specifična entalpija u visokotlačnom međuspremniku (kJ/kg),  
 $\phi^{Buff}$  - prodor toplinskog toka u visokotlačni međuspremnik (W).

Varijable na ulazu u međuspremnik su određene tijekom procesa u AAV-u, odn. odgovaraju izlaznim vrijednostima iz zadnjeg segmenta AAV-a:

$$q_{m,in}^{Buff} h_{in}^{Buff} = \rho_{out}^{AAV,N} w_{out}^{AAV,N} A^{AAV} h_{out}^{AAV,N} \quad (4-53)$$

gdje je:  $w^{AAV,N}$  - brzina vodika u visokotlačni međuspremnik (m/s).

dok je varijabla  $q_{m,out}^{Buff}$  upravljačka i ovisi o tijeku procesa u kojem treba ispuniti dvije uloge:

- ventilirati međuspremnik uslijed previsokog tlaka
- puniti FCEV vozila

Možemo zapisati:

$$q_{m,out}^{Buff} = q_{m,out}^{Buff,vent} + q_{m,out}^{Buff,FCEV} \quad (4-54)$$

Izmjenom masenog protoka mijenja se i prosječna gustoća u međuspremniku

$$\rho^{Buff} = \frac{m^{Buff}}{V^{Buff}} \quad (4-55)$$

gdje su:  $\rho^{Buff}$  - gustoća vodika u visokotlačnom međuspremniku (kg/m<sup>3</sup>),  
 $V^{Buff}$  - volumen visokotlačnog međuspremniku (m<sup>3</sup>).

Promjena gustoće rezultira promjenom termodinamičkih parametara, koje možemo izračunati pomoću modula CoolProp:

$$(T^{Buff}, p^{Buff}, h^{Buff}) = f_{CoolProp}(u^{Buff}, \rho^{Buff}) \quad (4-56)$$

gdje je:  $T^{Buff}$  - temperatura u visokotlačnom međuspremniku (K).

Izlazna entalpija jednaka je entalpiji u međuspremniku  $h_{out}^{Buff} = h^{Buff}$ .

#### 4.4. FCEV spremnik

FCEV automobili se spajaju na dispencer punionice i time u sustav unose još jedan spremnik koji ima neko svoje početno stanje napunjenosti, odnosno u njemu je već pohranjena početna masa vodika  $m^{FCEV,0}$  pod određenim natkritičnim tlakom  $p^{FCEV,0}$  i temperaturom  $T^{FCEV,0}$ , odnosno unutarnjom energijom  $u^{FCEV,0}$ .

$$(u^{FCEV,0}, \rho^{FCEV,0}) = f_{CoolProp}(T^{FCEV,0}, p^{FCEV,0}) \quad (4-57)$$

gdje su:  $u^{FCEV}$  - specifična unutarnja energija u vozilu (J/kg),  
 $\rho^{FCEV}$  - gustoća u vozilu (kg/m<sup>3</sup>),  
 $T^{FCEV}$  - temperatura u vozilu (K),  
 $p^{FCEV}$  - tlak u vozilu (Pa).

Postavljanjem jednadžbi očuvanja mase i energije dobivamo

$$m^{FCEV} = m^{FCEV,0} + \int_{t_0}^{t_1} q_{m,in}^{FCEV} dt \quad (4-58)$$

$$u^{FCEV} = u^{FCEV,0} + \int_{t_0}^{t_1} \left( q_{m,in}^{FCEV} h_{in}^{FCEV} + u^{FCEV,0} \frac{\partial m^{FCEV}}{\partial t} \right) dt \quad (4-59)$$

gdje su:  $m^{FCEV}$  - masa vodika u vozilu (kg),  
 $q_m^{FCEV}$  - maseni protok u vozilo (kg/s),  
 $h^{FCEV}$  - specifična entalpija u vozilu (kJ/kg).

dobijemo nove vrijednosti za  $m^{FCEV}$  i  $u^{FCEV}$ . Kod izrauna vrijede jednakosti  $q_{m,in}^{FCEV} = q_{m,out}^{Buff}$  i  $h_{in}^{FCEV} = h_{out}^{Buff}$ . Zbog relativno kratkog trajanja punjenja od svega par minuta, utjecaj izmjene toplinskog toka s okolinom je zanemaren. S obzirom na poznati i konstantni volumen FCEV spremnika, možemo odrediti gustoću

$$\rho^{FCEV} = \frac{m^{FCEV}}{V^{FCEV}} \quad (4-60)$$

gdje je:  $V^{FCEV}$  - volumen spremnika u vozilu (m<sup>3</sup>).

A temeljem poznate gustoće i unutarnje energije spremnika pomoću modula CoolProp možemo odrediti i nove vrijednosti temperature i tlaka u spremniku:

$$(p^{FCEV}, T^{FCEV}) = f_{CoolProp}(\rho^{FCEV}, p^{FCEV}) \quad (4-61)$$

Postupak punjenja se prekida kada tlak u spremniku prijeđe  $p^{FCEV,max} = 700 \text{ bar}$ .

#### 4.5. Kontrolne varijable

Kontrolne varijable su promjenjive varijable koje služe za ostvarivanje procesa. U ovom proces treba kontrolirati prema sljedećim kriterijima:

- nadopuna glavnog spremnika ukoliko je u spremniku dosegnut minimalni udio pare
- povećanje tlaka glavnog spremnika ako tlak padne ispod minimalno dozvoljene vrijednosti
- ventiliranje glavnog spremnika ako je dosegnut maksimalni tlak
- ventiliranje glavnog spremnika radi povećavanja tlaka međuspremnika
- evakuacija međuspremnika radi punjenja FCEV-a

Nadopuna glavnog spremnika ukoliko je u spremniku dosegnut minimalni udio pare

$$x^{GS} < x^{GS,min}: \begin{cases} q_{m,L,in}^{GS} = q_{m,L}^{disp} \\ q_{m,V,out}^{GS} = q_{m,L}^{disp} \frac{\rho_L^{GS}}{\rho_V^{GS}} \end{cases} \quad (4-62)$$

$$x^{GS} > x^{GS,init}: \begin{cases} q_{m,L,in}^{GS} = 0 \\ q_{m,V,out}^{GS} = 0 \end{cases} \quad (4-63)$$

Povećanje tlaka glavnog spremnika ako tlak padne ispod minimalno dozvoljene vrijednosti:

$$p^{GS} < p^{GS,min}: \begin{cases} q_{m,L,in}^{GS} = 0 \\ q_{m,V,in}^{GS} = q_{m,L}^{disp} \frac{\rho_L^{GS}}{\rho_V^{GS}} \end{cases} \quad (4-64)$$

$$p^{GS} > p^{GS,min} + 0.2 \text{ bar}: \begin{cases} q_{m,L,in}^{GS} = 0 \\ q_{m,V,in}^{GS} = 0 \end{cases} \quad (4-65)$$

Ventiliranje glavnog spremnika preko međuspremnika ako je dosegnut maksimalni tlak:

$$p^{GS} > p^{GS,max}: \begin{cases} p^{GS} > p^{GS,nom}: \Delta p_p^{Krio} = 0.01(p^{GS} - p^{GS,nom}) \\ p^{GS} < p^{GS,min}: \Delta p_p^{Krio} = 0.01(p^{GS} - p^{GS,min}) \end{cases} \quad (4-66)$$

$$p^{GS} < p^{GS,max} - 0.2 \text{ bar}: \Delta p_p^{Krio} = 0 \quad (4-67)$$

$$p_{out}^{Krio} = p^{Buff} + \Delta p_p^{Krio} \quad (4-68)$$

Ventiliranje glavnog spremnika radi povećavanja tlaka međuspremnika:

$$p^{Buff} < p^{Buff,min}: \Delta p_p^{Krio} = 0.01(p^{Buff,min} - p^{Buff}) \quad (4-69)$$

$$p^{Buff} > p^{Buff,min} + 20 \text{ bar}: \Delta p_p^{Krio} = 0 \quad (4-70)$$

$$p_{out}^{Krio} = p^{Buff} + \Delta p_p^{Krio} \quad (4-71)$$

Rad kriogene pumpe se može modelirati kao izentropski porast tlaka uz primjenu izentropske efikasnosti pumpe. Ako znamo ulaznu entalpiju koja odgovara entalpiji kapljevitoz vodika u spremniku

$$h_L^{GS} = f_{CoolProp}(T^{GS}, x = 0) \quad (4-72)$$

i izentropsku entalpiju

$$h_{out,iz}^{Krio} = f_{CoolProp}(p_{out}^{Krio}, s = konst) \quad (4-73)$$

onda se entalpija na izlazu iz kriogene pumpe može odrediti pomoću izraza:

$$h_{out}^{Krio} = h_L^{GS} + \frac{(h_{out,iz}^{Krio} - h_L^{GS})}{\eta^{Krio}} \quad (4-74)$$

Termodinamički parametri na izlasku iz kriogene pumpe i ulasku u AAV, a koji su potrebni za izračun procesa možemo odrediti pomoću modula CoolProp:

$$(T_{out}^{Krio}, \rho_{out}^{Krio}) = f_{CoolProp}(p_{out}^{Krio}, h_{out}^{Krio}) \quad (4-75)$$

Evakuacija međuspremnika radi punjenja FCEV-a aktivno je samo kada je FCEV priključen na dispencer:

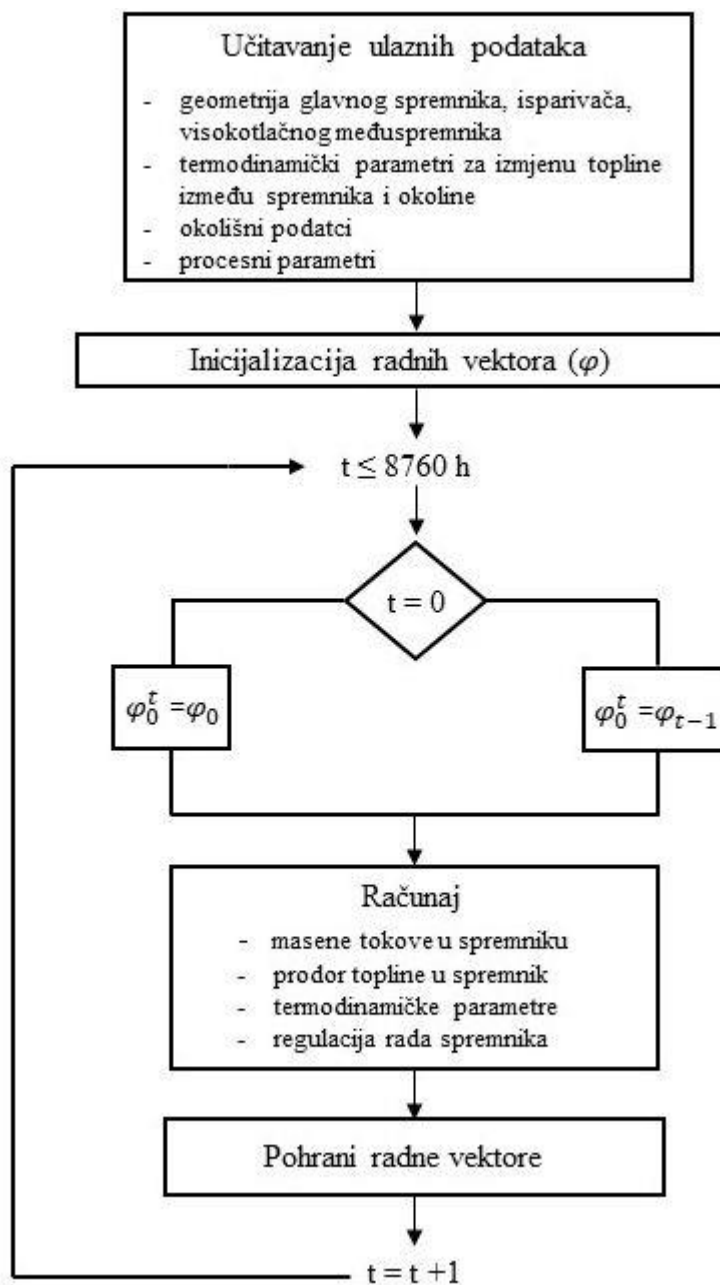
$$FCEV \text{ uklj.}: \begin{cases} p^{FCEV} < 600 \text{ bar}: q_{m,in}^{FCEV} = q_m^{FCEV,max} \\ p^{FCEV} > 600 \text{ bar}: q_{m,in}^{FCEV} = q_m^{FCEV,max} \cdot f_p \end{cases} \quad (4-76)$$

$$f_p = [1 + (0.5 - 1)/100 \cdot 10^5 (p^{FCEV} - 600 \text{ bar})] \quad (4-77)$$

$$FCEV \text{ isklj.}: q_{m,in}^{FCEV} = 0 \quad (4-78)$$



#### 4.6. Dijagram toka izračuna



Slika 4-2. Simulacija rada punionice vodika

Na Slika 4-2. prikazan je dijagram toka, na temelju kojeg je u programu Python napravljena simulacija rada spremnika vodika. Simulacija započinje učitavanjem ulaznih podataka.

**Tablica 4-3.** Ulazni podatci za simulaciju rada punionice vodika

<b>Geometrija spremnika</b>
Volumen spremnika, [m <sup>3</sup> ]
Unutarnji promjer, [m]
Vanjski promjer, [m]
Debljina izolacije, [m]
Debljina stijenke, [m]
Omjer površina, [-]
<b>Termodinamički parametri za izmjenu topline između spremnika i okoline</b>
Toplinska vodljivost konstrukcijskog čelika, [W/m/K]
Toplinska vodljivost podupirača, [W/m/K]
Toplinska vodljivost višeslojne izolacije, [W/m/K]
Koeficijent apsorpcije, [-]
Nusseltov broj, [-]
<b>Radni uvjeti</b>
Nominalni tlak u spremniku, [bar]
Maksimalni tlak u spremniku, [bar]
Početni sadržaj pare u spremniku, [-]
Maksimalni sadržaj pare u spremniku, [-]
Minimalni tlak u visokotlačnom međuspremniku, [bar]
Maksimalni tlak u visokotlačnom međuspremniku, [bar]
Protok vodika, [m <sup>3</sup> /s]
<b>Okolišni podatci</b>
Dozračenost sunca, [W/m <sup>2</sup> ]
Brzina vjetra, [m/s]
Relativna vlažnost zraka, [%]
Temperatura, [°C]

U Tablica 4-3. nabrojani su parametri koje je potrebno definirati prije pokretanja simulacije. Sljedeći korak je inicijalizacija radnih vektora, odnosno nepoznatih varijabla na početku simulacije. U Tablica 4-4. nabrojani su radni vektori koje je potrebno inicijalizirati.

**Tablica 4-4.** Radni vektori koje je potrebno inicijalizirati prije simulacije

Inicijalizacija radnih vektora
Prodor topline u spremnika vodika, [W]
Prodor toplinskog toka (cilindar, gornji i donji dio spremnika), [m]
Temperatura stijenke spremnika vodika (cilindar, gornji i donji dio), [°C]
Tlak u spremniku, [bar]
Specifični volumen H <sub>2</sub> u spremniku, [m <sup>3</sup> /kg]
Specifična unutarnja energija u spremniku, [J/kg]
Temperatura u spremniku, [°C]
Masa vodika u spremniku, [kg]
Masa pare u spremniku, [kg]
Masa kapljevine u spremniku, [kg]
Gustoća pare u spremniku, [kg/m <sup>3</sup> ]
Gustoća kapljevine u spremniku, [kg/m <sup>3</sup> ]
Volumen pare u spremniku, [m <sup>3</sup> ]
Volumen kapljevine u spremniku, [m <sup>3</sup> ]
Temperatura u spremniku, [°C]
Maseni protok pare iz spremnika, [kg/s]
Maseni protok kapljevine iz spremnika, [kg/s]
Entalpija, [J/kg]
Vrijeme, [s]

Simulacija spremnika provodi se u vremenu od godinu dana, 8760 sati. Varijable koje model računa su prodor toplinskog toka u spremnik, masene tokove vodika u spremniku,

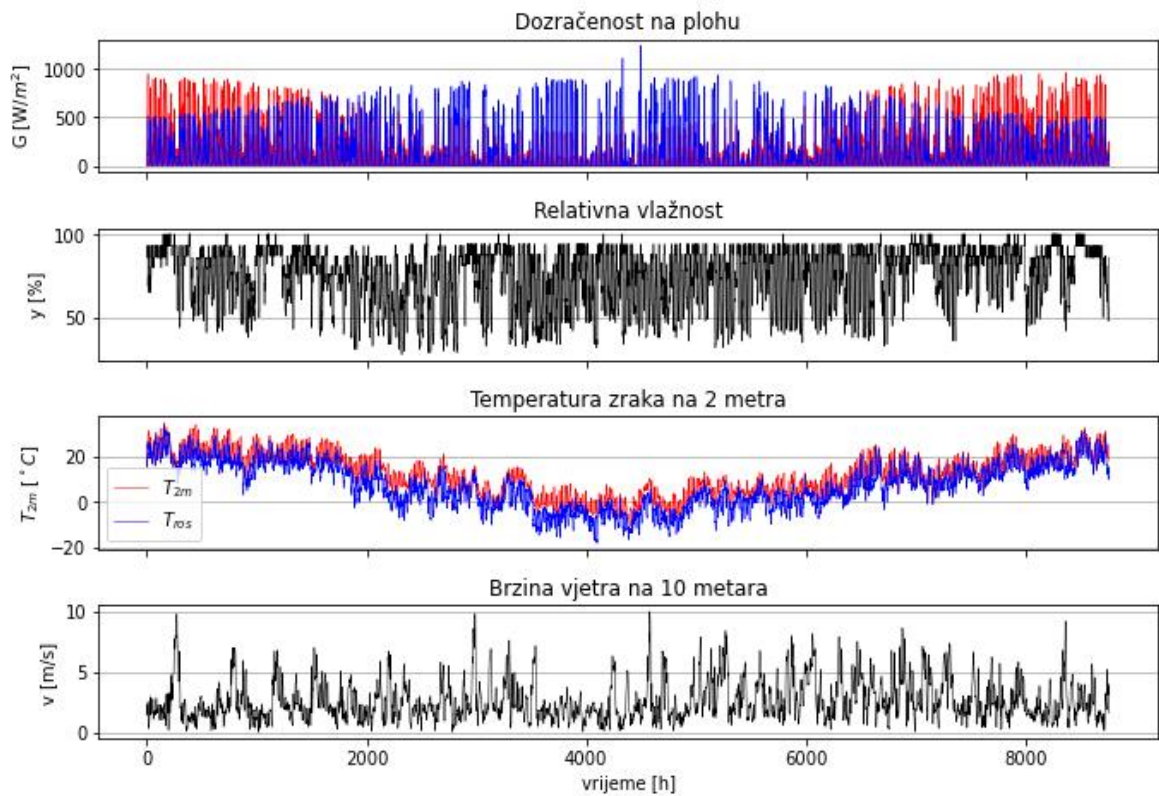
termodinamičke parametre te se regulira rad spremnika. Prvi korak započinje u nultom vremenskom periodu te su sve varijable jednake početnim, inicijalnim uvjetima. Za svaki sljedeći vremenski korak od jednog sata, model računa nove vrijednosti varijabli te ih pohranjuje.

## 5. ANALIZA SLUČAJA ZA PUNIONICU VODIKA U GRADU ZAGREBU

U nastavku su prikazani rezultati za hipotetsku punionicu na području Grada Zagreba. Ulazni podaci su: meteorološki podaci, geometrija glavnog spremnika, isparivača, visokotlačnog međuspremnik te krivulja punjenja vozila s vodikovim ćelijama, kao i procesni parametri i parametri ograničenja vođenja procesa. Provedena je jednogodišnja simulacija te su prikazani rezultati i njihova interpretacija.

### 5.1. Postavke i ulazni podatci

#### 5.1.1. Meteorološki ulazni podatci



**Slika 5-1.** Meteorološki ulazni podatci

Količina energije koja od Sunca dopijeva na površinu zemlje u obliku elektromagnetskog zračenja je dozračenost sunca (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2016). Ukupna dozračenost sunca sastoji se od izravne dozračenosti, raspršene dozračenosti i

reflektirane dozračenosti (Matić, 2007). Izravna dozračenost sunca je količina energije koja dopiye na zemljinu površinu bez gubitaka pri prolasku kroz atmosferu, a difuzna dozračenost nastaje raspršivanjem u atmosferi (U.S. Department of Energy). Reflektirana dozračenost je dio zračenja koje se odbije od površine zemlje (Understanding Global Change [UGC], 2022). Podatci o dozračenosti sunca važna su komponenta u proračunu prodora toplinskog toka u glavni spremnik vodika i visokotlačni međuspremnik. Što je veća količina solarnog zračenja, veći je prodor topline u spremnike. Toplinski tok koji prodire u glavni spremnik uzrokuje isparavanje kapljevitoz vodika pri čemu dolazi do povećanja tlaka unutar spremnika. Kada se tlak uslijed isparavanja vodika poveća iznad dozvoljene vrijednosti, potrebno je ventilirati spremnik. Ukupna dozračenost sunca na dijagramu prikazuje se za vertikalnu (90°) i horizontalnu (0°) dozračenost (Slika 5-1.). Vertikalna dozračenost kreće se u rasponu od 0 do 1247 W/m<sup>2</sup>, a prosječna vrijednost kroz 8764 h iznosi 122,2 W/m<sup>2</sup>. Horizontalna dozračenost na vrhu kreće se u rasponu od 0 do 965 W/m<sup>2</sup>, a prosječna iznosi 144,5 W/m<sup>2</sup>. Horizontalna dozračenost na dnu kreće se u rasponu od 0 do 456 W/m<sup>2</sup>, a prosječna iznosi 65,8 W/m<sup>2</sup>. Temperatura zraka na 2 m iznad tla drugi je okolišni podatak koji se učitava u model punionice. Ona se kreće od -13 °C do 34,8 °C, a prosječna vrijednost kroz period od 8760 h iznosi 12 °C. Treći okolišni parametar je brzina vjetro na 10 m iznad tla. Ona se kreću u rasponu od 0,04 do 10 m/s, a prosječna vrijednost kroz period od 8760 h iznosi 2,6 m/s. Zadnji okolišni parametar je relativna vlažnost zraka, čija prosječna vrijednost kroz period od 8760 h iznosi 75 %. Ulazni okolišni parametri jednaki su u svakoj provedenoj simulaciji punionice vodika.

### 5.1.2. Tehnički podaci za komponente sustava

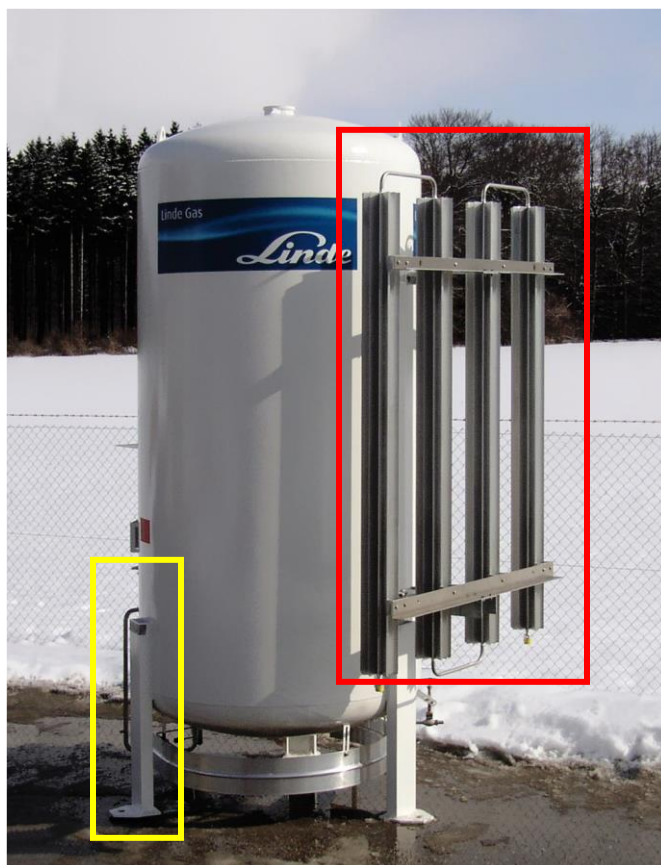
Tehnički podaci za komponente sustava sadržavaju podatke o geometriji glavnog spremnika, visokotlačnog međuspremnika i isparivača. Osim geometrije, tehnički podaci obuhvaćaju toplinske vodljivosti materijala od kojih su komponente napravljene. U Tablica 5-1. prikazani su svi tehnički ulazni podaci za pojedinu komponentu sustava.

**Tablica 5-1.** Tehnički ulazni parametri

Ulazni parametar	Vrijednost
<b>Glavni spremnik vodika</b>	
Unutarnji volumen [m <sup>3</sup> ]	11,5
Unutarnji promjer [m]	0,85
Debljina stijenke [m]	0,02
Debljina MLI [m]	0,4
Toplinska vodljivost nehrđajućeg čelika [W/m/K]	15
Toplinska vodljivost podupirača (strut) [W/m/K]	45
Toplinska vodljivost MLI [W/m/K]	0,00001
Omjer površina [-]	0,0001
<b>Visokotlačni međuspremnik</b>	
Volumen visokotlačnog međuspremnika [m <sup>3</sup> ]	0,300
Broj visokotlačnih međuspremnika [-]	15
Unutarnji promjer [m]	0,485
Debljina stijenke [m]	0,02
<b>Isparivač</b>	
Duljina isparivača (baza) [m]	1,67
Širina isparivača (baza) [m]	0,516
Visina isparivača [m]	2,733
Broj cijevi isparivača [-]	24
Duljina cijevi [m]	150
Unutarnji promjer cijevi [mm]	10,5
Vanjski promjer cijevi [mm]	15,7
Broj rebara po cijevi [-]	8
Visina orebrenja [mm]	86
Toplinska vodljivost materijala cijevi [W/m/K]	15

Volumen glavnog spremnika vodika preuzet je prema Decker (2019). S obzirom na činjenicu da se vodik ukapljuje pri ekstremno niskim temperaturama, za uspješno dugoročno skladištenje ukapljenog vodika pri odgovarajućim kriogenim uvjetima, spremnik mora sadržavati višeslojnu izolaciju (MLI) u uvjetu vakuuma kako bi se prodor toplinskog toka sveo na minimum (Huang et al., 2017). Stoga, vrijednost toplinske vodljivost MLI iznosi 0,00001 W/m/K (Sutheesh, 2018). Prema McFarland i Agarwal (2022), pretpostavljena je debljina MLI od 0,4 m. Unutarnja stijenka glavnog spremnika vodika izrađena je od nehrđajućeg čelika, a vanjska stijenka i podupirači spremnika od ugljičnog čelika. (Hydrogen tools). Toplinska vodljivost nehrđajućeg čelika iznosi 15 W/m/K (Thermtest, 2021), a ugljičnog 45 W/m/K (Stainless Structural, 2019).

Na Slika 5-2. prikazan je spremnik ukapljenog vodika i žutim pravokutnikom uokviren je podupirač spremnika. Podupirači spremnika predstavljaju toplinske mostove za prodor topline unutar spremnika. Omjer površina je vrijednost koja pokazuje koliko je puta površina podupirača manja u odnosu na površinu spremnika te ona ulazi u izračun toplinskog otpora spremnika. Površina podupirača mora biti znatno manja u odnosu na površinu spremnika kako bi se prodor topline kroz podupirače sveo na minimum, zato je pretpostavljena vrijednost od 0,0001.

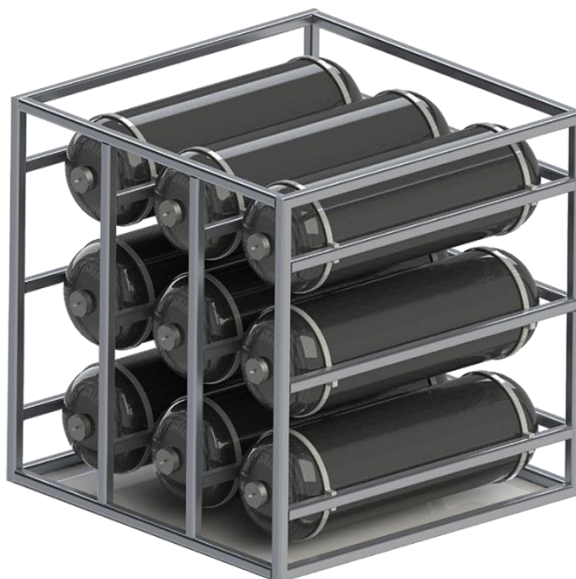


**Slika 5-2.** Spremnik ukapljenog vodika (preuzeto sa Linde Engineering, 2021)

Za unutarnji promjer i debljinu stijenke spremnika nema točnih podataka, vrijednosti su pretpostavljene. Prema Steelhead Composites (2022), volumen visokotlačnog međuspremnik iznosi  $0,300 \text{ m}^3$ , a unutarnji promjer  $0,485 \text{ m}$ . S obzirom da je volumen jednog visokotlačnog međuspremnik relativno mali, potrebno je u jednom modulu povezati više njih kako bi se optimizirao rad punionice (Slika 5-3.). Ako je premali broj visokotlačnih međuspremnik

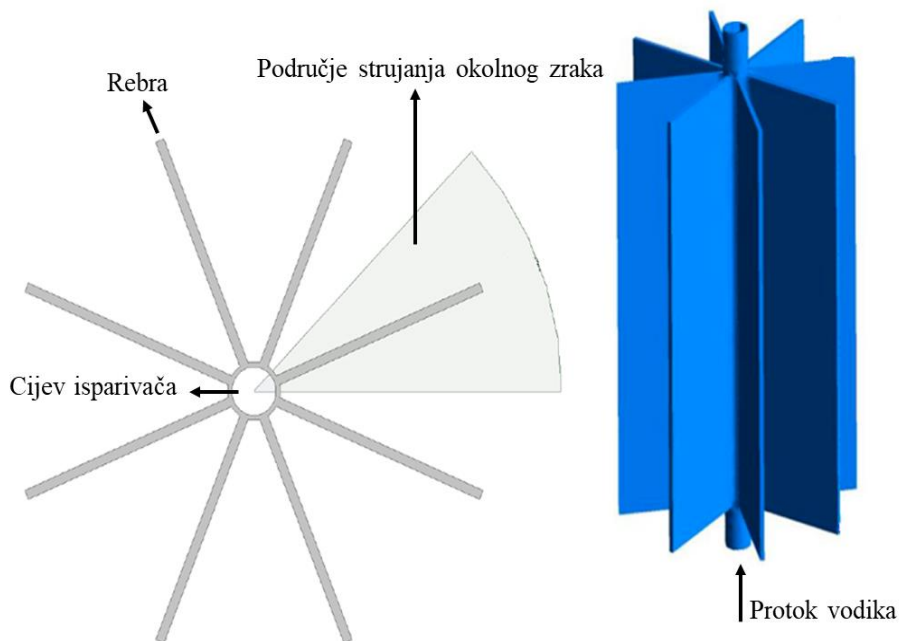


navedenog volumena, neprestano će se evakuirati jer se brzo postigne maksimalno dozvoljeni tlak te simulacija u tom slučaju traje predugo. Kako bi se simulirao rad punionice, pretpostavljeno je 15 visokotlačnih međuspremnikova navedenog volumena. Prema PolyProcessing (2018), debljina stijenke visokotlačnog međuspremnikova iznosi 0,02 m.



**Slika 5-3.** Modul visokotlačnog međuspremnikova (preuzeto sa Steelhead Composites, 2022)

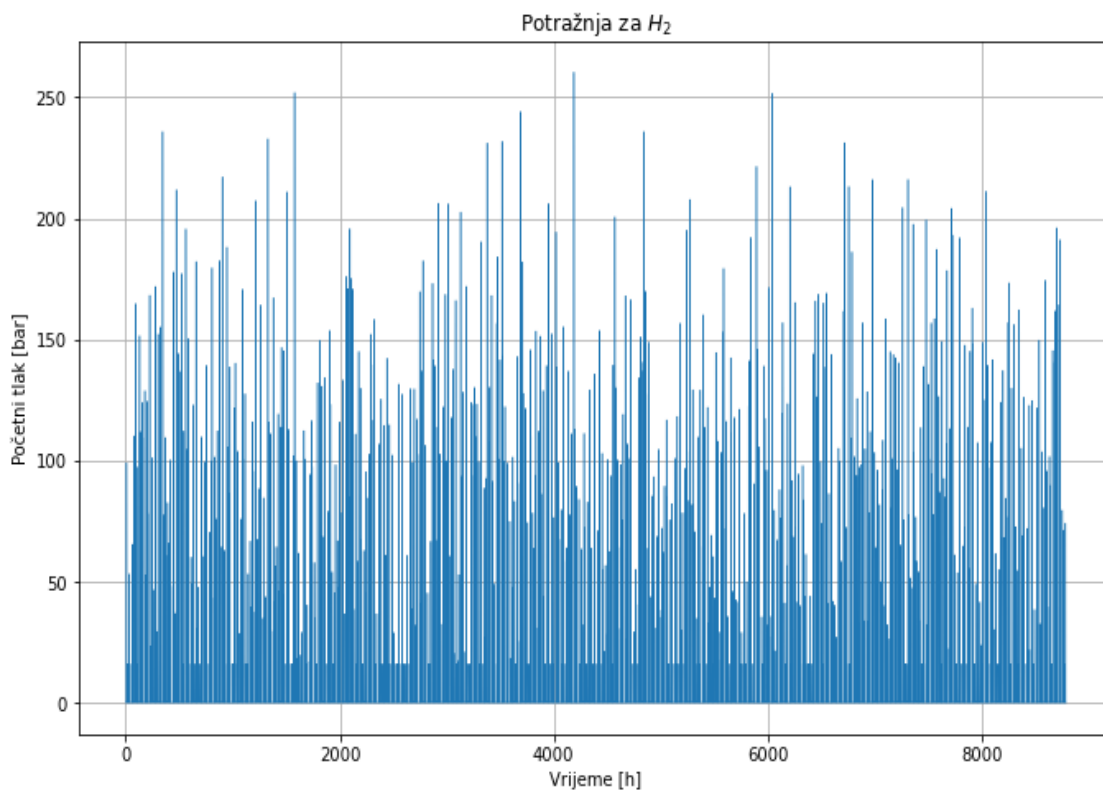
Nakon ventiliranja glavnog spremnikova, vodik prolazi kroz pumpu te ide u isparivač. Pumpa je postavljena na uključiti/isključiti način rada. Kada se ostvari protok vodika iz glavnog spremnikova uslijed dosezanja graničnog uvjeta, pumpa se uključuje i podiže tlak na 900 bar. Kada nema potrebe za protokom vodika, pumpa ne radi. Na Slika 5-2. crvenim pravokutnikom uokviren je isparivač. Svrha isparivača je povećanje tlaka prije ulaska u visokotlačni međuspremnik. Unutar isparivača, tlak se povećava samo uslijed izmjene topline sa okolišnim zrakom (Cryonorm, 2022). Geometrija isparivača (duljina, širina i visina) i broj rebara po cijevi preuzeti su prema Linde Engineering (2021). Radi jasnijeg prikaza principa rada, na Slika 5-4. prikazan je presjek isparivača.



**Slika 5-4.** Presjek isparivača (modificirano prema Sun et al., 2018)

Na Slika 5-4. može se vidjeti da okolišni zrak struji oko rebara te dolazi do prijenosa topline između okolnog zraka i cijevi isparivača, kroz koju struji vodik. Prema Sun et al. (2018), povećanje broja rebara povećava površinu za izmjenu topline, no povećanje broja rebara iznad 8 ili 12 ne doprinosi poboljšanju prijenosa topline zbog značajnijeg otpora strujanju zraka. Visina orebrenja odnosi se na duljinu rebara, povećanjem duljine rebara povećava se prijenos topline. Duljina, broj, unutarnji i vanjski promjer cijevi isparivača pretpostavljene su vrijednosti.

### 5.1.3. Dijagram potražnje za vodikom



**Slika 5-5.** Nasumični odabir potražnje za vodikom

Na Slika 5-5. može se vidjeti raspodjela potražnje za vodikom u periodu od 8760 h, odnosno nasumični dolazak vozila na punionicu unutar godinu dana. U programskom jeziku Python, korišten je nasumični odabir vrijednosti tlaka unutar 8760 h kako bi se izradio dijagram potražnje za vodikom.

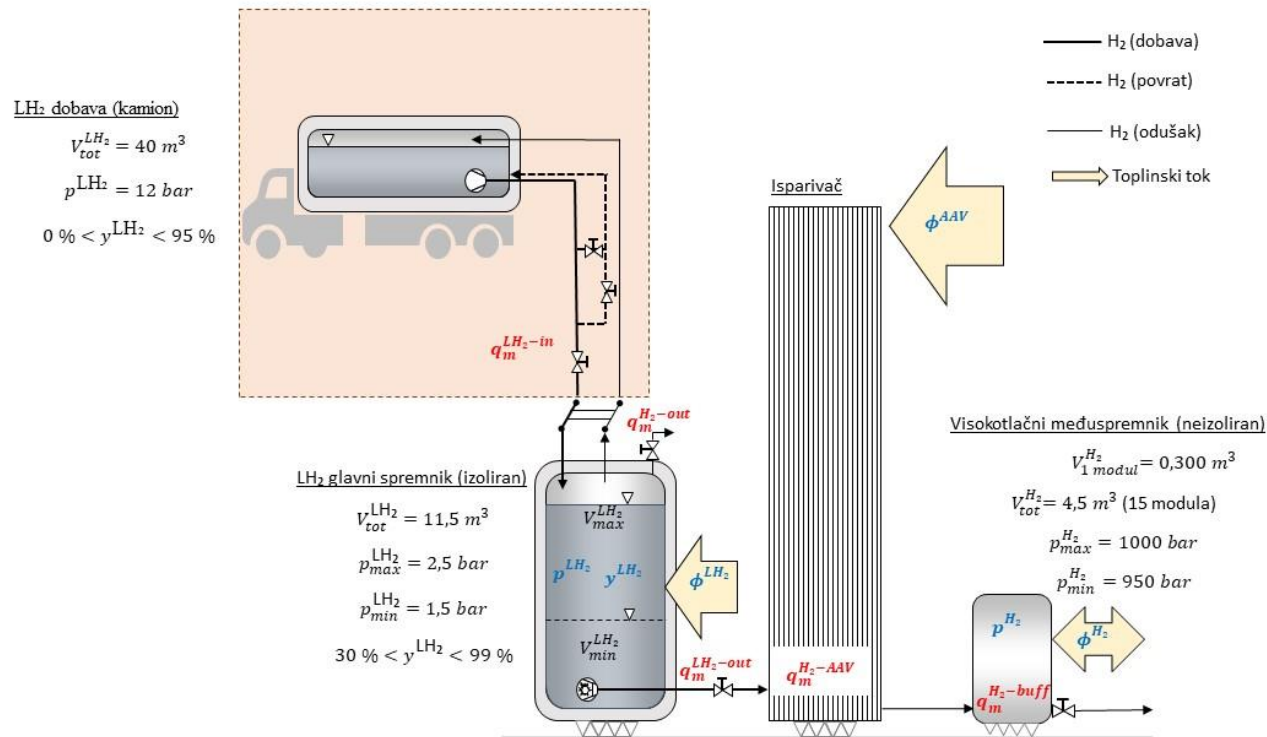
#### 5.1.4. Parametri vođenja procesa i njihova ograničenja

**Tablica 5-2.** Procesni parametri i njihova ograničenja

Procesni parametri	
Minimalni tlak u glavnom spremniku [bar]	1,5
Nominalni tlak u glavnom spremniku [bar]	2
Maksimalni tlak u glavnom spremniku [bar]	2,5
Početni maseni udio pare u glavnom spremniku [-]	0,01
Maksimalni maseni udio pare u glavnom spremniku [-]	0,7
Minimalni tlak u visokotlačnom međuspremniku [bar]	950
Maksimalni tlak u visokotlačnom međuspremniku [bar]	1000
Nominalni protok kroz dispenzer [m <sup>3</sup> /s]	0,015

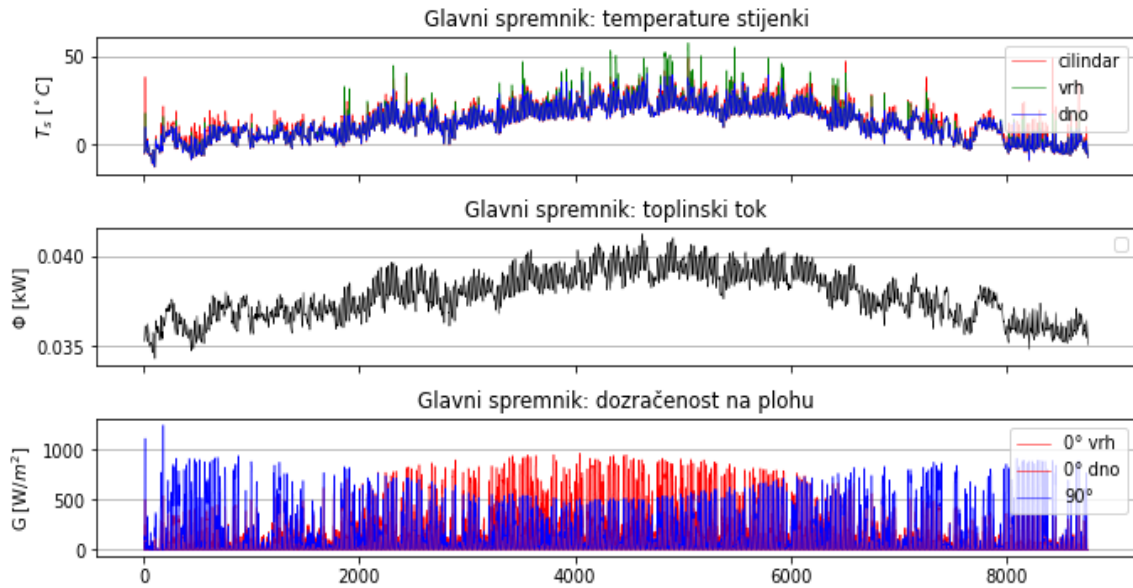
Procesni parametri obuhvaćaju nominalne tlakove u glavnom i visokotlačnom međuspremniku te maseni udio pare u glavnom spremniku. U Tablica 5-2. prikazani su parametri vođenja procesa i njihova ograničenja. Prema Decker (2019), nominalni tlak unutar glavnog spremnika postavljen je na vrijednost od 2 bar. Početni i maksimalni maseni udio pare u glavnom spremniku pretpostavljene su vrijednosti. Prema Decker (2019), maksimalni tlak unutar visokotlačnog međuspremnika iznosi 1000 bar. U sljedećim simulacijama, koristit će se ulazni parametri kao i u inicijalnoj simulacija, uz promjenu određenih vrijednosti.

## 5.2. Analiza rezultata za promjenu debljine izolacije spremnika pri nultoj potražnji



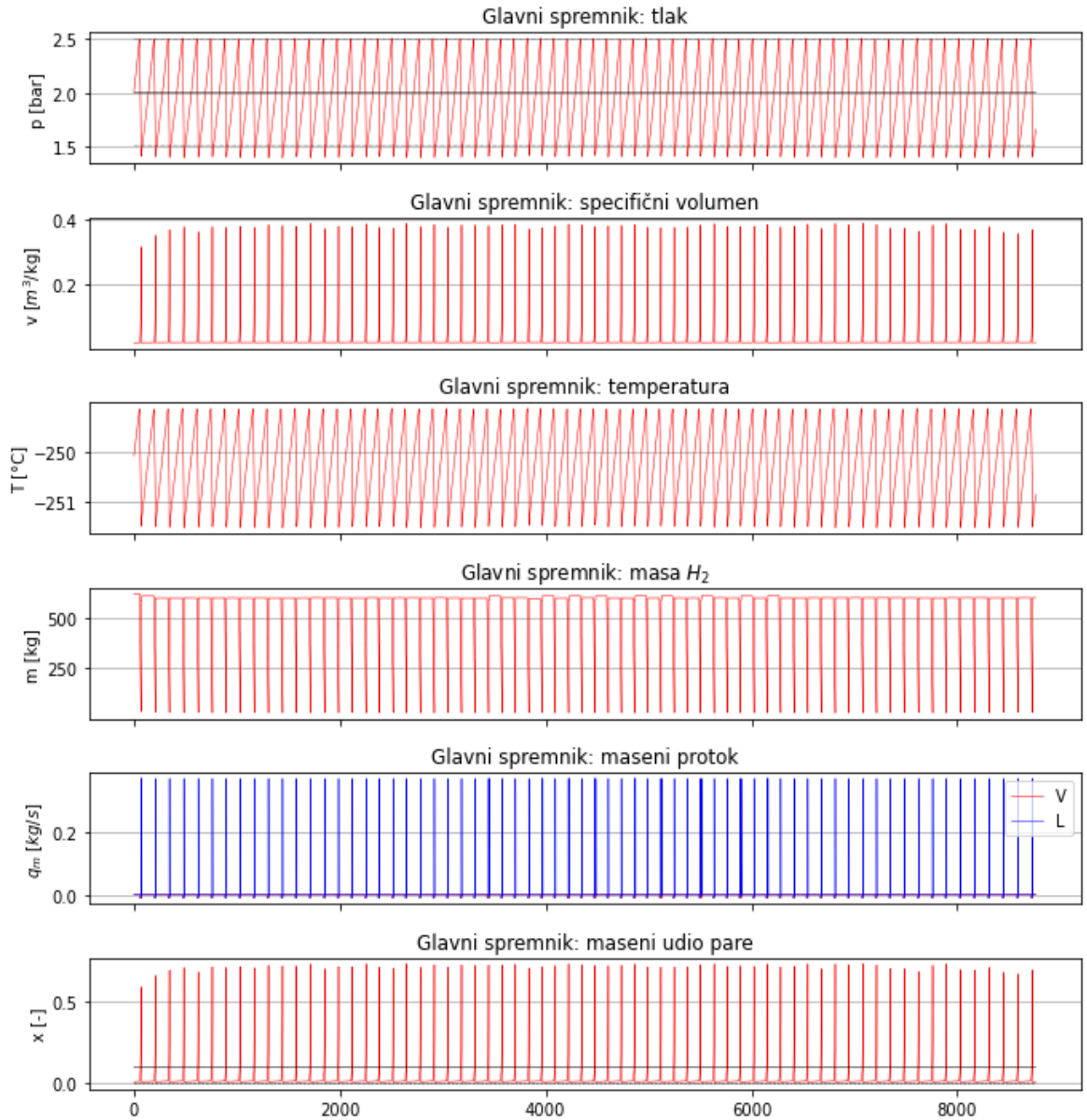
Slika 5-6. Shema simulacije punionice vodika pri nultoj potražnji

### 5.2.1. Debljina izolacije 40 cm



**Slika 5-7.** Toplinski tok koji prodire u glavni spremnik i temperature stijenki spremnika

Ukupni toplinski tok koji prodire u glavni spremnik vodika sastoji se od prodora topline kroz plašt (cilindar), vrh i dno spremnika. Iz dijagrama na Slika 5-7. može se vidjeti da prodor toplinskog toka doseže najveću vrijednost od 41,21 W, a najmanja vrijednost prodora toplinskog toka iznosi 34,32 W. Najveće vrijednosti prodora toplinskog toka nalaze se u periodu od 4000 do 6000 h. Naime, iz dijagrama je vidljivo da dozračenost sunca u ovom periodu ima najgušće raspoređene vrijednosti. Prosječni prodor toplinskog toka u glavni spremnik kroz period od 8760 h iznosi 37,85 W. Temperatura stijenke glavnog spremnika prati trend prodora toplinskog toka. Ona se računa posebno za plašt (cilindar), vrh i dno spremnika. Može se primijetiti da su najveće vrijednosti temperature stijenke u periodu najvećeg prodora toplinskog toka. Temperatura stijenke na dnu spremnika najmanje oscilira u odnosu na ostale dvije vrijednosti te se kreće u rasponu od -12,6 °C do 40,1 °C. U periodu velikog prodora toplinskog toka, temperatura stijenke na vrhu spremnika doseže najveće vrijednosti u iznosu od 57,4 °C. Temperatura stijenke plašta spremnika kreće se u rasponu od -13 °C do 51 °C.

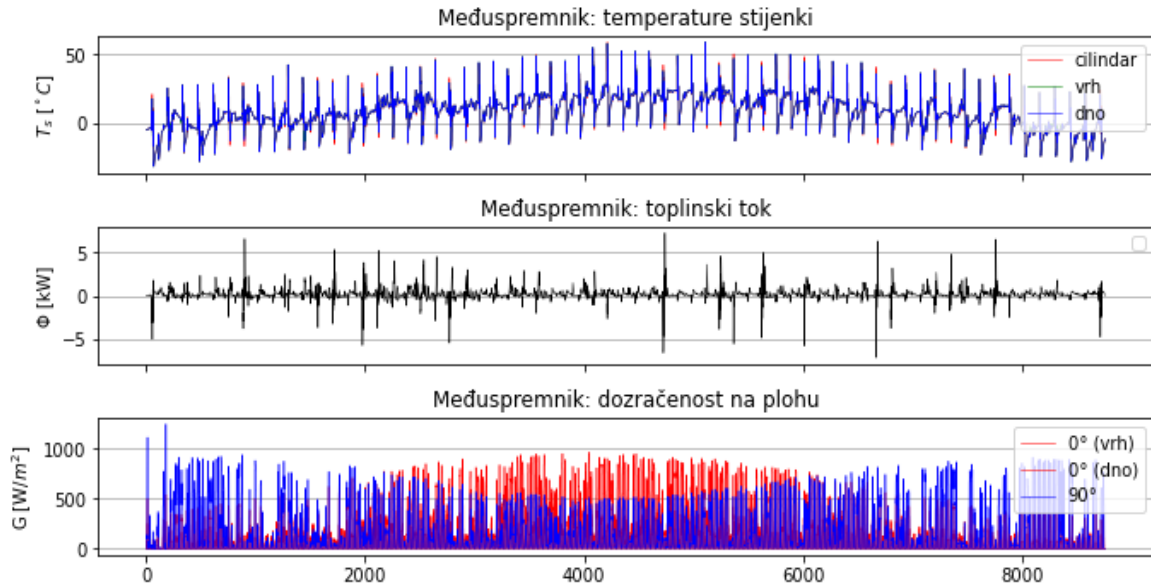


**Slika 5-8.** Parametri unutar glavnog spremnika vodika

Na početku simulacije, inicijalna vrijednost sadržaja pare u glavnom spremniku iznosi 0,01 (Slika 5-8.). Na dijagramu masenog udjela pare može se vidjeti da se spremnik ventilira 15 puta unutar 2000 h (dosegnut je maksimalni maseni udio pare). Ovo znači da se spremnik 15 puta u 2000 h treba nadopuniti novim ukapljenim vodikom. Inicijalno dosezanje maksimalnog masenog udjela pare dogodi se za 68 h. Interpretacijom dijagrama, utvrđeno je da se svako sljedeće dosezanje maksimalnog masenog udjela pare odvija kroz 137 h. Inicijalno dosezanja maksimalnog masenog udjela kraće je u odnosu na sljedeće jer simulacija počinje od vrijednosti

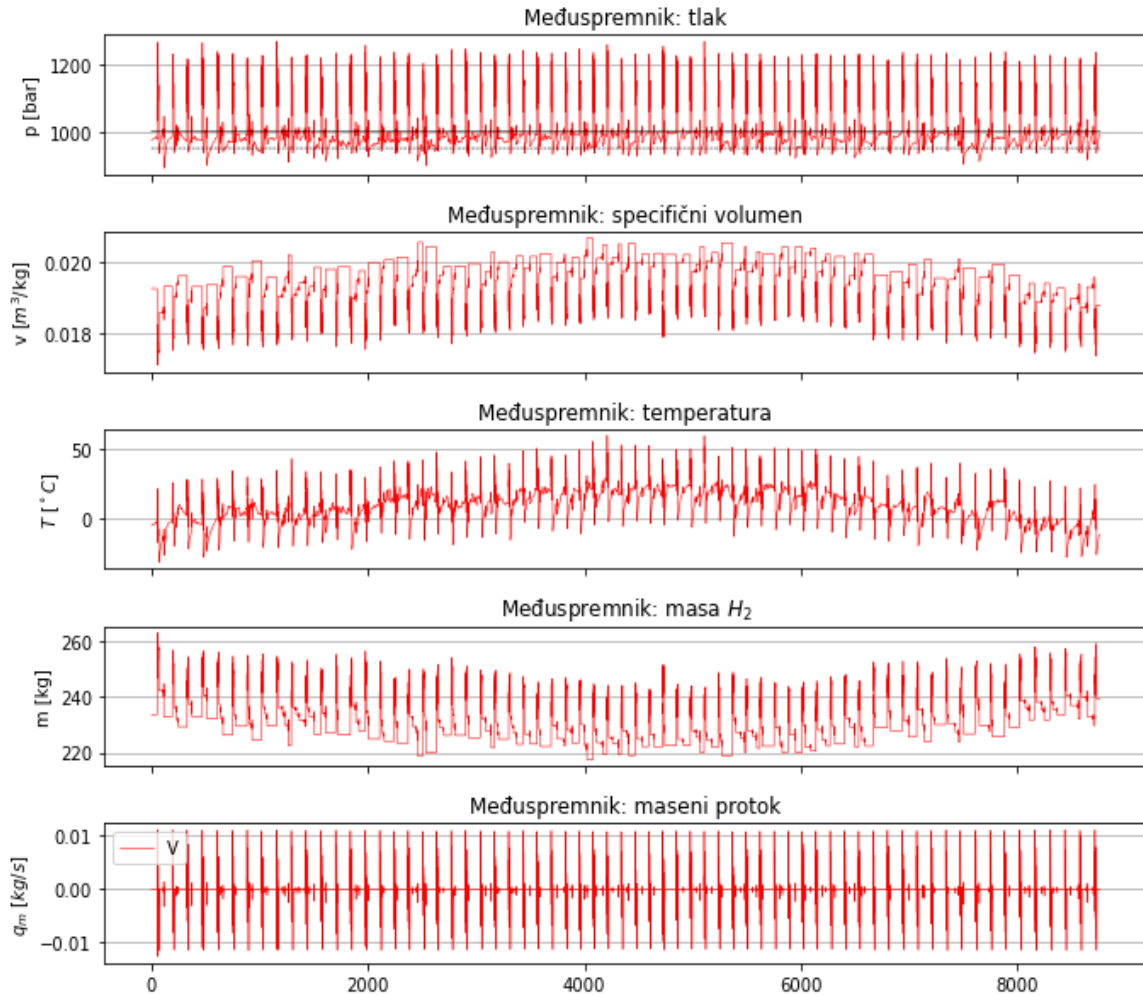
sadržaja pare 0,01. Nakon prvog ventiliranja spremnika, sadržaj pare pada ispod inicijalne vrijednosti te svaki sljedeći interval rasta sadržaja pare traje duže od prvog. Dakle, prosječno vrijeme od nadopune novim ukapljenim vodikom do dosezanja maksimalnog sadržaja pare traje oko 137 h. Vrijeme koje je potrebno da se spremnik ventilira od maksimalnog do minimalnog sadržaja pare iznosi 30 min. Trend od 15 ventiliranja i nadopuna može se primjeniti na period od 2000 do 4000 h, 6000 do 8000 h pa do kraja vremenskog perioda. U periodu od 4000 do 6000 h, glavni spremnik ventilira se 16 puta zbog većeg prodora topline u tom periodu. Prosječno vrijeme dosezanja maksimalnog sadržaja pare u ovom periodu iznosi 128 h. Vrijeme ventiliranja spremnika iznosi također 30 min. Ventiliranje i nadopuna spremnika vidljivi su na dijagramu masenog protoka. Pik na dijagramu znači da je započelo ventiliranje i nadopuna glavnog spremnika. Ventiliranje započinje protokom pare iz glavnog spremnika u iznosu 0,01 kg/s. U isto vrijeme kada započinje ventiliranje spremnika, počinje i nadopuna spremnika novim ukapljenim vodikom protokom 0,37 kg/s. Na početku simulacije, tlak je na inicijalnoj vrijednosti od 2 bar. Zbog prodora toplinskog toka u spremnik, dolazi do isparavanja kapljevito vodika i povećanja sadržaja pare, što uzrokuje povećanje tlaka unutar spremnika. Kada tlak naraste do dozvoljene vrijednosti od 2,5 bar potrebno je ispustiti dio pare kako bi se regulirao tlak unutar spremnika. Na dijagramu mase vodika unutar glavnog spremnika može se vidjeti da povećanjem sadržaja pare, masa vodika unutar spremnika pada. Isparavanje kapljevito dijela uzrokuje smanjenje mase vodika unutar spremnika jer je ukapljeni vodik nositelj mase. Inicijalno, u glavnom spremniku nalazi se 616,66 kg vodika, a kada sadržaj pare poraste na 0,7, masa u spremniku iznosi 30,69 kg. Povećanjem sadržaja pare specifični volumen raste jer se ukupna masa unutar spremnika smanjuje zbog smanjenja udjela kapljevine. Temperatura unutar glavnog spremnika prati trend kretanja tlaka. Na početku vremenskog koraka pri tlaku 2 bar i sadržaju pare 0,01, temperatura unutar spremnika iznosi -250,2 °C. Kada tlak naraste do vrijednosti od 2,5 bar, temperatura iznosi -249,1 °C, a pri tlaku od 1,5 bar iznosi -251,5 °C. U vremenu od 8760 h, za zadane ulazne parametre, potrebno je ukupno 66 puta nadopuniti glavni spremnik vodikom.





**Slika 5-9.** Toplinski tok koji prodire u visokotlačni međuspremnik i temperature stijenki

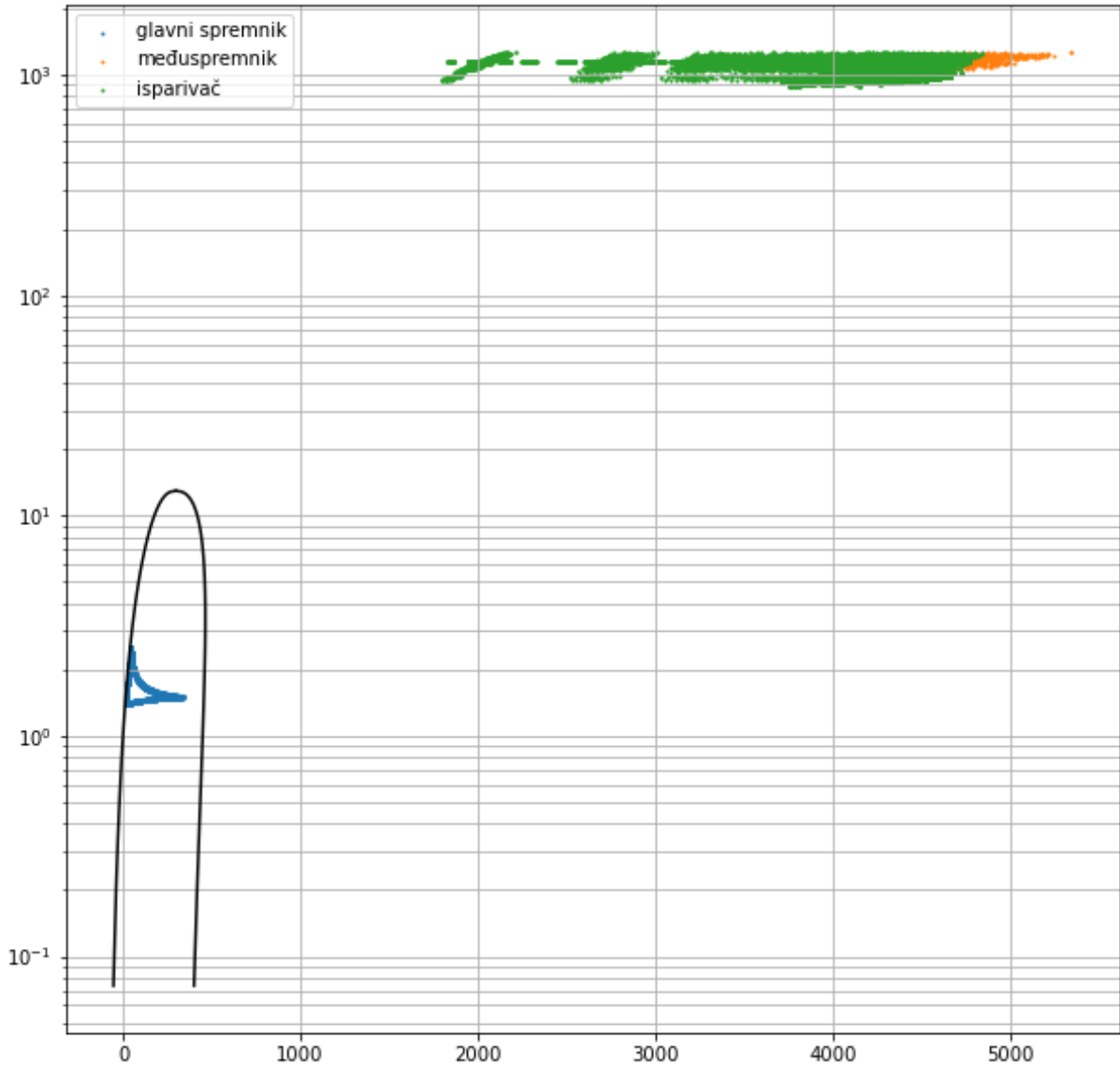
Toplinski tok na razini visokotlačnog međuspremnika odnosi se na izmjenu topline sa okolinom. Ako su vrijednosti pozitivne onda dolazi do prodora toplinskog toka, ako su negativne onda je smjer toplinskog toka prema okolišu. Za zadane ulazne parametre visokotlačnog međuspremnika i okolišne uvjete, iz dijagrama na Slika 5-9. može se vidjeti da toplinski tok varira tijekom period od 8760 h te se kreće u rasponu od -7,11 kW do 7,22 kW. Prodor toplinskog toka u visokotlačni međuspremnik znatno je veći od prodora u glavni spremnik jer međuspremnik nema izolaciju. Analogno glavnom spremniku, temperatura stijenke visokotlačnog međuspremnika računa se posebno za plašt, vrh i dno spremnika. Temperature stijenki na vrhu i dnu visokotlačnog međuspremnika kreću se od -31,1 °C do 59 °C, a na plaštu od -30,9 °C do 58,8 °C.



**Slika 5-10.** Parametri unutar visokotlačnog međuspremnika

Kretanje tlaka unutar visokotlačnog međuspremnika definirano je u rasponu od 950 do 1000 bar (Slika 5-10.). Visokotlačni međuspremnik mora se evakuirati kada tlak naraste iznad maksimalno dozvoljene granice od 1000 bar. Tlak unutar visokotlačnog međuspremnika na početku simulacije iznosi 975 bar. U 54. h započinje maseni protok kapljevito vodika iz glavnog spremnika prema međuspremniku protokom 0,01 kg/s i traje do 68. h. Tlak u međuspremniku na početku simulacije je nizak te ga je potrebno regulirati nadopunom iz glavnog spremnika. U ovom periodu tlak u visokotlačnom međuspremniku jako oscilira u rasponu od 1000 do 1250 bar jer tijekom nadopune naglo raste tlak zbog osjetljivosti međuspremnika na ulazni protok. Stoga, međuspremnik se u isto vrijeme evakuira kako bi se regulirao tlak. U periodu nadopune glavnog spremnika ukapljenim vodikom, nema protoka

prema visokotlačnom međuspremniku i tlak oscilirana samo zbog prodora toplinskog toka. Bitno je primjetiti da u periodu od 8760 h, kada nema protoka vodika prema visokotlačnom međuspremniku, tlak uslijed prodora toplinskog toka ne prelazi granicu od 1000 bar. U periodima kada se ostvari protok vodika, tlak naglo naraste iznad 1000 bar. Potrebno je napomenuti kako u ovom slučaju nije uračunata potražnja za vodikom te se promatra samo rad punionice. Maksimalna vrijednost koju je dosegao tlak u visokotlačnom međuspremniku iznosi 1271 bar, a najniža na koju se spustio tijekom ventiliranja iznosi 890 bar. Ulazni maseni protok kreće se u rasponu od 0 do 0,011 kg/s, a pri ventiliranju od 0 do 0,012 kg/s. Masa vodika unutar visokotlačnog međuspremnika na početku simulacije iznosi 233,5 kg. Ona se mijanja ovisno o nadopuni ili evakuaciji. Kada vodik ulazi u visokotlačni međuspremnik, masa vodika se povećava, a uslijed evakuacije se smanjuje. Maksimalna vrijednost mase vodika u međuspremniku iznosi 262,9 kg, a najmanja 217,5 kg. Temperatura vodika unutar visokotlačnog međuspremnika na početku simulacija iznosi -4,7 °C. U prvih 54 h simulacije, kada nema protoka vodika, temperatura vodika ovisi o kretanju tlaka i prodoru toplinskog toka. Povećanjem tlaka, poveća se i temperatura vodika. U 54. h, kada se ostvario maseni protok i tlak narastao do 1250 bar, temperatura dostiže 21,8 °C. Čim se visokotlačni međuspremnik evakuira i tlak padne, temperatura vodika pada. Najviša temperatura ostvarena u visokotlačnom međuspremniku iznosi 59,8 °C, a najniža -31,2 °C. Pikovi na dijagramu temperature su u trenucima protoka vodika u visokotlačni međuspremnik i iz njega. Blago osciliranje temperature između pikova (kada nema protoka) događa se zbog prodora toplinskog toka.

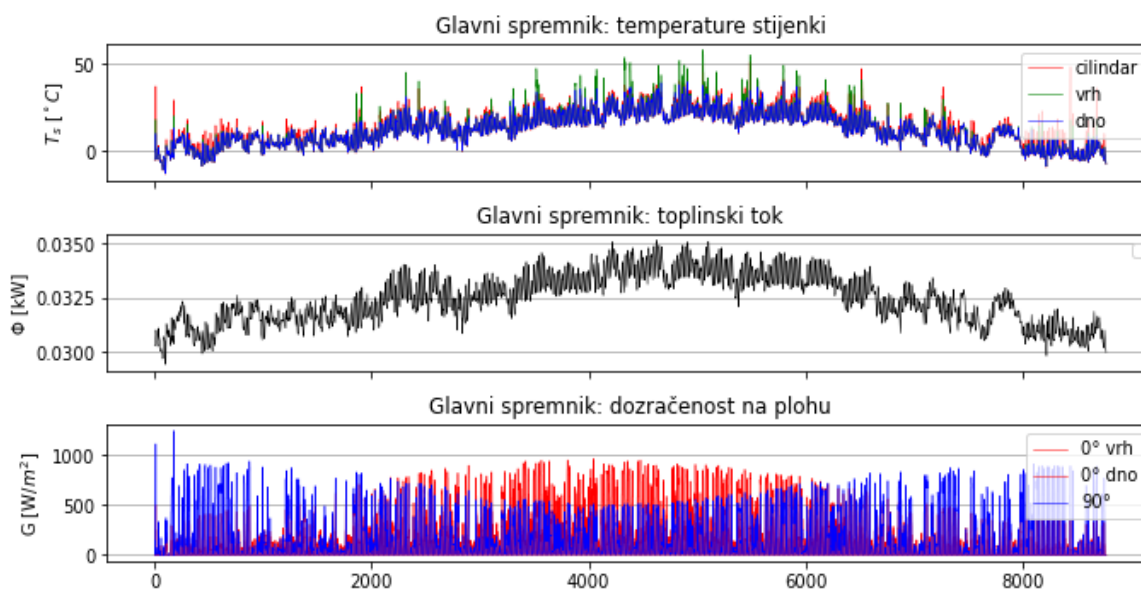


**Slika 5-11.** p-h dijagram

Na Slika 5-11. prikazan je p-h dijagram sustava punionice vodika. Dijagram prikazuje pozicije termodinamičkih parametara unutar sustava. Iz dijagrama može se zaključiti da je glavni spremnik unutar dvofaznog područja, dok su visokotlačni međuspremnik i isparivač u području nadkritičnog plina.

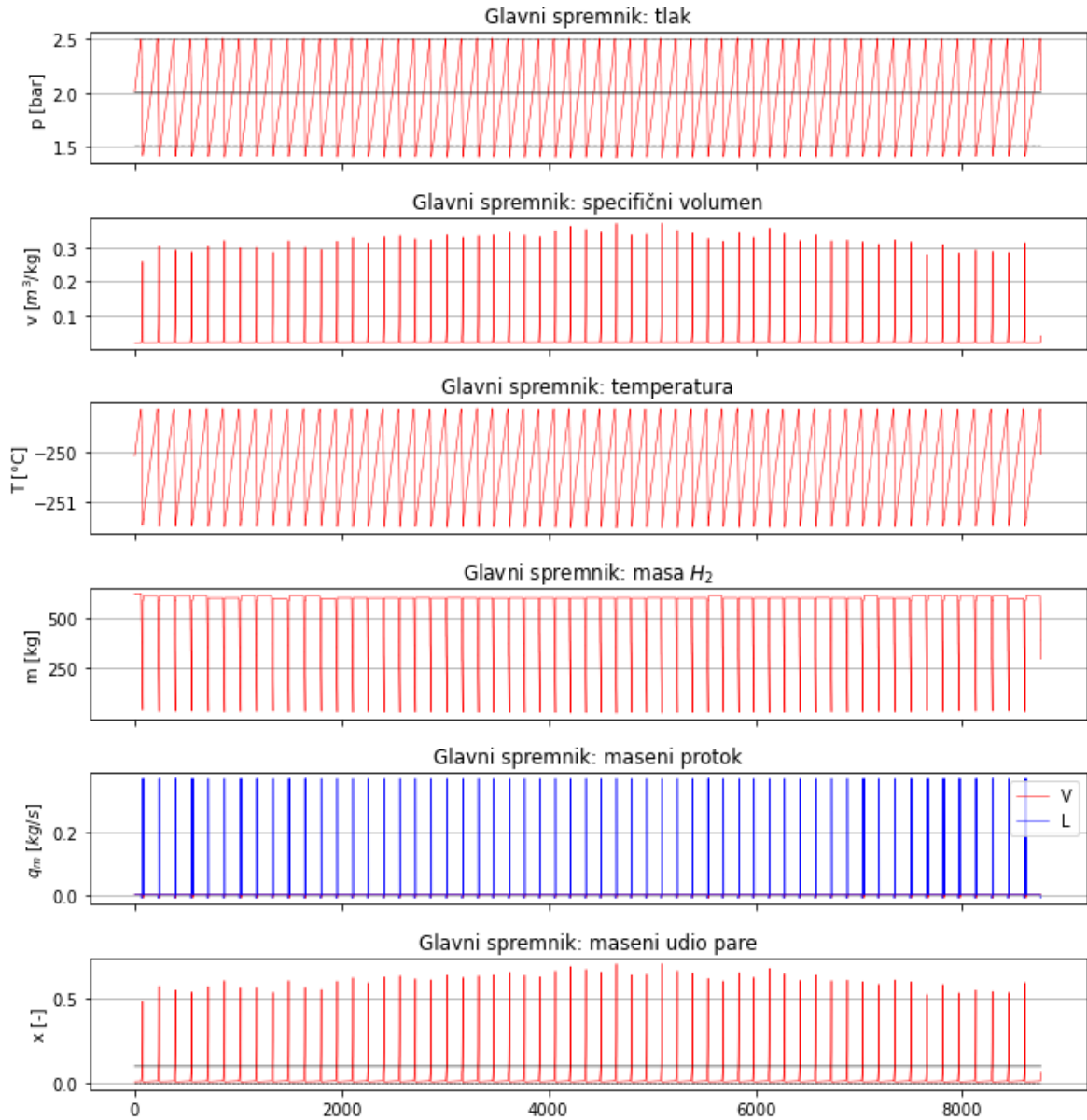
### 5.2.2. Debljina izolacije 48 cm

U odnosu na inicijalnu simulaciju, u ovoj simulaciji debljina MLI glavnog spremnika povećana je za 20%. Svi ostali ulazni parametri jednaki su kao i u inicijalnoj simulaciji. Debljina MLI u ovom slučaju iznosi 0,48 m. Debljina MLI je povećana u cilju smanjenja prodora toplinskog toka u glavni spremnik.



**Slika 5-12.** Prodor toplinskog toka u glavni spremnik

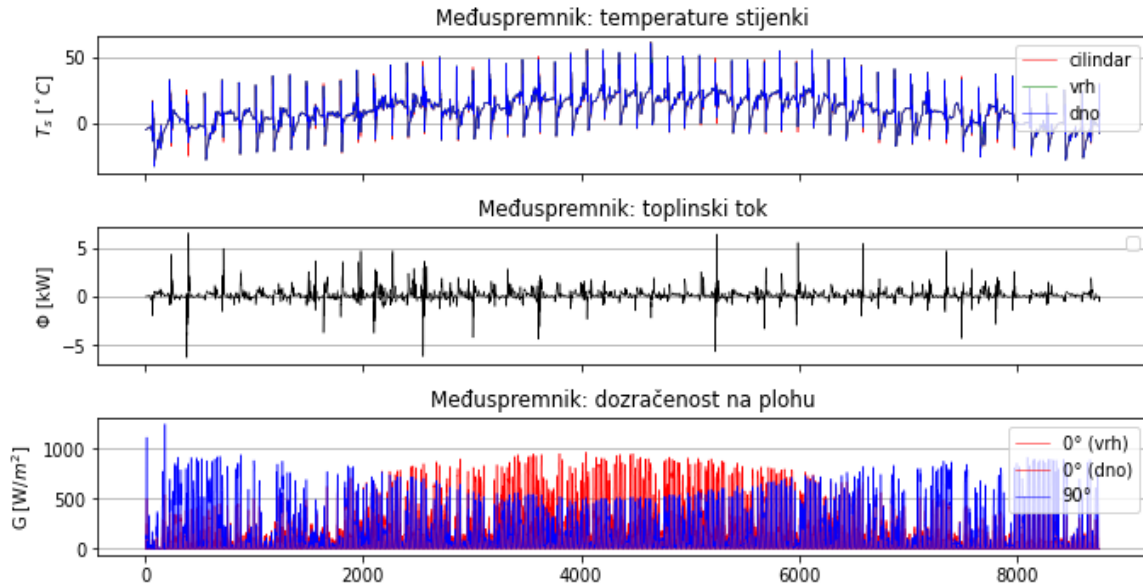
U vremenskom periodu od 8760 h, najveći prodor toplinskog toka u glavni spremnik iznosi 35,14 W, a najmanji 29,44 W (Slika 5-12.). Kao i u inicijalnoj simulaciji, prodor toplinskog toka najznačajniji je u periodu od 4000 do 6000 h. Prosječni prodor toplinskog toka kroz cijeli vremenski period iznosi 32,49 W. S obzirom na povećanje debljine MLI glavnog spremnika, logičan je zaključak da će prodor toplinskog toka u glavni spremnik biti manji, što rezultati simulacije i potvrđuju. Najveće vrijednosti temperature stijenke nalaze se u periodu najvećeg prodora toplinskog toka. Temperatura stijenke na dnu spremnika kreće se u rasponu od  $-12,9^{\circ}\text{C}$  do  $40^{\circ}\text{C}$ . U periodu velikog prodora toplinskog toka, temperatura stijenke na vrhu spremnika doseže najveće vrijednosti u iznosu od  $58,1^{\circ}\text{C}$ . Temperatura stijenke plašta spremnika kreće se u rasponu od  $-13^{\circ}\text{C}$  do  $50,8^{\circ}\text{C}$ .



**Slika 5-13.** Parametri unutar glavnog spremnika

Na dijagramu masenog udjela pare može se vidjeti da se glavni spremnik ventilira 13 puta unutar 2000 h (Slika 5-13.). Spremnik je unutar 2000 h potrebno 13 puta nadopuniti novim ukapljenim vodikom. Prvo ventiliranje spremnika odvija se u 76. satu. Prosječno vrijeme od nadopune novim ukapljenim vodikom do ventiliranja spremnika traje oko 156,5 h. Ventilacija glavnog spremnika traje oko 30 min. Trend od 13 ventiliranja i nadopuna može se primijeniti na period od 2000 do 4000 h, 6000 do 8000 h pa do kraja vremenskog perioda. U periodu od

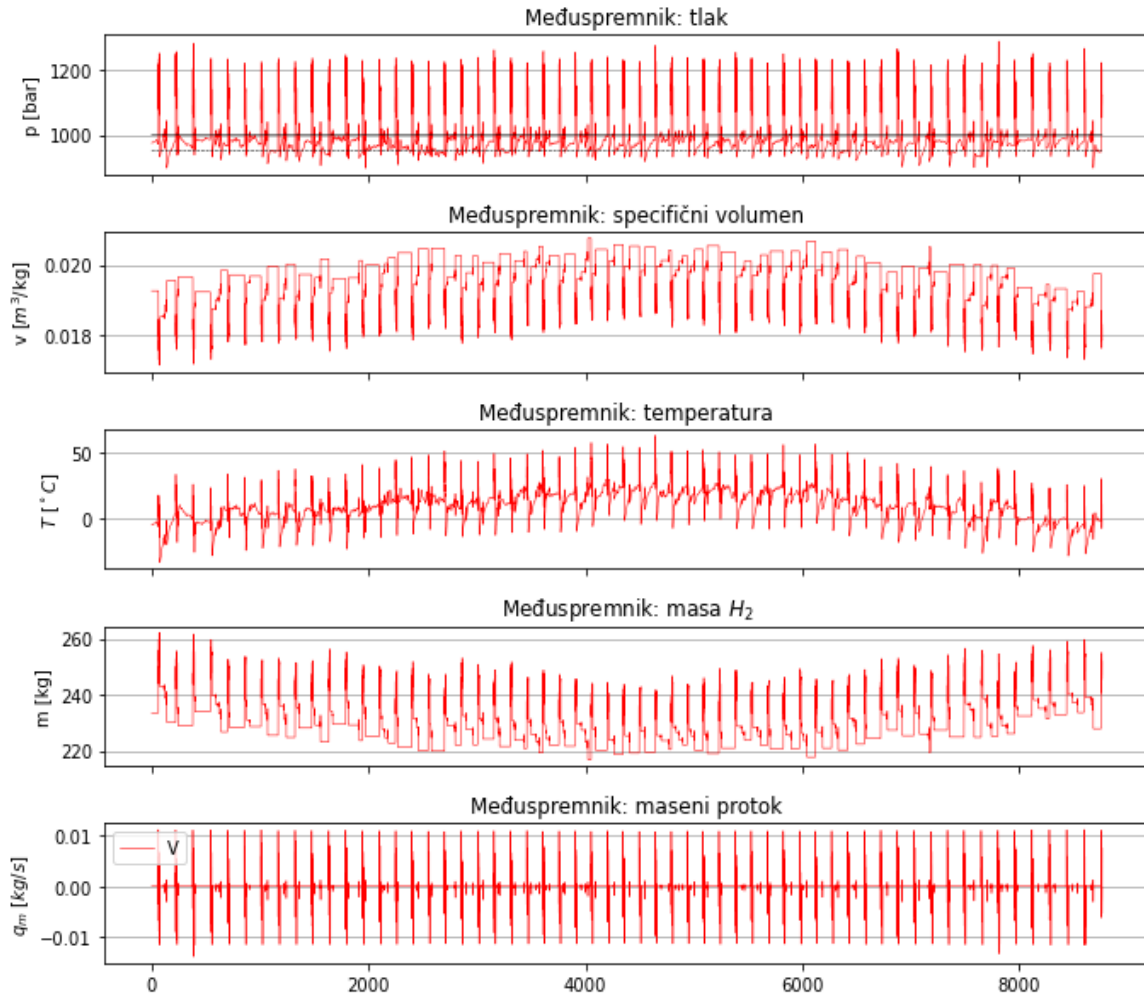
4000 do 6000 h, glavni spremnik se ventilira 14 puta zbog većeg prodora toplinskog toka. Prosječno vrijeme dosezanja maksimalnog sadržaja pare u ovom periodu iznosi 147 h. Vrijeme ventiliranja spremnika iznosi također 30 min. Analogno inicijalnoj simulaciji, ventiliranje započinje protokom pare iz spremnika u iznosu od 0,01 kg/s, a nadopuna spremnika novim ukapljenim vodikom odvija se protokom 0,37 kg/s. Kretanje tlaka unutar spremnika odvija se također u rasponu od 1,5 do 2,5 bar, a na početku simulacije tlak je na 2 bar. Masa vodika unutar spremnika kreće se u jednakom rasponu kao i u inicijalnoj simulaciji. Na početku simulacije u spremniku nalazi se 616,66 kg vodika, a kada sadržaj pare poraste na 0,7, masa u spremniku iznosi 30,69 kg. Temperatura unutar glavnog spremnika prati trend kretanja tlaka te se također kreće u jednakom rasponu kao i u inicijalnoj simulaciji. U vremenu od 8760 h, za zadane ulazne parametre, potrebno je ukupno 57 puta nadopuniti glavni spremnik vodikom. Iz ove simulacije može se zaključiti da veća debljina MLI smanjuje prodor toplinskog toka u glavni spremnik. Posljedično, potrebno je više vremena da se dosegne maksimalni sadržaj pare unutar spremnika te ga rjeđe treba nadopuniti novim ukapljenim vodikom.



**Slika 5-14.** Prodor toplinskog toka u visokotlačni međuspremnik

Izmjena topline sa okolinom na razini međuspremnika u trenutnoj simulaciji manja je u odnosu na inicijalnu simulaciju. Vrijednosti toplinskog toka kreću se u rasponu od -6,3 do 6,6 kW (Slika 5-14.). Temperature stijenki na vrhu, dnu i plaštu visokotlačnog međuspremnika kreću se od  $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $60,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .





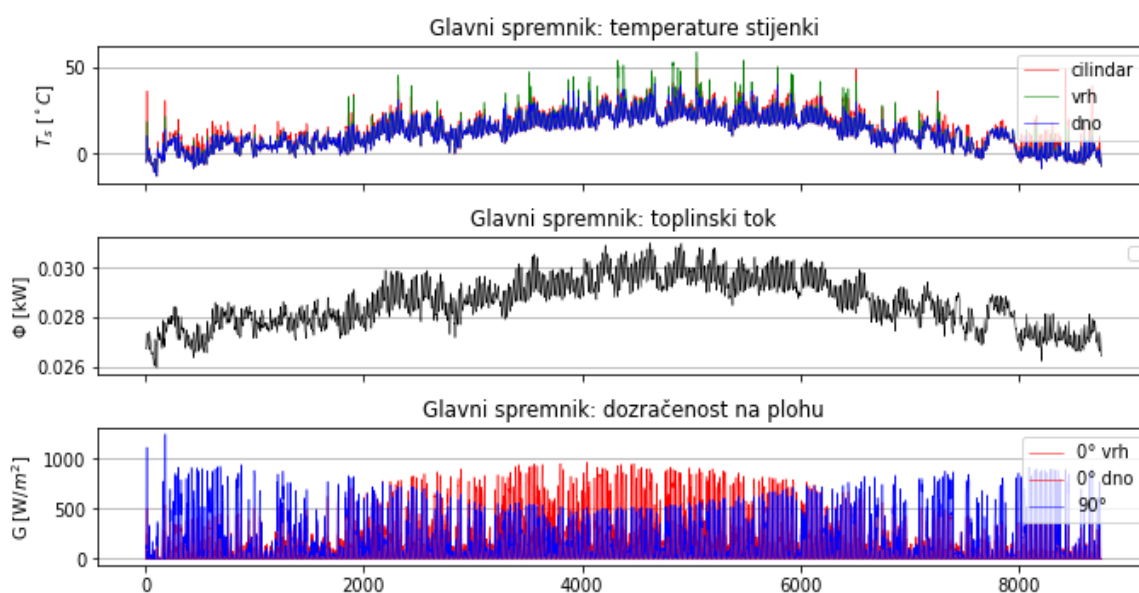
**Slika 5-15.** Parametri unutar visokotlačnog međuspremnika

U 63. satu započinje maseni protok kapljevito vodika iz glavnog spremnika prema visokotlačnom međuspremniku u iznosu 0,01 kg/s i traje do 72. sata (Slika 5-15.). U ovom periodu tlak oscilira u rasponu od 1000 do 1250 bar. U periodu nadopune glavnog spremnika ukapljenim vodikom, nema protoka prema visokotlačnom međuspremniku te tlak oscilirana samo zbog prodora toplinskog toka. Maksimalna vrijednosti koju je dostigao tlak iznosi 1288 bar, a najniža na koju se spustio tijekom evakuacije iznosi 897 bar. Ulazni maseni protok kreće se u rasponu od 0 do 0,011 kg/s, a pri evakuaciji od 0 do 0,014 kg/s. Masa vodika unutar visokotlačnog međuspremnika kreće se u istom rasponu kao i u inicijalnoj simulaciji. Temperatura vodika na početku simulacije iznosi -4,7 °C. U 72. satu, kada se ostvario maseni protok, tlak je narastao do 1250 bar, a temperatura na 17,7 °C. Čim se visokotlačni

međuspremnik evakuira, tlak i temperatura padaju. Najviša temperatura koja se ostvarila u visokotlačnom međuspremniku iznosi 62,4 °C, a najniža -32,6 °C.

### 5.2.3. Debljina izolacije 56 cm

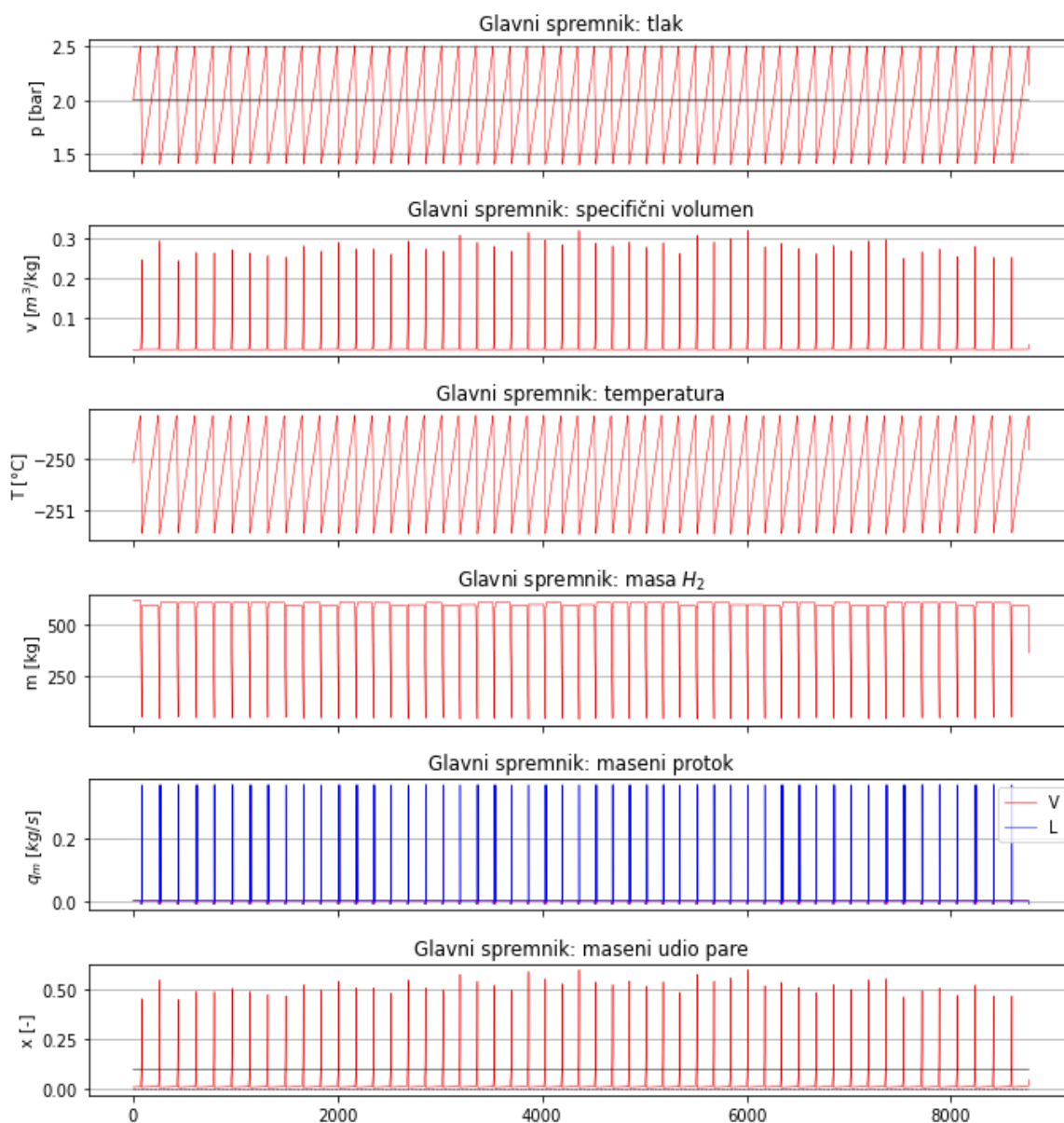
U trećoj simulaciji, debljina MLI povećana je za 40% u odnosu na inicijalnu simulaciju. Povećanje debljine MLI za 40% u odnosu na inicijalnu simulaciju provedeno je kako bi se značajnije primjetila razlika u broju nadopuna glavnog spremnika novim ukapljenim vodikom. Svi ostali ulazni parametri jednaki su kao u inicijalnoj simulaciji, a nova debljina MLI iznosi 0,56 m.



**Slika 5-16.** Prodor toplinskog toka u glavni spremnik

Iz dijagrama na Slika 5-16. može se vidjeti da se prodor toplinskog toka kreće u rasponu od 25,95 do 31,02 W. Najveće vrijednosti prodora toplinskog toka nalaze se kao i u prethodnim slučajevima u periodu od 4000 do 6000 h. Prosječni prodor toplinskog toka u glavni spremnik kroz period od 8760 h iznosi 28,63 W. Temperatura stijenske na dnu spremnika kreće se u rasponu od -13 °C do 40,6 °C. U periodu velikog prodora toplinskog toka, temperatura stijenske

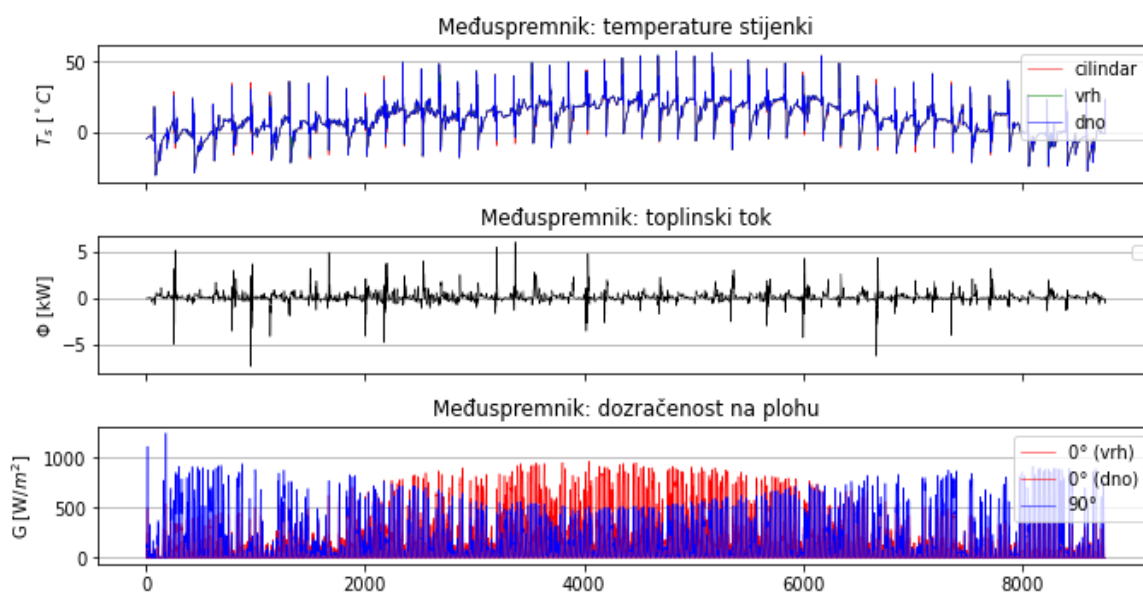
na vrhu spremnika doseže najveće vrijednosti u iznosu od 58,8 °C. Temperatura stijenke plašta spremnika kreće se u rasponu od -13,2 °C do 49,4 °C.



**Slika 5-17.** Parametri unutar glavnog spremnika vodika

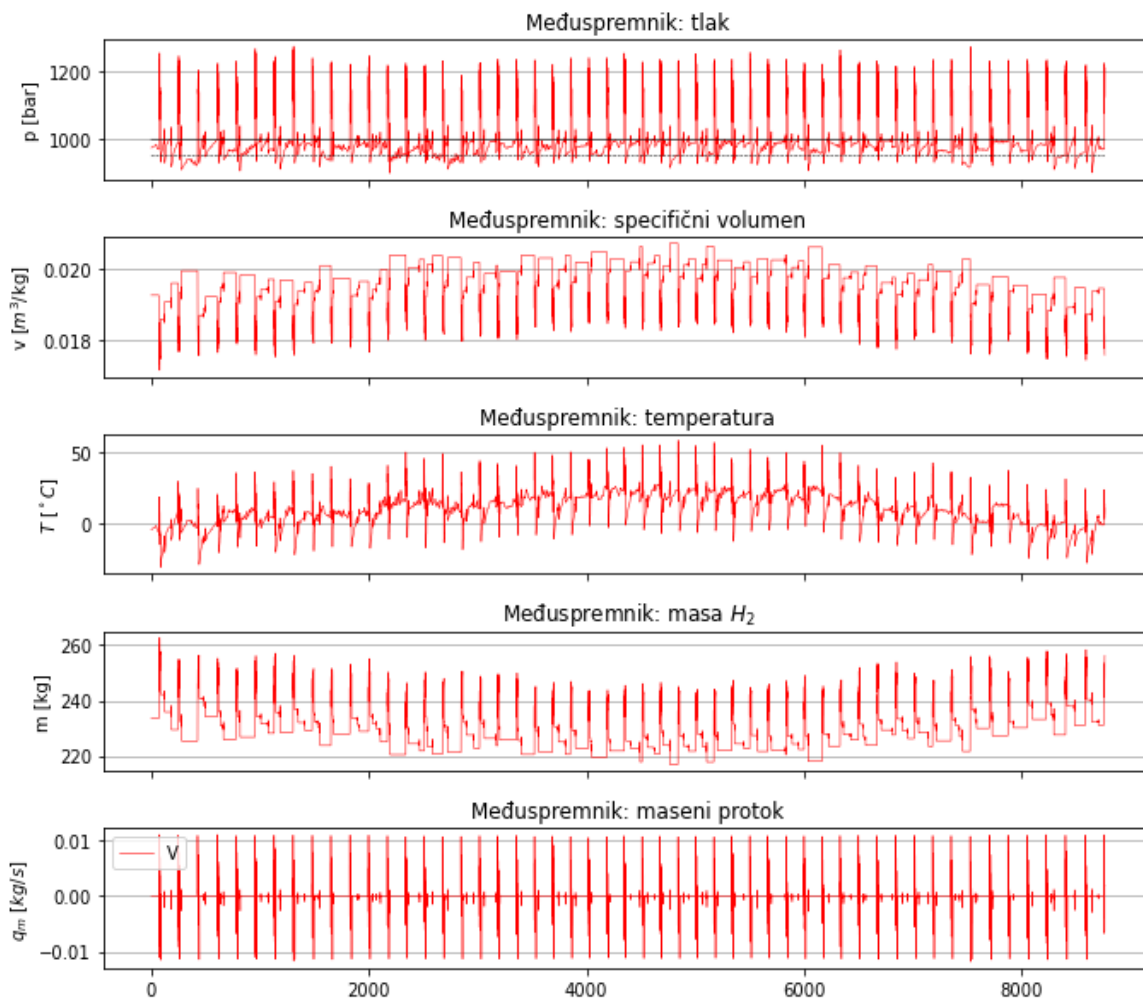
S obzirom na povećanje debljine MLI, na dijagramu masenog udjela pare može se vidjeti da se glavni spremnik ventilira 11 puta unutar 2000 h (Slika 5-17.). Stoga, spremnik je unutar 2000 h potrebno 11 puta nadopuniti novim ukapljenim vodikom. Prvo ventiliranje spremnika odvija

se u 85. satu. Iz dijagrama vidljivo je da prosječno vrijeme od nadopune novim ukapljenim vodikom do ventiliranja spremnika traje oko 174,6 h. Vrijeme potrebno da se spremnik ventilira iznosi oko 30 min. Trend od 11 ventiliranja i nadopuna može se primjeniti na period od 2000 do 4000 h, 6000 do 8000 h pa do kraja vremenskog perioda. U periodu od 4000 do 6000 h, glavni spremnik ventilira se 12 puta. Prosječno vrijeme dosezanja maksimalnog sadržaja pare u ovom periodu iznosi 164,5 h. Ventiliranje glavnog spremnika odvija se protokom pare iz spremnika u iznosu od 0,01 kg/s, a nadopuna spremnika novim ukapljenim vodikom odvija se protokom 0,37 kg/s. Tlak unutar spremnika kreće se u rasponu od 1,5 do 2,5 bar. Masa vodika unutar spremnika jednaka je kao i u inicijalnoj simulaciji. Temperatura unutar glavnog spremnika prati trend kretanja tlaka te se također kreće u jednakom rasponu kao i u inicijalnoj simulaciji. U vremenu od 8760 h, za zadane ulazne parametre potrebno je ukupno 51 puta nadopuniti glavni spremnik vodika.



**Slika 5-18.** Prodor toplinskog toka u visokotlačni međuspremnik

Toplinski tok na razini međuspremnika u trenutnoj simulaciji kreće se u rasponu od -7,3 do 6,1 kW (Slika 5-18.). Temperature stijenki na vrhu, dnu i plaštu visokotlačnog međuspremnika kreću se od  $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $58\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Slika 5-19.** Parametri unutar visokotlačnog međuspremnika

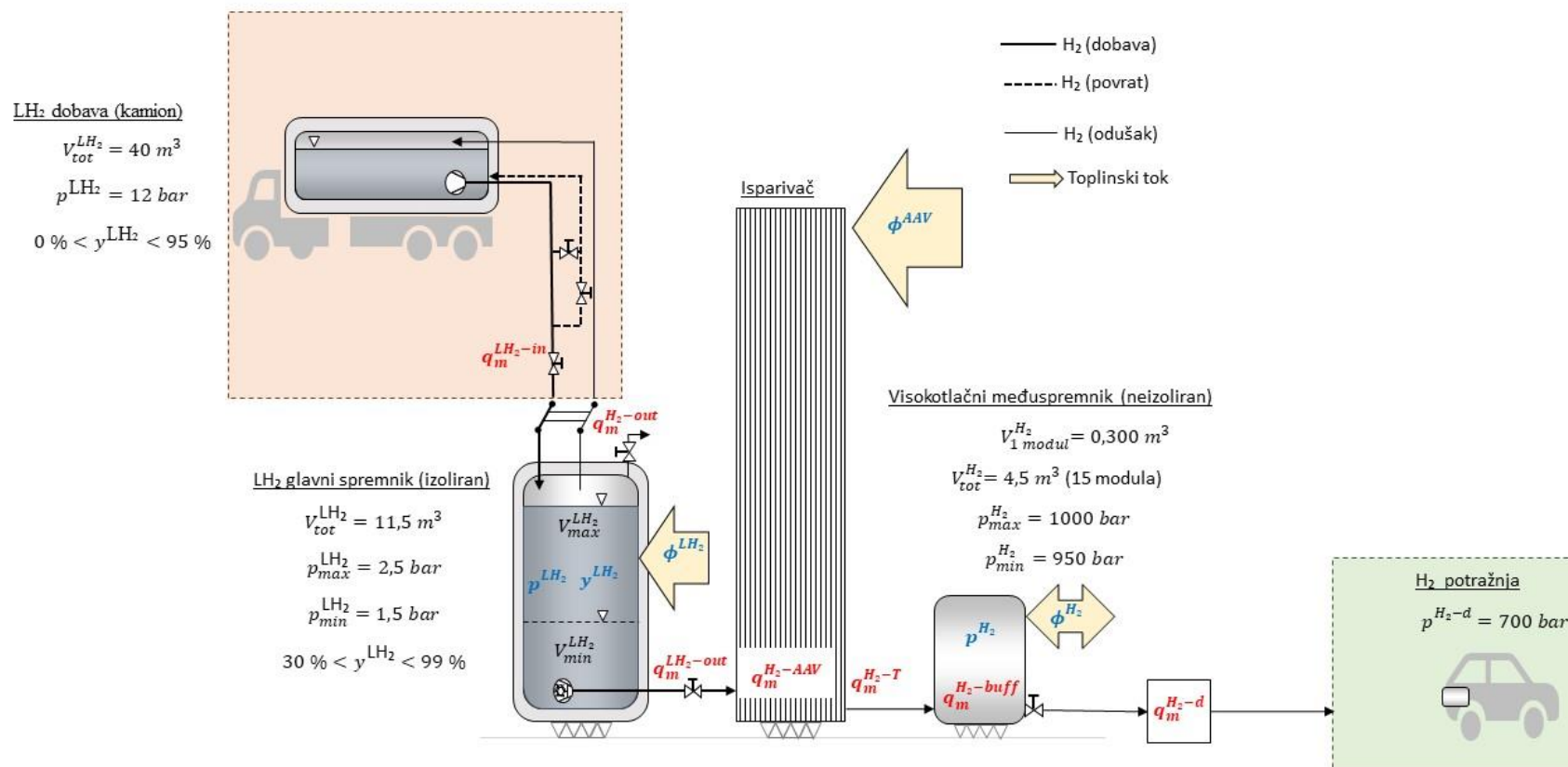
U 72. satu započinje maseni protok kapljevito vodika iz glavnog spremnika prema visokotlačnom međuspremniku protokom 0,01 kg/s i traje do 85. sata (Slika 5-19.). U ovom periodu tlak oscilira u rasponu od 1000 do 1250 bar. Maksimalna vrijednosti koju je dosegao tlak u visokotlačnom međuspremniku iznosi 1274 bar, a najniža na koju se spustio tijekom evakuacije iznosi 900 bar. Ulazni maseni protok kreće se u rasponu od 0 do 0,011 kg/s, a pri ventiliranju od 0 do -0,012 kg/s. Masa vodika kreće se u istom rasponu kao i u inicijalnoj simulaciji. Temperatura vodika na početku simulacije iznosi -4,7 °C te se kreće u rasponu od -31,5 do 58,4 °C. Povećanje debljine MLI za 40% u odnosu na inicijalnu simulaciju smanjuje

broj nadopuna glavnog spremnika sa 66 nadopuna godišnje na 51 nadopunu godišnje. U Tablica 5-3. sumirani su rezultati provedenih simulacija.

**Tablica 5-3.** Usporedba rezultata provedenih simulacija

	1. simulacija	2. simulacija	3. simulacija
Debljina MLI, [m]	0,4	0,48	0,56
Prosječni prodor toplinskog toka u glavni spremnik, [W]	37,85	32,49	28,63
Prosječno vrijeme između dvije nadopune glavnog spremnika, [h]	137	156,5	174,6
Broj nadopuna glavnog spremnika godišnje, [-]	66	57	51

5.3. Analiza rezultata za debljinu izolacije 56 cm pri konačnoj potražnji



Slika 5-20. Shema simulacije punionice vodika pri konačnoj potražnji

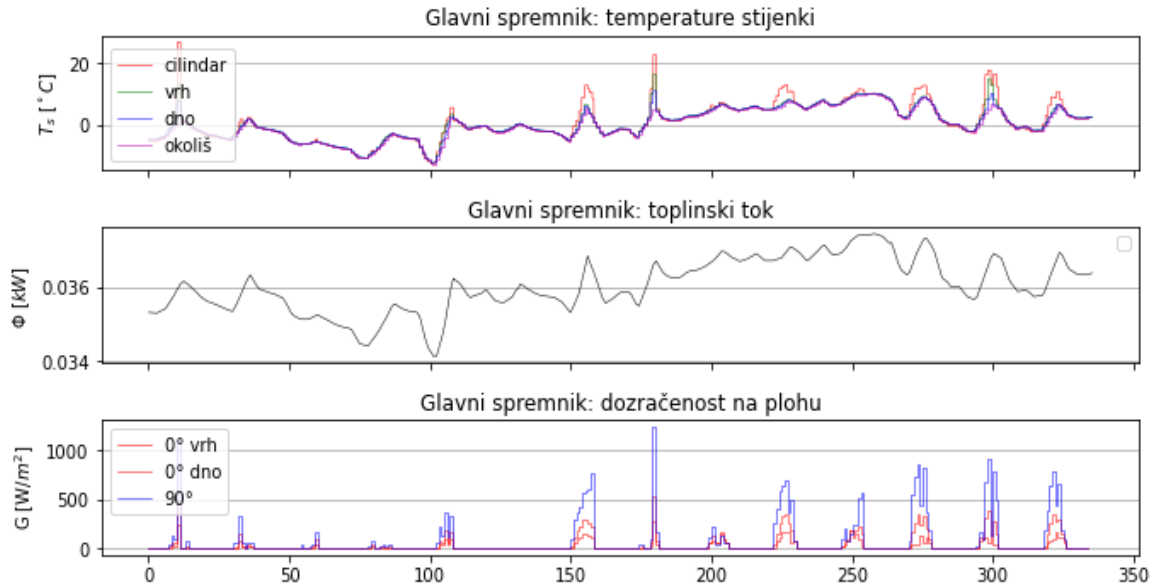
### *5.3.1. Modeliranje potražnje vodika*

U prijašnjim simulacijama, u periodima kada se visokotlačni međuspremnik ventilira, vodik se ispušta van u atmosferu. Pri modeliranju potražnje vodika, nasumičnim odabirom dodana su vozila koja se spajaju na dispenzer. Kada komercijalno vozilo sa spremnikom goriva dolazi na benzinsku postaju, spremnik je na određenoj razini zapunjenosti. Analogno tome, kada vozilo na vodikove gorivne čelije dođe na punionicu, ono je na određenoj razini zapunjenosti. Prilikom nasumičnog odabira vozila, odabire se zapunjenost spremnika vodika unutar vozila na način da se pretpostavi vrijednost tlaka unutar spremnika. Raspon tlaka unutar spremnika vozila kreće se od 20 do 700 bar. U vremenu od 8760 h, nasumičnim odabirom u programu Python određeni su tlakovi u spremniku vozila koja dolaze na punionicu. Volumen spremnika unutar vozila iznosi 122 L (Toyota, 2019). Vodik koji se u prethodnim simulacijama ispušta u atmosferu sada puni spremnik vozila. Simulacijom pri konačnoj potražnji računaju se tlak, temperatura, masa i gustoća vodika unutar spremnika vozila.

### *5.3.2. Analiza rezultata simulacije pri konačnoj potražnji unutar dva zimska tjedna*

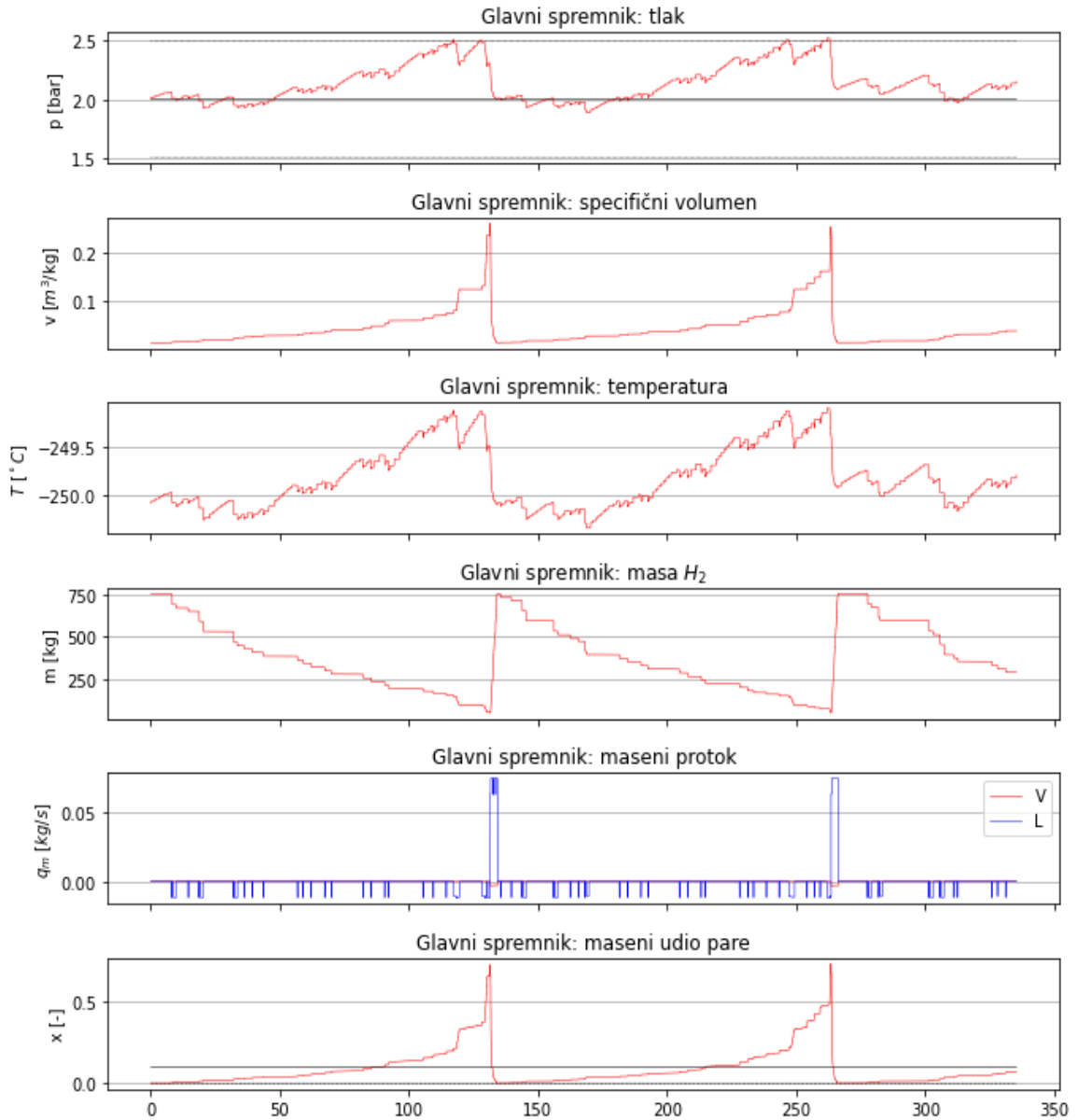
U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacije unutar dva zimska tjedna. Vremenski period od 0 do 336 h predstavlja prva dva tjedna u siječnju jer je nulti vremenski trenutak početak godine. Rezultati simulacije omogućuju vizualizaciju parametara unutar glavnog spremnika, međuspremnika, isparivača i vozila. Isti princip primijenjen je na analizu rezultata unutar dva ljetna tjedna u sljedećem poglavlju.





**Slika 5-21.** Toplinski tok i temperature stijenki glavnog spremnika

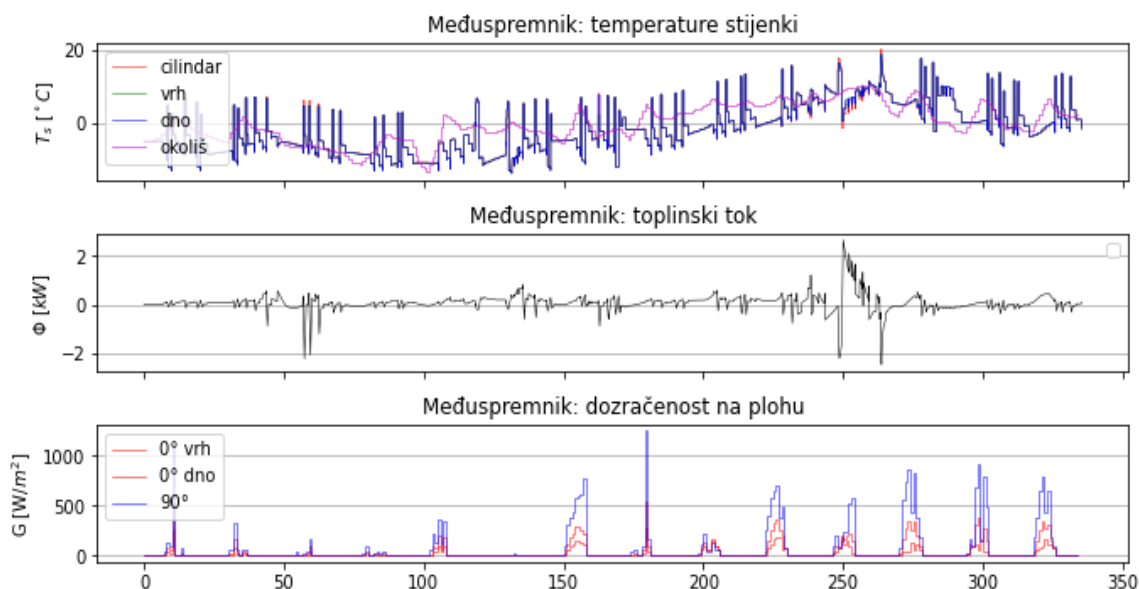
Iz grafova na Slika 5-21. vidljivi su toplinski tok i temperature stijenki glavnog spremnika s obzirom na dozračenost na plohu. Iz prvog grafa vidljivo je da temperature stijenki prate trend temperature okoliša i toplinskog toka. Pikovi na dijagramu temperatura stijenki izraženi su na cilindru glavnog spremnika i povezani su sa pikovima na dijagramu dozračenosti na plohu. Temperatura stijenke na cilindru kreće se u rasponu od  $-13$  °C do  $27$  °C, na vrhu od  $-12,6$  do  $16,5$  °C, a na dnu od  $-12,6$  do  $11$  °C. Prodor toplinskog toka u glavni spremnik kreće se u rasponu od  $34,1$  do  $37,5$  W.



**Slika 5-22.** Parametri unutar glavnog spremnika

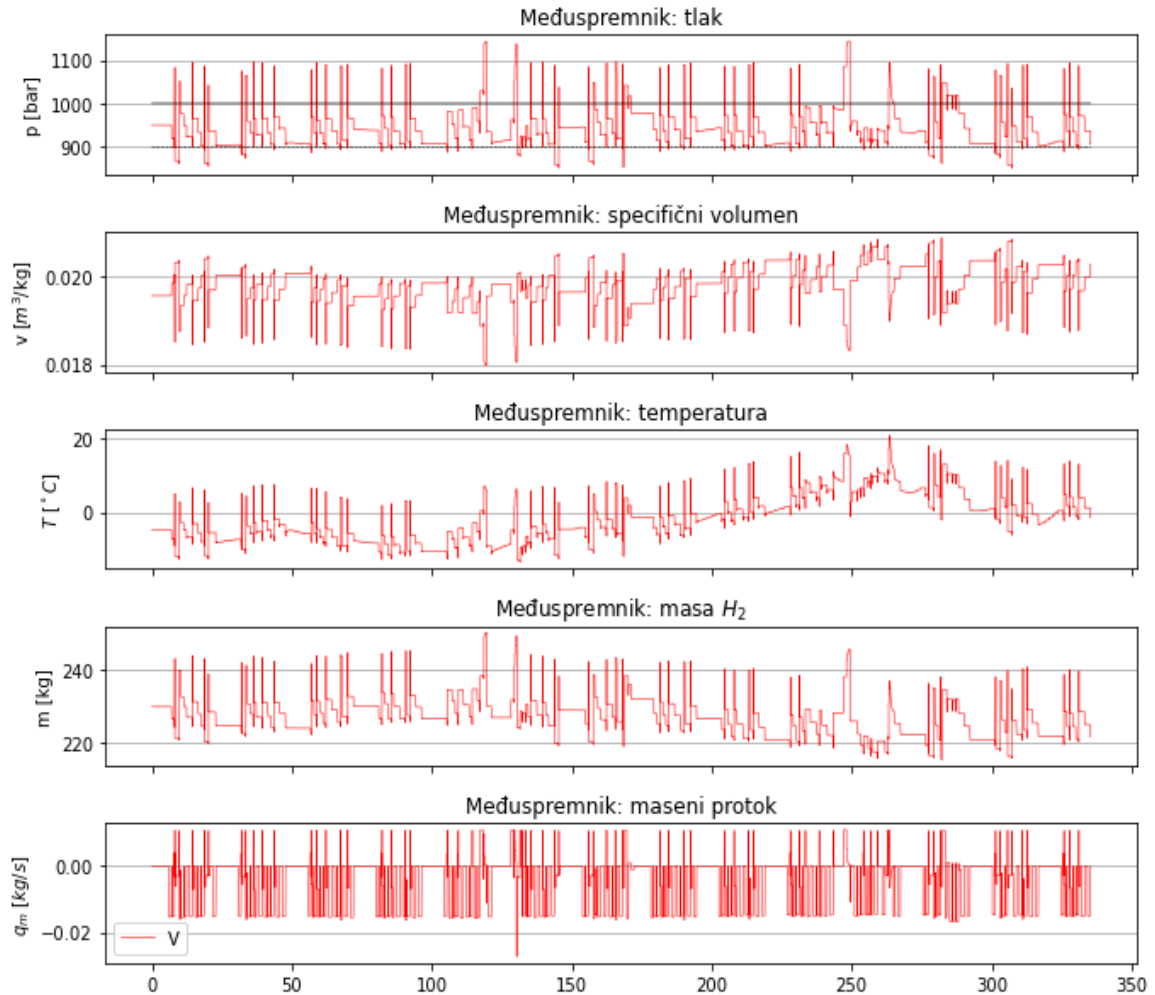
Na Slika 5-22. prikazani su parametri unutar glavnog spremnika. Iz grafa masenog udjela para vidljivo je da se maksimalni sadržaj pare doseže dva puta unutar 336 h. U 131. satu se prvi put dosegao maksimalni sadržaj pare. Drugo ventiliranje odvija se u 263. satu, stoga vrijeme proteklo između dva ventiliranja iznosi 132 h. potrebno je dva puta u dva zimska tjedna nadopuniti glavni spremnik novim ukapljenim vodikom. Na dijagramu masenog protoka može se vidjeti da je do 131. sata protok kapljevine u pojedinim trenucima negativan, što znači da je pumpa uključena i da kapljevine izlazi iz spremnika protokom 0,01 kg/s. Na međuspremniku je

regulacijski parametar (ventil) koji se uključuje kada tlak unutar međuspremnika padne ispod dozvoljene granice, što uzrokuje paljenje pumpe i protok kapljevine iz glavnog spremnika kako bi se regulirao tlak u međuspremniku. Na dijagramu tlaka vidljivo je da tlak raste uslijed povećanja sadržaja pare. Kada dosegne dozvoljenu granicu potrebno ga je ventilirati i nadopuniti novim ukapljenim vodikom. Spremnik se nadopunjuje protokom 0,07 kg/s. Temperatura unutar glavnog spremnika prati trend kretanja tlaka te se kreće u rasponu od -250,3 do -249,1 °C. Masa vodika na početku simulacije pri minimalnom sadržaju pare iznosi 761 kg. Na dijagramu mase vidljivo je da povećanjem sadržaja pare masa vodika naglo pada te pri maksimalnom sadržaju pare iznosi 44 kg.



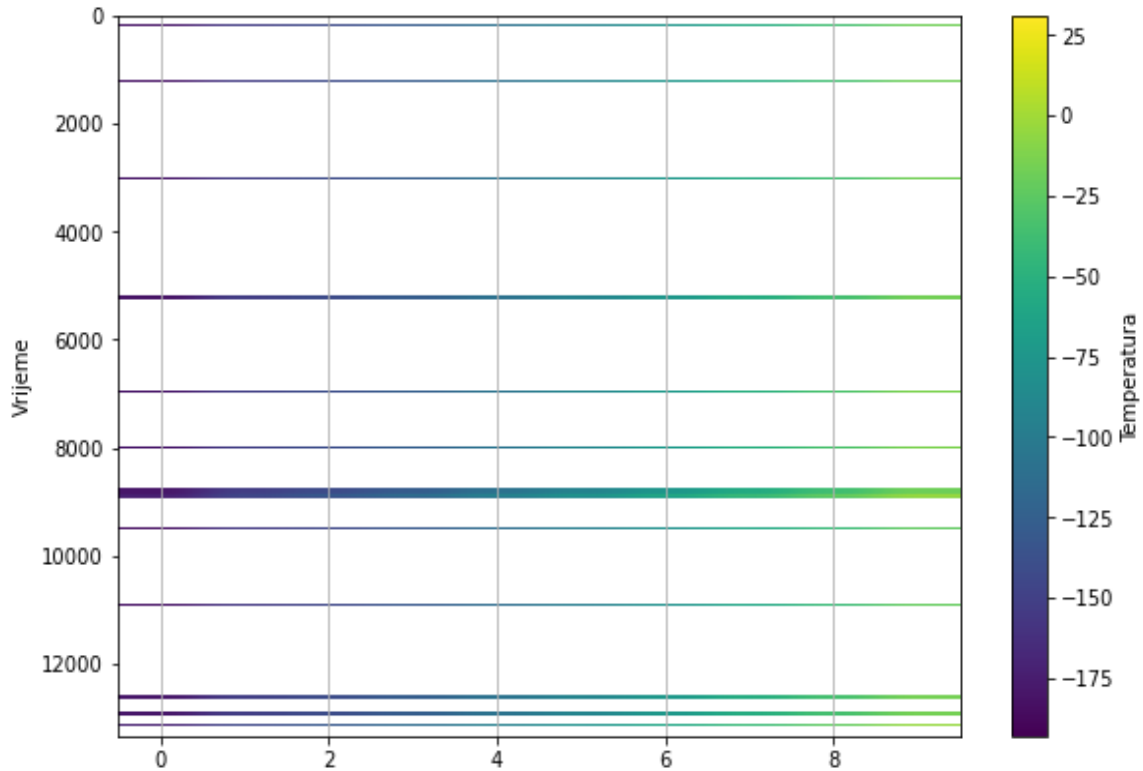
**Slika 5-23.** Toplinski tok i temperature stijenki visokotlačnog međuspremnika

Toplinski tok koji prodire u međuspremnik u dva zimsko prikazan je kao izmjena topline sa okolišem, a kreće se u rasponu od -2,5 do 2,7 kW. Može se primijetiti da temperature stijenki tijekom dva tjedna često osciliraju oko krivulje temperature okoliša i kreću se u rasponu od -13,5 do 18,7 °C.



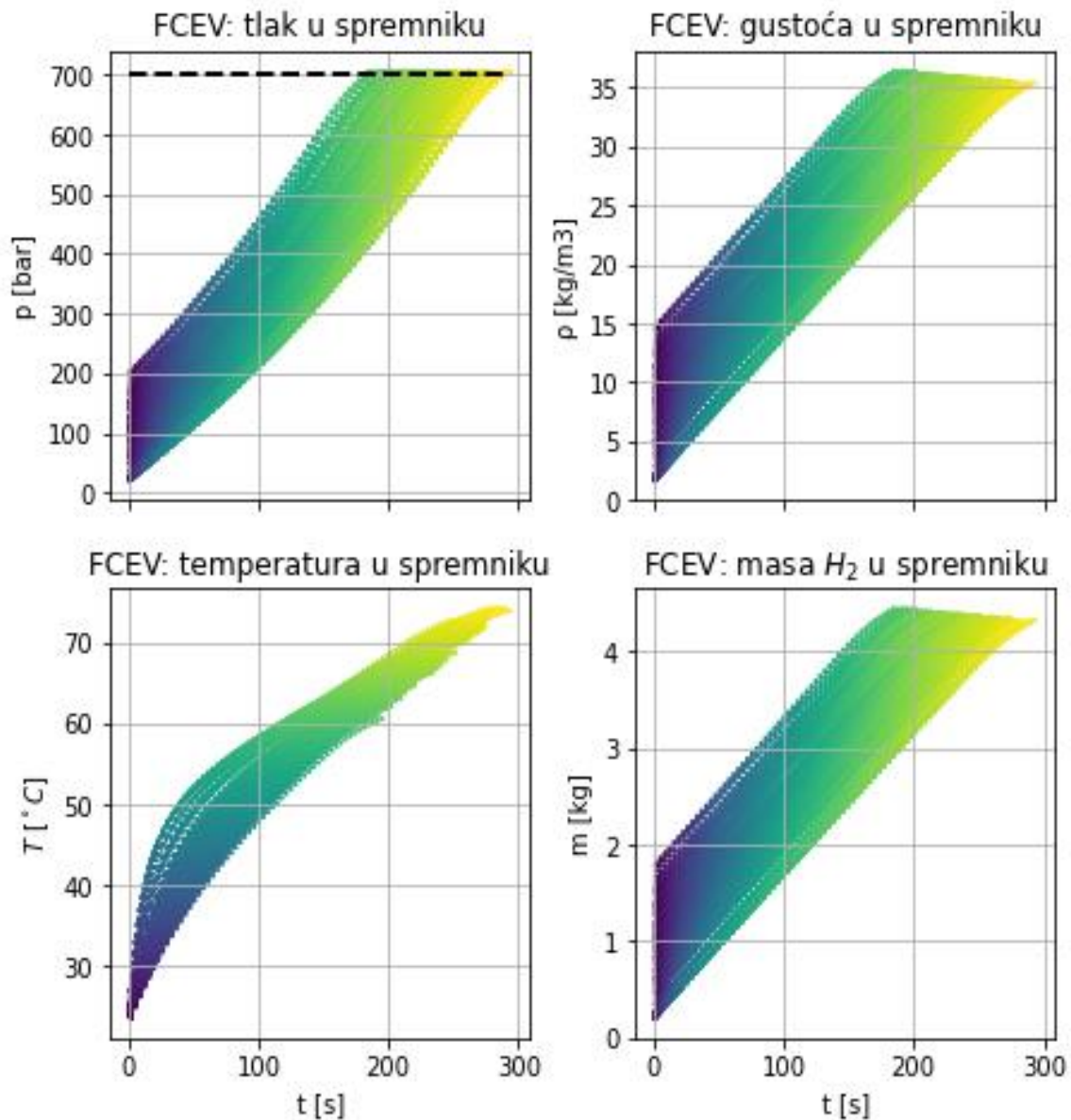
**Slika 5-24.** Parametri unutar visokotlačnog međuspremnika

Na Slika 5-24. prikazani su parametri unutar visokotlačnog međuspremnika. Maseni protok na razini međuspremnika je pozitivan kada vodik ulazi u njega, a negativan kada se evakuira. Iz dijagrama tlaka i masenog protoka može se vidjeti da tlak na početku simulacije prvo pada zbog evakuacije međuspremnika, a zatim raste jer se nadopunjava vodikom iz glavnog spremnika. Pikovi na dijagramu masenog protoka gusto su raspoređeni u negativnom području, što znači da se međuspremnik često evakuira. U dinamičnim uvjetima tijekom simulacije, međuspremnik je osjetljiv na promjenu tlaka uslijed masenog protoka te se često evakuira kako bi se regulirao tlak. Temperatura unutar međuspremnika prati trend tlaka i kreće se u rasponu od -13,5 do 20,7 °C. Masa vodika unutar međuspremnika ovisi o nadopuni i evakuaciji. Uslijed nadopune masa vodika raste, a uslijed evakuacije masa se smanjuje te kreće se u rasponu od 215,6 do 250,2 kg.



**Slika 5-25.** Profil temperature unutar isparivača

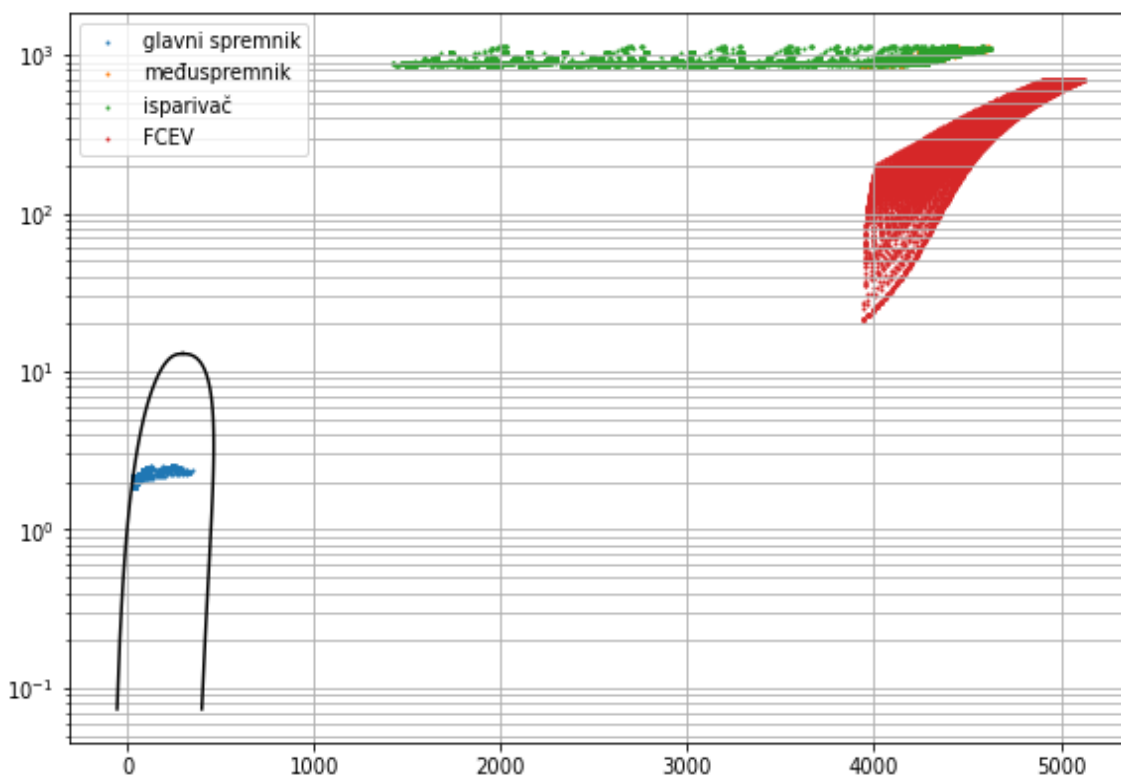
Uloga isparivača je podizanje tlaka vodiku uslijed izmjene topline sa okolinom prije ulaska u međuspremnik. Zbog velike duljine cijevi isparivača, potrebno ga je podijeliti na više segmenata kako bi se dobila točnija distribucija tlaka i temperature unutar isparivača i zbog točnijih rezultata na izlazu iz njega. Na profilu je vidljivo kretanje temperature vodika od ulaza do izlaza iz isparivača (Slika 5-25.). Za potrebe simulacije, isparivač je podijeljen na 10 segmenata. Minimalna ulazna temperatura vodika u isparivač iznosi  $-193,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Prolaskom kroz segmente isparivača, temperatura vodika raste. Maksimalna izlazna temperatura koju je vodik dosegao iznosi  $20,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Slika 5-26.** Parametri unutar vozila

Na Slika 5-26. prikazani su parametri zabilježeni tijekom punjenja vozila. Svako vozilo koje se priključi na punionicu na različitom je stupnju zapunjenosti, odnosno na različitoj vrijednosti tlaka unutar spremnika vozila. Raspon tlaka unutar spremnika vozila koja dolaze na punionicu kreće se od 20 do 200 bar. Simulacija punjenja vozila računa vrijeme koje je potrebno da se pojedino vozilo napuni, odnosno vrijeme potrebno da tlak unutar spremnika dosegne 700 bar, gustoću, temperaturu i masu vodika u spremniku. Iz dijagrama tlaka u spremniku može se vidjeti koliko je vremena potrebno da se vozilo napuni. Ako je maseni protok vodika iz dispnzera konstantan i volumen spremnika isti, vozilu koje je došlo na punionicu sa 20 bar u spremniku

potrebno je približno 300 s da se napuni do 700 bar, dok je vozilu koje je došlo sa 200 bar potrebno oko 180 s da se napuni. Na dijagramu temperature u spremniku može se vidjeti da temperatura u svakom vozilu na početku punjenja iznosi otprilike 20 °C. Vozilu kojem je potrebno 180 s da se napuni do 700 bar, temperatura u spremniku porasla je na oko 60 °C. Pri uvjetu od 700 bar i 60 °C, gustoća vodika iznosi oko 36,3 kg/m<sup>3</sup>, što je vidljivo na dijagramu gustoće. Vozilu kojem je potrebno 300 s da se napuni do 700 bar, temperatura u spremniku porasla je na oko 74 °C. Gustoća vodika pri 700 bar i 74 °C iznosi oko 35,2 kg/m<sup>3</sup>. U spremniku prvog vozila nalazi se 4,42 kg vodika, dok u spremniku drugog 4,3 kg. Razlika u masi vodika unutar spremnika navedenih vozila iznosi 0,12 kg.

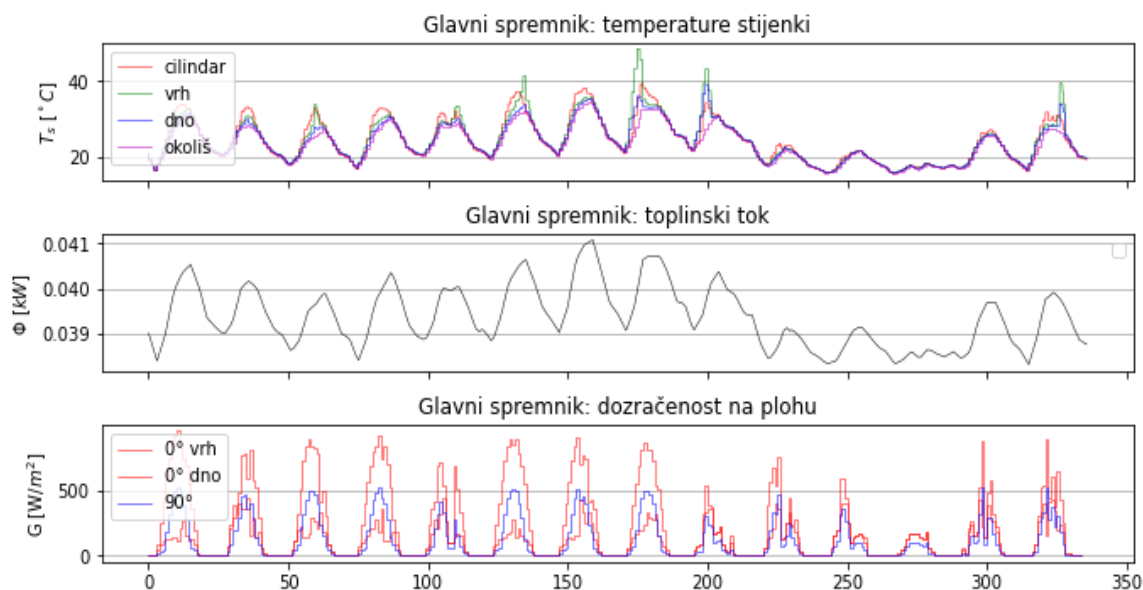


**Slika 5-27.** p-h dijagram

Dijagram na Slika 5-27. prikazuje pozicije termodinamičkih parametara unutar sustava. Iz dijagrama može se zaključiti da je glavni spremnik unutar dvofaznog područja, dok su visokotlačni međuspremnik, isparivač i vozilo u području nadkritičnog plina.

### 5.3.3. Analiza rezultata simulacije pri konačnoj potražnji unutar dva ljetna tjedna

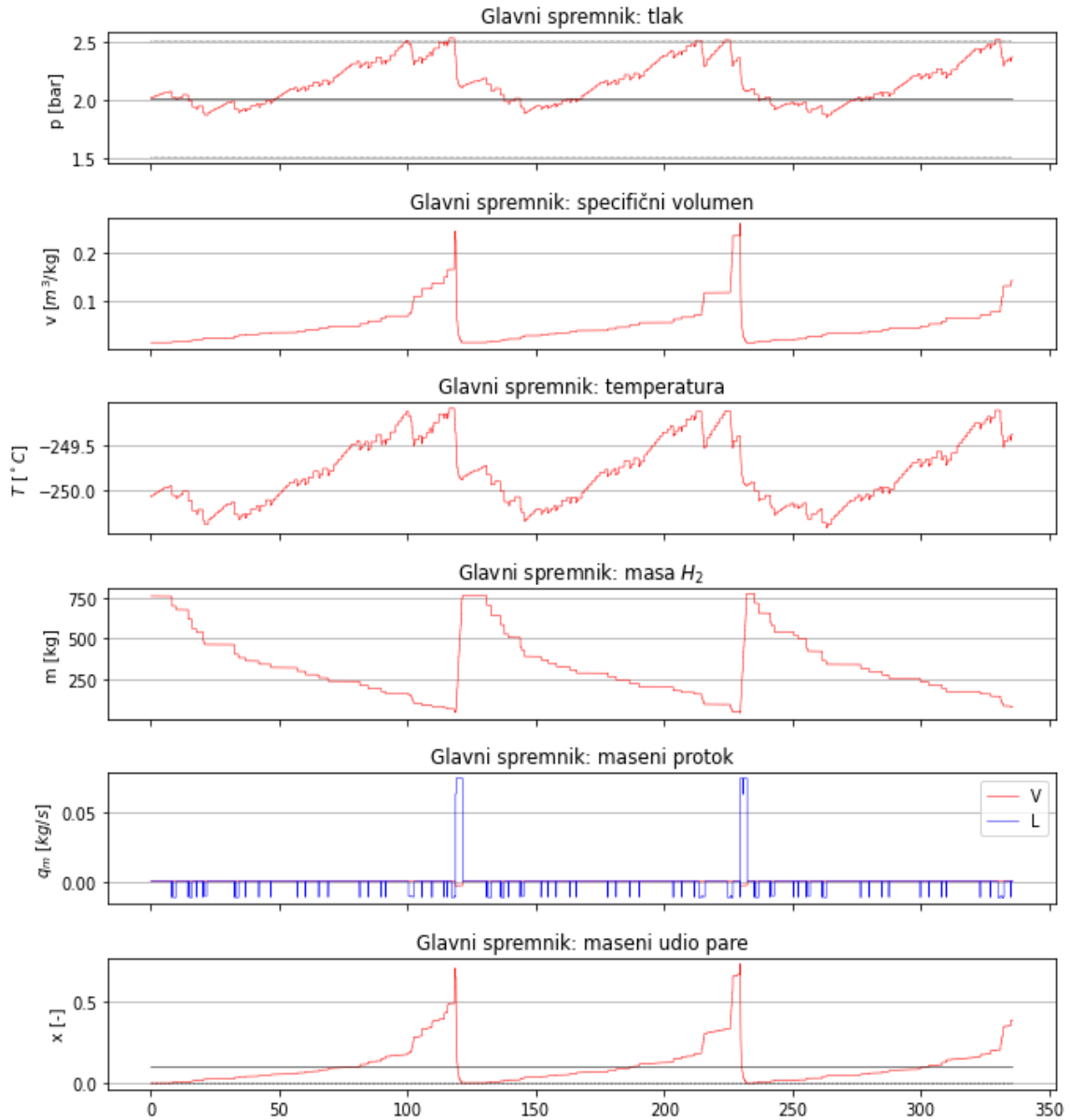
U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacije unutar dva ljetna tjedna. Vremenski period u simulaciji započinje od 4320. sata, što je ekvivalentno početku lipnja. Vrijeme na dijagramima započinje od 0 do 336 h jer se promatraju dva tjedna, a unutar simulacije potrebno je definirati pomicanje okolišnih uvjeta u vremenu.



**Slika 5-28.** Toplinski tok i temperature stijenki glavnog spremnika

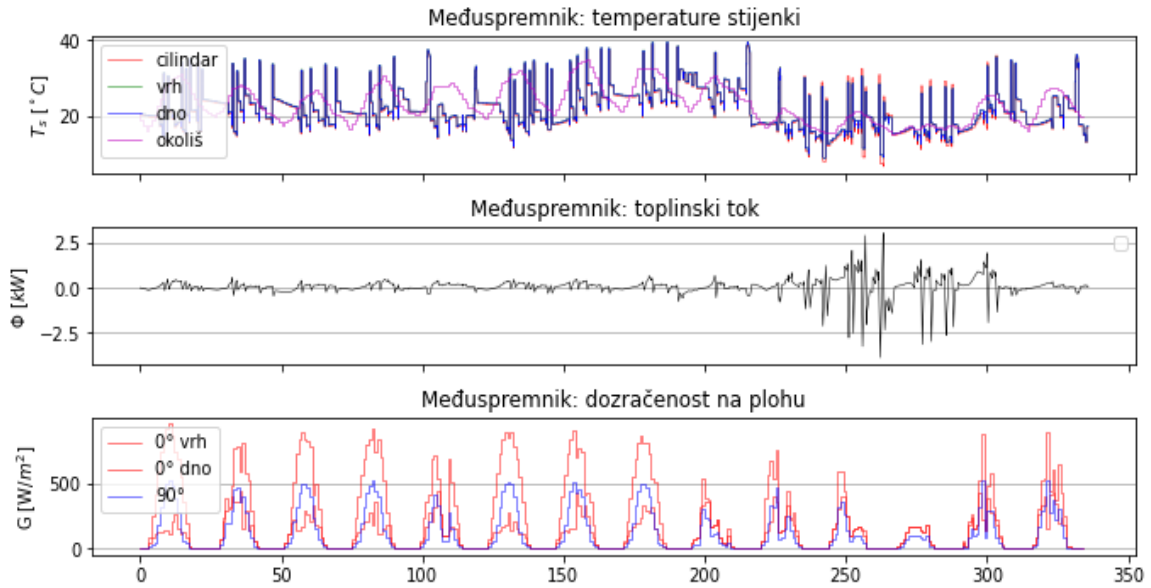
Toplinski tok koji prodire u glavni spremnik unutar dva ljetna tjedna kreće se u rasponu od 38,3 do 41,1 W (Slika 5-28.). Temperature stijenske na cilindru i dnu kreće se od 15,5 do 39 °C, a na vrhu spremnika odstupa te se kreće od 15,5 do 48,7 °C. Toplinski tok tijekom ljeta je prosječno za 3,9 W veći u odnosu na zimu. Temperature stijenki spremnika znatno su veće tijekom ljeta. Minimalna temperatura stijenki tijekom ljeta je za 28,3 °C veća u odnosu na zimu.





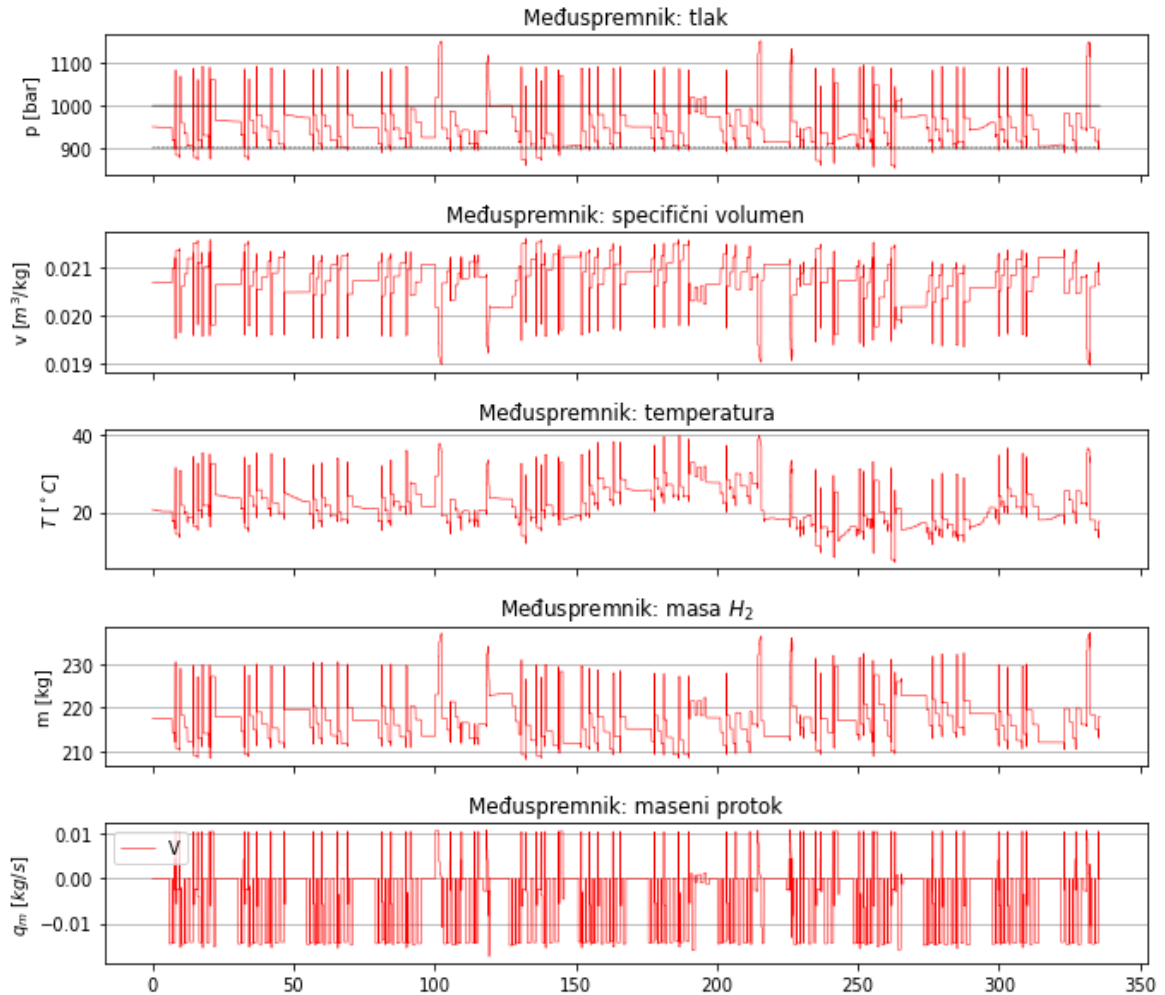
**Slika 5-29.** Parametri unutar glavnog spremnika

U ljetnom tjednu, maksimalni sadržaj pare dosegnut je prvi put u 118. satu, tada je potrebno ventilirati spremnik (Slika 5-29.). Drugo ventiliranje događa se u 229. satu, što znači da je od prošlog ventiliranja prošlo 111 sati. Ako se nastavi trend od 111 sati između pojedinih ventiliranja, u 340. satu bi došlo do trećeg ventiliranja, što je 4 sata dulje od promatranih 336 h. Stoga, u usporedbi sa zimom, može se zaključiti da je tijekom ljeta potrebno tri puta nadopuniti glavni spremnik novim ukapljenim vodikom. Vrijednosti ostalih parametara jednaki su kao i u zimskom tjednu.



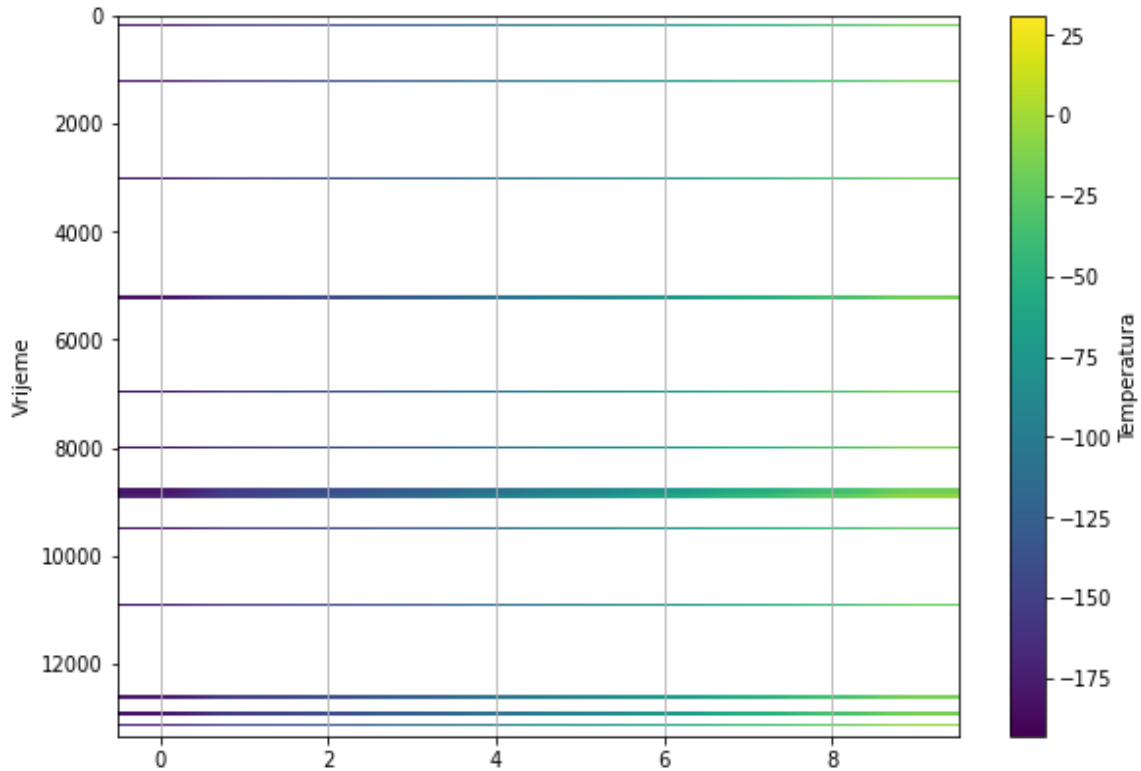
**Slika 5-30.** Toplinski tok i temperature stijenki visokotlačnog međuspremnika

Izmjena topline na razini visokotlačnog međuspremnika unutar dva ljetna tjedna kreće se u rasponu od -3,9 do 3 kW. Temperature stijenki na dnu i vrhu međuspremnika kreću se od 9,2 do 39,5 °C, na cilindru od 6,9 do 39 °C. Maksimalna temperatura stijenki je za oko 20 °C veća u odnosu na zimu.



**Slika 5-31.** Parametri unutar visokotlačnog međuspremnika

Na Slika 5-31. prikazani su parametri u visokotlačnom međuspremniku unutar dva ljetna tjedna. Najznačajnija razlika u odnosu na zimu je temperatura u međuspremniku. Temperatura vodika kreće se u rasponu od 7,1 do 39,8 °C. Masa vodika unutar međuspremnika kreće se u rasponu od 208 do 237,3 kg. Međuspremnik funkcionira na isti način kako je opisano u zimskom tjednu.



**Slika 5-32.** Profil temperature unutar isparivača

Na Slika 5-32. prikazan je profil temperature unutar isparivača tijekom dva ljetna tjedna. Minimalna temperatura na ulasku u isparivač iznosi  $-192,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a najviša na izlasku iznosi  $39,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Analiza rezultata unutar vozila tijekom ljeta identična je analizi u zimskom periodu.

#### 5.3.4. Procjena potrebe za punjenjem glavnog spremnika

U Tablica 5-4. sumirani su podatci o potrebi za punjenjem glavnog spremnika u ljetnom i zimskom periodu. Prosječna temperatura stijenke spremnika izračunata je s obzirom na sve tri vrijednosti (vrh, cilindar, dno).

**Tablica 5-4.** Procjena potrebe za punjenjem glavnog spremnika s obzirom na rezultate simulacije

	Ljeto	Zima
Toplinski tok [W]	38,3 – 41,1	34,1 – 37,5
Prosječna temperatura stijenke spremnika [°C]	15,5 – 43,9	-12,8 – 18,2
Vrijeme proteklo od početka simulacije do prvog ventiliranja spremnika [h]	118	131
Vrijeme proteklo između dva ventiliranja [h]	111	132
Procjena potrebe za punjenjem u dva tjedna [-]	3	2

Na temelju rezultata simulacije iz prethodna dva poglavlja, procijenjeno je da se glavni spremnik tijekom ljetnih mjeseci treba tri puta nadopuniti novim ukapljenim vodikom, a tijekom zimskih mjeseci dva puta. Usporedbom podataka sa podacima iz Tablica 5-3., trend od 3 nadopune unutar dva ljetna tjedna i 2 nadopune unutar dva zimska tjedna odgovara ukupnoj nadopuni u jednogodišnjoj simulaciji kada se ljetni trend primjeni na period od 4000 do 6000 h, a zimski trend na period od 0 do 2000 h, od 2000 do 4000 h i od 6000 do 8000 h.

## 6. ZAKLJUČAK

U prethodnim poglavljima napravljena je analiza rezultata jednogodišnje simulacije punionice vodika uz nultu potražnju vodika pri čemu se promatra samo rad punionice. Provedena je simulacija rada punionice vodika uz konačnu potražnju vodika pri čemu se promatra rad punionice i dinamika punjenja vozila te je napravljena analiza rezultata.

Analiza rezultata simulacije za promjenu debljine izolacije glavnog spremnika pri nultoj potražnji vodika pokazuje ovisnost broja nadopuna spremnika novim ukapljenim vodikom u godini dana za 3 različite debljine izolacije. Također, ova simulacija omogućuje vizualizaciju dinamike rada punionice i pojedinih komponenata sustava. Simulacija je pokazala da se broj nadopuna godišnje smanjio sa 66 na 51 kada se debljina izolacije spremnika povećala sa 40 cm na 56 cm. Na temelju analize rezultata za promjenu debljine izolacije, može se zaključiti da je potrebna velika debljina izolacije kako bi se smanjio prodor toplinskog toka u glavni spremnik i isparavanje kapljevine sveo na što manje moguću mjeru. Iz dinamike rada cjelokupne punionice, zaključuje se kako su pojedini dijelovi sustava veoma osjetljivi na promjene tlaka. Visokotlačni međuspremnik je osjetljiv na promjenu tlaka uslijed masenog protoka vodika iz glavnog spremnika prilikom regulacije tlaka u međuspremniku. Zbog toga često dolazi do evakuacije vodika iz međuspremnika zbog naglog porasta tlaka uslijed nadopune. S obzirom da se vodik prilikom evakuacije iz međuspremnika ispušta u okolinu, vozila bi se često trebala priključivati na punionicu kako bi se punila i gubitak vodika u okolinu sveo na minimum.

Analiza rezultata simulacije pri konačnoj potražnji vodika omogućuje procjenu potrebe za punjenjem glavnog spremnika unutar dva zimska i dva ljetna tjedna te omogućuje vizualizaciju dinamike punjenja vozila. Rezultati su pokazali da je tijekom ljetnih mjeseci potrebno tri puta unutar dva tjedna nadopuniti glavni spremnik novim ukapljenim vodikom, a 2 puta tijekom zimskih mjeseci. Dinamika punjenja vozila pokazala je da se vozilo koje stigne na punionicu na razini zapunjenosti od 200 bar napuni do 700 bar za 180 s, dok se vozilo koje stigne na punionicu na razini zapunjenosti od 200 bar napuni za 300 s. Pri istom volumenu spremnika vozila i masenom protoku vodika, analizom rezultata pokazalo se da je masa vodika unutar vozila koje se punilo 180 s manja za 0,12 kg u odnosu na vozilo koje se punilo 300 s.

## 7. POPIS LITERATURE

1. ASSAEL, M. J., ASSAEL, J.-A. M., HUBER, M. L., PERKINS, R. A., TAKATA, Y., 2011. Correlation of the Thermal Conductivity of Normal and Parahydrogen from the Triple Point to 1000 K and up to 100 Mpa. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 40(3):033101–1:13, 2011. doi:10.1063/1.3606499
2. BELL, I.H., WRONSKI, J., QUOILIN, S., LEMORT, V., 2014. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014, 53, 6, 2498–2508, DOI: doi.org/10.1021/ie4033999
3. BERGMAN T. L., LAVINE A. S., INCROPERA F. P., DEWITT D. P., 2011. *Introduction to Heat Transfer*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
4. BUDIN., R., BOGDANIĆ A. 2012. *Osnove tehničke termodinamike*. 3. izdanje. Zagreb: Školska knjiga.
5. CENGLEL, Y., BOLES, M. 2014. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 8. izdanje. Boston, Massachusetts: McGraw-Hill.
6. CHEN, J., VEENSTRA, M., PUREWAL, J., HOBEIN, B., PAPASAVVA, S. 2018. *Modeling a hydrogen pressure regulator in a fuel cell system with JouleThomson effect*. *International journal of hydrogen energy*, 44(2), pp.1272-1287.
7. DECKER, L. 2019. *Liquid hydrogen distribution technology*. Brussels: HYPER Closing Seminar.
8. EUROPEAN COMMISSION. 2019. *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal*. Brussels, COM(2019) 640.
9. EUROPEAN COMMISSION. 2020. *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Brussels, COM(2020) 301.
10. GORIČNIK, B. 2006. *Termodinamika ugljikovodika*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet, skripta.

11. HORBANIUC, B., D. 2004. *Refrigeration and Air-Conditioning*. Encyclopedia of Energy, p. 261-289.
12. HUANG, Y., WANG, B., ZHOU, S., WU, J., LEI, G., LI, P., SUN, P. 2017. Modeling and experimental study on combination of foam and variable density multilayer insulation for cryogen storage. *Energy*, 123, p. 487-498.
13. HULD, T., MUELLER, R., GAMBARDELLA, A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, 86, 1803-1815
14. HYDROGEN EUROPE. 2019. *Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition*. Luxemburg: Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking.
15. HYDROGEN MOBILITY EUROPE, 2021. *Emerging Conclusions*. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking.
16. KUROKI, T., NAGASAWA, K., PETERS, M., LEIGHTON, D., KURTZ, J., SAKODA, N., MONDE, M., TAKATA, Y. 2021. Thermodynamic modeling of hydrogen fueling process from high-pressure storage tank to vehicle tank. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(42), 22004-22017.
17. LEACHMAN, J.W., JACOBSEN, R.T., PENONCELLO S.G., and LEMMON E.W., 2009. Fundamental Equations of State for Parahydrogen, Normal Hydrogen, and Orthohydrogen. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 38(3):721–748, 2009. doi:10.1063/1.3160306.
18. LINDE ENGLINEERING, 2021. *IC90/30 Ionic compressor: Compressor module for gaseous hydrogen refueling station*. Datasheet.
19. LINDE ENGLINEERING, 2021. *Tomorrow 's fuel today*. Linde H<sub>2</sub> refueling technologies.
20. LINDE ENGLINEERING. 2021. *Cryogenic Standard Tanks*. The Linde standard tanks.
21. MATIĆ, Z. 2007. *Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske – Priručnik za energetska korištenje Sunčevog zračenja*. Zagreb: Energetski Institut Hrvoje Požar.
22. MCFARLAND, C., AGARWAL, R.K., 2022. *A Simple Model of Thermal Insulation Design for Cryogenic Liquid Hydrogen Tank*. Mechanical Engineering and Materials Science Independent Study, 176.



23. MENEZES, M.W., SIMMONS, D.R., WINBERG, S., BARANWAL, R., HOFFMAN, P., FALL, C. AND GENTAOWSKI, S.L. 2020. *Hydrogen Program Plan*. The US Department of Energy: Washington, DC.
24. MINISTARSTVO ZAŠTITE OKOLIŠA I ENERGETIKE, 2019. *Integrirani nacionalni energetska i klimatski plan za Republiku Hrvatsku za razdoblje od 2021. do 2030. godine*. Zagreb.
25. MORAN, M., J., SHAPIRO, H., N., 2006. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 5th edition, p. 147.
26. MUZNY C.D., HUBER, M.L., and KAZAKOV, A.F., 2013. „Correlation for the viscosity of normal hydrogen obtained from symbolic regression. J. Chem. Eng. Data“, 2013. doi:10.1021/je301273
27. NARODNE NOVINE, br. 40/2022 (492). *Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine*. Zagreb: Narodne novine d.d.
28. REDDI, K., ELGOWAINY, A., RUSTAGI, N., GUPTA, E. 2017. *Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles*. International Journal of Hydrogen Energy, 42(26), 16675-16685.
29. STEELHEAD COMPOSITES, 2022. *Lightweight Hydrogen Storage*. Brochure.
30. SUN, B., WADNERKAR D., UTIKAR, R.P., TADE, M., KAVANAGH, N., FAKA, S., EVANS, G.M., PAREEK, V.K. 2018. *Modeling of Cryogenic Liquefied Natural Gas Ambient Air Vaporizers*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 57(28), 9281-9291.
31. SUTHEESH, P.M., CHOLLACKAL, A. 2018. *Thermal performance of multilayer insulation: a review*. Materials Science and Engineering, 396, 012061.
32. TOYOTA, 2019. *Mirai Product Information*. Brochure.
33. VERNE, J. 1875. *The Mysterious Island*. Francuska: Hetzel.

Web izvori:

34. AGSI, 2022. Remit storage data. URL: <https://agsi.gie.eu/> (10.6.2022.)
35. AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 2020. Molecule of the week archive: Hydrogen. URL: <https://www.acs.org/content/acs/en/molecule-oftheweek/archive/h/hydrogen.html> (13.6.2022.)


36. BRITANNICA, 2022. Second law of thermodynamics. URL: <https://www.britannica.com/science/second-law-of-thermodynamics> (13.6.2022.)
37. BRUCH, C. 2022. What hydrogen and the global energy transition mean for industry in 2022. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2022/01/hydrogen-energy-transition-climate-change/> (6.10.2022.)
38. CEGH. 2022. Market data. URL: <https://www.cegh.at/en/exchange-market/market-data/> (10.6.2022.)
39. COOLPROP, 2022. Welcome to CoolProp. URL: <http://www.coolprop.org/> (13.6.2022.)
40. CRYONORM, 2022. Ambient Air Heated Vaporizer. URL: <https://cryonorm.com/air-gases/vaporizers/ambient-air-heated-vaporizer/> (21.6.2022.)
41. ENERGY EDUCATION, 2017. Molecular hydrogen. URL: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Molecular\\_hydrogen](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Molecular_hydrogen) (13.6.2022.)
42. ENGLINEERS EDGE, 2022. Critical point - thermodynamics. URL: [https://www.englineersedge.com/thermodynamics/critical\\_point.htm](https://www.englineersedge.com/thermodynamics/critical_point.htm) (13.6.2022.)
43. EUROPEAN ALTERNATIVE FUELS OBSERVATORY, 2022. Infrastructure. URL: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27/infrastructure> (13.6.2022.)
44. EUROSTAT. 2020. Energy balance flow for EU\_27\_2020. URL: <https://ec.europa.eu/> (10.6.2022.)
45. FLEMING, P. 2022. The Joule-Thomson Effect. URL: <https://chem.libretexts.org/> (13.7.2022.)
46. HYDROGEN TOOLS. Hydrogen compared with other fuels. URL: <https://h2tools.org/hydrogen-compared-other-fuels> (13.6.2022.)
47. HYDROGEN TOOLS. Liquid storage vessels. URL: <https://h2tools.org/bestpractices/liquid-storage-vessels> (21.6.2022.)
48. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021. Hydrogen. URL: <https://www.iea.org/reports/hydrogen> (13.6.2022.)
49. JOLLY, W. E. 2020. Hydrogen. Encyclopedia Britannica. URL: <https://www.britannica.com/science/hydrogen> (13.6.2020.)

50. KEMFERT, C. 2019. Green Deal for Europe: More Climate Protection and Fewer Fossil Fuel Wars. URL: <https://www.intereconomics.eu/> (10.6.2022.)
51. LINDE ENGLINEERING, 2022. Highly efficient, reliable and safe hydrogen refueling technologies. URL: <https://www.linde-engineering.com/en/plant-components/hydrogen-refueling-technologies/index.html> (14.6.2022.)
52. LINDE ENGLINEERING, 2022. Power boost for fueling stations with liquid H<sub>2</sub>. URL: <https://www.linde-engineering.com/en/about-linde-engineering/success-stories/power-boost-for-liquid-hydrogen.html> (13.6.2022.)
53. MOLLOY, P. 2019. Run on less with hydrogen fuel cells. URL: <https://rmi.org/run-on-less-with-hydrogen-fuel-cells/> (13.6.2022.)
54. NAKANO, J. 2021. Japan's Hydrogen Industrial Strategy. URL: <https://www.csis.org/analysis/japans-hydrogen-industrial-strategy> (13.6.2022.)
55. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2016. Solar radiation and the Earth system. URL: <https://web.archive.org/> (18.6.2022.)
56. NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2022. H<sub>2</sub>Fills: Hydrogen Filling Simulation. URL: <https://www.nrel.gov/hydrogen/h2fills.html> (14.6.2022.)
57. POLYPROCESSING, 2018. How to Make Sure Your Tank's Walls Are Thick Enough. URL: <https://blog.polyprocessing.com/blog/tank-wall-thickness> (21.6.2022.)
58. PR NEWS WIRE, 2022. China Hydrogen Manufacturing and Hydrogen Refueling Station Markets Research Report 2021: It is Expected that 1,000 Stations will be Built by 2030. URL: <https://www.prnewswire.com/> (13.6.2022.)
59. PUB CHEM, 2022. Hydrogen. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Hydrogen> (13.6.2022.)
60. PYTHON™, 2022. Getting started. URL: <https://www.python.org/about/> (13.6.2022.)
61. RITCHIE, H., ROSER M. 2020. Energy. URL: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels> (10.6.2022.)
62. STAINLESS STRUCTURALS, 2019. Comparing the Thermal Conductivity of Stainless Steel to other Metals. URL: <https://www.stainless-structurals.com/blog/comparing-the-thermal-conductivity-of-stainless-steel-to-other-metals/> (21.6.2022.)

63. STATISTA, 2022. Number of hydrogen fueling stations for road vehicles worldwide as of 2021, by country. URL: <https://www.statista.com/statistics/1026719/number-of-hydrogen-fuel-stations-by-country/> (13.6.2022.)
64. STEELHEAD COMPOSITES, 2022. Hydrogen Cube™ Large-Volume Integrated Storage Systems. URL: <https://steelheadcomposites.com/hydrogen-storage/> (21.6.2022.)
65. THE ENGLINEERING TOOLBOX, 2022. Chemical, physical and thermal properties of hydrogen - H<sub>2</sub>. URL: [https://www.englineeringtoolbox.com/hydrogen-d\\_1419.html](https://www.englineeringtoolbox.com/hydrogen-d_1419.html) (13.6.2022.)
66. THE ENGLINEERING TOOLBOX, 2022. Triple point. URL: [https://www.englineeringtoolbox.com/triple-point-d\\_1926.html](https://www.englineeringtoolbox.com/triple-point-d_1926.html) (13.6.2022.)
67. THERMTEST, 2021. Thermal Conductivity of Steel. URL: <https://thermtest.com/thermal-conductivity-of-steel> (21.6.2022.)
68. TRADING ECONOMICS. 2022. Crude oil. URL: <https://tradingeconomics.com/commodity/crude-oil> (10.6.2022.)
69. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Hydrogen Storage. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> (13.6.2022.)
70. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Solar Radiation Basics. URL: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-radiation-basics> (18.6.2022.)
71. UNDERSTANDING GLOBAL CHANGE, 2022. Absorption / reflection of sunlight. URL: <https://ugc.berkeley.edu/background-content/reflection-absorption-sunlight/> (18.6.2022.)
72. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Heat values of various fuels. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx> (13.6.2022.)

## IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad pod nazivom „Modeliranje i parametrizacija rada punionice vodika“ izradio samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



---

Antun Bošnjak



KLASA: 602-01/22-01/181  
URBROJ: 251-70-12-22-2  
U Zagrebu, 15.09.2022.

**Antun Bošnjak, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/181, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 15.09.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### MODELIRANJE I PARAMETRIZACIJA RADA PUNIONICE VODIKA

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Izv.prof.dr.sc. Luka Perković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)