

Računalna simulacija hlađenja baterijskog modula električnog vozila

Oremović, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:103224>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Oremović

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Dr. sc. Severino Krizmanić, dipl. ing.

Student:

Ivan Oremović

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru profesoru dr.sc. Severinu Krizmaniću, te voditelju AVL Cruise M „Flow“ tima Mariu Jeloviću na pomoći i uloženom trudu i vremenu pri izradi ovog rada. Također se želim zahvaliti obitelji i prijateljima na podršci tijekom cijelog studiranja.

Ivan Oremović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomatske ispite
Povjerenstvo za diplomatske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Oremović** JMBAG: 0035209432

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Računalna simulacija hlađenja baterijskog modula električnog vozila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical simulation of electric vehicle battery module cooling**

Opis zadatka:

Rast ekološke svijesti u posljednjih nekoliko godina doveo je autoindustriju na prijelaz s pogona motorima s unutarnjim izgaranjem na elektromotorne pogone. Baterijski podsustavi elektromotornih pogona predstavljaju jedan od najvećih problema adaptacije električnih vozila, zbog količine pohranjene energije, vremena punjenja, starenja baterije i sigurnosti vozila. Sustav hlađenja baterija igra bitnu ulogu u navedenim problemima, pa su tako i optimalne izvedbe njegovih podsustava predmet intenzivnog razvoja.

U sklopu razvoja vozila s električnim pogonom, u ovom je radu potrebno provesti računalnu simulaciju hlađenja njegova baterijskog modula.

U sklopu rada potrebno je:

- opisati objekt simulacije zadan skicama idejnih rješenja, dijelove sustava hlađenja i njihove karakteristike;
- izraditi proračunske modele objekta simulacije, te prema potrebi uvesti pojednostavljenja;
- obaviti sve postupke računalnog proračuna: prostorna diskretizacija modela, odabir i podešavanje numeričkog postupka, post-procesiranje rješenja.

Rad treba sadržavati:

- uvod;
- opis problema i metoda primijenjenih za njihovo rješavanje;
- odgovarajuće prikaze dobivenih rezultata i osvrt na rezultate;
- zaključke.

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

Zadatak zadan:

30. rujna 2021.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Severino Krizmanić

Datum predaje rada:

2. prosinca 2021.

Predviđeni datumi obrane:

13. – 17. prosinca 2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. BATERIJSKI PAKET ELEKTRIČNIH VOZILA.....	2
3. TEORIJSKE OSNOVE	13
4. NUMERIČKA SIMULACIJA HLAĐENJA BATERIJSKOG MODULA	22
5. REZULTATI	38
6. ZAKLJUČAK.....	51

POPIS SLIKA

Slika 1. Geometrijski oblici baterijskih ćelija električnih vozila	2
Slika 2. Baterijska ćelija.....	3
Slika 3. Performanse baterijskih ćelija u ovisnosti o temperaturi	4
Slika 4. Baterijski modul	5
Slika 5. Baterijski modul sa rashladnom pločom.....	6
Slika 6. Rashladni krug električnog vozila.....	7
Slika 7. Baterijski modul sa aluminijskim rashladnim pločama unutar modula	7
Slika 8. Baterijski modul sa rashladnim pločama unutar modula	8
Slika 9. Gustoća rashladne tekućine u ovisnosti o temperaturi.....	9
Slika 10. Toplinska provodnost rashladne tekućine u ovisnosti o temperaturi	9
Slika 11. Specifični toplinski kapacitet rashladne tekućine u ovisnosti o temperaturi	10
Slika 12. Baterijski paket električnog vozila.....	11
Slika 13. Električni raspored	16
Slika 14. Diskretizirani proračunski prostor	17
Slika 15. Toplinski tok kroz površine proračunske ćelije	18
Slika 16. Kondukcija između susjednih ćelija	18
Slika 17. Konvekcijski prijenos topline	19
Slika 18. Prikaz diskretiziranog baterijskog modula.....	21
Slika 19. Simulacijski model hlađenja baterijskog modula (konfiguracija 1)	22
Slika 20. Baterijski modul (konfiguracija 1).....	24
Slika 21. Definiranje ćelija kućišta baterijskog modula.....	26
Slika 22. Rashladna cijev	27
Slika 23. Baterijski modul i rashladna ploča (konfiguracija 2).....	28
Slika 24. Simulacijski model (konfiguracija 2).....	29
Slika 25. Baterijski modul i rashladne ploče (konfiguracija 3).....	30
Slika 26. Simulacijski model (konfiguracija 3).....	31
Slika 27. Rashladne ploče (konfiguracija 3)	31
Slika 28. Simulacijski model rashladnog kruga	33
Slika 29. Geometrija komponente hladnjak	34
Slika 30. Smjer strujanja rashladne tekućine u hladnjaku.....	34
Slika 31. Simulacijski model isparivača	35
Slika 32. Toplinski tok isparivača	36
Slika 33. Simulacijski model grijača.....	36
Slika 34. Struja u bateriji pri stvarnom ciklusu vožnje	37
Slika 35. Temperaturna raspodjela na baterijskom modulu, konfiguracija 1.....	38
Slika 36. Temperaturna baterijskih ćelija.....	39
Slika 37. Raspodjela temperatura na baterijskom "stack-u" pri protocima rashladne tekućine od 0.005, 0.01 i 0.02 kg/s	40
Slika 38. Temperatura rashladne tekućine u ovisnosti o protoku	41
Slika 39. Struja i stanje napunjenosti baterije	42
Slika 40. Temperatura prednje plohe „stack-a“ na završetku simulacije.....	43
Slika 41. Temperaturna raspodjela na baterijskom modulu, konfiguracija 2.....	44
Slika 42. Temperatura rashladne tekućine	44
Slika 43. Raspodjela temperature na baterijskom modulu, konfiguracija 3.....	45
Slika 44. Temperatura rashladne tekućine, konfiguracija 3	46
Slika 45. Usporedba temperaturne raspodjele pri prikazanim konfiguracijama	46
Slika 46. Temperatura baterijskih ćelija bez sustava hlađenja.....	48
Slika 47. Temperatura baterijskih ćelija uz uključen rashladni krug	49

Slika 48. Temperatura rashladne tekućine	49
Slika 49. Stanje napunjenosti baterije	50

POPIS TABLICA

Tablica 1. Specifikacije referentne baterijske ćelije.....	3
Tablica 2. Specifikacije referentnog električnog vozila.....	11
Tablica 3. Svojstva materijala korištenih u baterijskom modulu	25
Tablica 4. Kontaktni otpor	25
Tablica 5. Protok mase rashladne tekućine	28
Tablica 6. Opis geometrije hladnjaka.....	35
Tablica 7. Temperature baterijskih ćelija u ovisnosti o protoku	40
Tablica 8. Usporedba temperatura pri prikazanim konfiguracijama.....	47

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	[m ²]	referentna površina
A_{x+}	[m ²]	površina dodira ćelija
C_C	[-]	toplinski kontaktni koeficijent
D_n	[kg/s]	jačina difuzije
ΔE_k	[J]	promjena kinetičke energije
ΔE_p	[J]	promjena potencijalne energije
F_{HT}	[-]	multiplikator prijenosa topline
F_t	[-]	faktor pada tlaka
f_i	[N/kg]	komponente vektora specifične masene sile
I_j	[A]	struja koja ulazi u čvor
J_i	[-]	vektor fluksa fizikalne veličine
k	[J/kg]	kinetička energija turbulencije
m_{ijk}	[kg]	masa proračunske ćelije
P	[W]	snaga
p	[N/m ²]	tlak
\bar{p}	[N/m ²]	statistički osrednjeno polje tlaka
p_{kin}	[m ² /s ²]	kinematički tlak
Re	[-]	Reynoldsov broj
R_j	[Ω]	otpor u grani
R_C	[Ω]	otpor spoja
R_i	[K/W]	toplinski otpor
T_{ijk}	[K]	temperatura proračunske ćelije
U_N	[V]	napon na priključni čvor
U_j	[V]	napon ćelije
V	[m ³]	volumen
v_i	[m/s]	komponente vektora brzine strujanja
\bar{v}_i	[m/s]	osrednjeni dio vektora brzine strujanja
v_i'	[m/s]	pulsirajući dio polja vektora brzine strujanja
v_n	[m/s]	projekcija vektora brzine u smjeru vanjske normale

W	[J]	rad
δ_{ij}	[-]	Kroneckerov simbol
Σ_{ij}	[N/m ²]	tenzor viskoznih naprezanja
φ	[-]	polje fizikalne veličine
d_i	[m]	Kondukcijska udaljenost
μ	[Pas]	dinamička viskoznost
ρ	[kg/m ³]	gustoća
ν	[m ² /s]	kinematička viskoznost
λ_i	[W/mK]	toplinska provodnost
Φ_{ijk}	[W]	toplinski tok kroz površinske plohe proračunske ćelije

SAŽETAK

Zadatak ovog rada bio je provesti numeričke simulacije hlađenja baterijskog modula pomoću rashladne tekućine u električnim vozilima. Simulacijski modeli izrađeni su u AVL Cruise M softveru pomoću kojeg simuliramo nekoliko domena proračuna. Najbitniji dio proračuna za ovaj rad bio je strujanje rashladne tekućine i izmjena topline između nje i baterijskog modula, no osim toplinskog proračuna i proračuna strujanja tekućine, proveden je i električni proračun pomoću kojeg dobivamo iznose generirane topline unutar baterijskih ćelija, te stanje napunjenosti baterije. Simulacijski modeli sadrže baterijski modul sa 12 „pouch“ baterijskih ćelija i predstavljaju ponašanje istih u stvarnom vremenu. Izrađena su tri modela sa različitim konfiguracijama rashladnog sustava, te jedan model koji uključuje čitavi rashladni krug sa konfiguracijom koja se pokazala optimalnom. ,

Ključne riječi: baterija, električno vozilo, hlađenje, numerička simulacija

SUMMARY

The task of this thesis was to perform numerical simulations of cooling a battery module using coolant in electric vehicles. Simulation models are made in AVL Cruise M software with which we simulate several domains of calculation. The most important part of the calculation for this thesis was the flow of coolant and heat exchange between it and the battery module, but in addition to thermal calculation and calculation of liquid flow, an electrical calculation was performed to obtain the amount of heat generated inside the battery cells. The simulation models contain a battery module with 12 pouch battery cells and represent their behavior in real time. Three models with different cooling system configurations were made, and also one model that includes the entire cooling circuit with a configuration that proved to be optimal.

Key words: battery, electric vehicle, cooling, numerical simulation

1. UVOD

Godišnje se u atmosferu ispušta 51 milijarda tona stakleničkih plinova, iako brojka može varirati iz godine u godinu, generalno se povećava. Jasno je da povećanje stakleničkih plinova u atmosferi uzrokuje povećanje njezine temperature i time dovodi do klimatskih promjena sa potencijalno katastrofalnim posljedicama. Transport predstavlja 16 % od 51 milijarde tona stakleničkih plinova, od čega oko 47 % predstavljaju osobni automobili. Električni automobili nude trenutno najbolje rješenje, što je autoindustrija naravno popratila, pa je tako danas moguće kupiti potpuno električni automobil od gotovo svih velikih svjetskih proizvođača automobila kao što su Audi, BMW, Chevrolet, Citroen, Ford, Fiat, Honda, Hyundai, Jaguar, Kia, Mercedes, Nissan, Porsche, Peugeot, Renault, Rimac, Smart, Tesla, VW itd. No najveća prepreka široj primjeni električnih automobila i dalje je baterijski paket, odnosno njegove značajke kao što su domet, cijena, kapacitet, pouzdanost, životni vijek i sigurnost, te vrijeme punjenja. Od 2010. pa do sada je postignut značajan napredak što se tiče cijene baterija koja je pala za 87%. No potrebno je još puno ulagati u njihov razvoj i optimizaciju kako bi električni automobili postali široko primjenjivi. Većina spomenutih značajki baterijskih ćelija odnosno baterijskih paketa ovisi o temperaturi baterijskih ćelija, te je zbog toga vrlo važno osigurati adekvatni sustav hlađenja istih. Za napajanje električnih automobila najčešće se koriste Li-ionske baterijske ćelije zbog poprilično visoke gustoće energije, te velikog broja mogućih radnih ciklusa (pražnjenja i punjenja). Osim praktičnih razloga, električni automobili uz pomoć elektromotora nude i do sada neviđene performanse u usporedbi s onima koji koriste klasičan pogon na motor s unutarnjim izgaranjem, te je prilikom rada takvih automobila izuzetno bitno hlađenje baterija zbog snage koje baterije isporučuju. Trenutno je najzastupljenije hlađenje baterija izvedeno uz pomoć tekućina zbog njihovog visokog toplinskog kapaciteta, no hlađenje se također može izvesti uz pomoć plinova ili uz pomoć PCM (eng.-, „Phase Change Material“) materijala sa promjenom agregatnog stanja. U ovom ćemo se radu fokusirati na trenutno najučinkovitiji način hlađenja pomoću tekućina.

2. BATERIJSKI PAKET ELEKTRIČNIH VOZILA

2.1. Baterijske ćelije

Baterije u električnim automobilima možemo usporediti sa uvećanim verzijama Li-ionskih baterija u mobilnim i sličnim uređajima, no električna vozila ne koriste jednu bateriju poput mobitela, već umjesto toga koriste paket koji se sastoji od ponekad tisuća pojedinačnih baterijskih ćelija koje rade zajedno. U automobilskoj industriji koristi se nekoliko tipova baterijskih ćelija, ako ih dijelimo prema obliku to su: „cilindrične“ „prizmatične“ i „pouch“ ćelije. Cilindrične ćelije su jedna od prvih vrsta masovno proizvedenih baterija i do danas se nastavljaju izrađivati u velikim količinama i dominiraju određenim primjenama.



Slika 1. Geometrijski oblici baterijskih ćelija električnih vozila

Prizmatične ćelije stekle su popularnost zbog velikog kapaciteta, niskog progiba i učinkovite upotrebe prostora. „Pouch“ ćelije koje imaju zatvorenu fleksibilnu foliju koja djeluje kao spremnik, što predstavlja minimalistički pristup pakiranju koji naravno dovodi do smanjenja težine i prostora koji zauzimaju. U ovom radu izraditi će se simulacije baterijskog modula sa „pouch“ baterijskim ćelijama. Baterijski modul sastoji se od nekoliko međusobno povezanih baterijskih ćelija. Naknadno se nekoliko baterijskih modula spaja u kompletan baterijski paket za pohranu energije za pokretanje električnih vozila.

Za proračune u ovom radu korišteni su podatci za LG Chem E66A baterijsku ćeliju koja se koristi kod automobila Porsche-a Taycan-a iz 2020. godine.

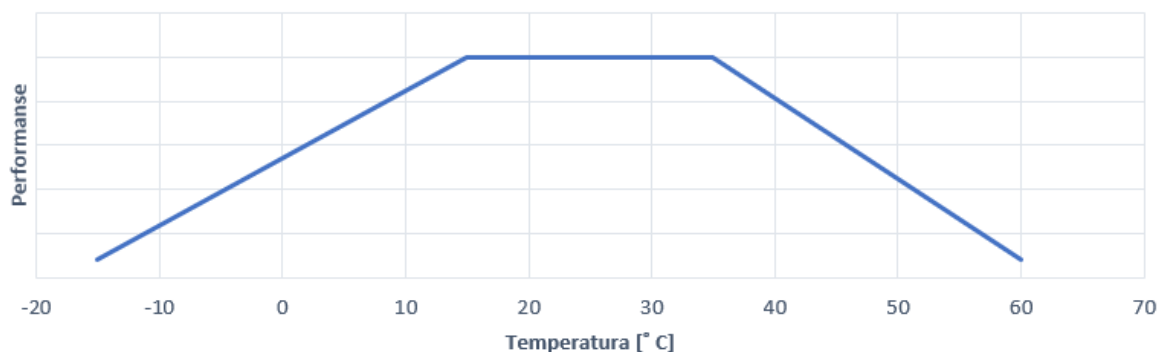
Tablica 1. Specifikacije referentne baterijske ćelije

Format ćelije	Li-ionska „pouch“
Dimenzije [mm]	350 x 104 x 11.7
Težina [g]	897
Kapacitet [Ah]	65
Raspon struja [A]	Od -325 (pražnjenje) do 98 (punjenje)
Raspon napona [V]	Od 2.5 do 4.2
Maksimalna snaga [kW]	1.04
Gustoća energije [Wh/kg]	259

**Slika 2. Baterijska ćelija**

2.2. Hlađenje baterijskih ćelija

Baterijske ćelije se zagrijavaju zbog kemijskih reakcija prilikom pražnjenja i punjenja, te zbog unutarnjeg otpora. Toplina koja se generira unutar baterijskih ćelija ovisi o materijalu anode i katode, te o gore spomenutom geometrijskom obliku baterijskih ćelija. Raspodjela temperatura unutar baterijske ćelije ovisi o toplinskoj provodnosti, koja znatno može varirati ovisno o obliku, odnosno smjeru zbog raspodjele reakcijskih slojeva unutar ćelije. Temperatura je jedan od glavnih čimbenika koji utječe na performanse i životni vijek Li-ionskih baterijskih ćelija, koje rade optimalno na temperaturama između 15°C i 35°C (ovisno o vrsti).



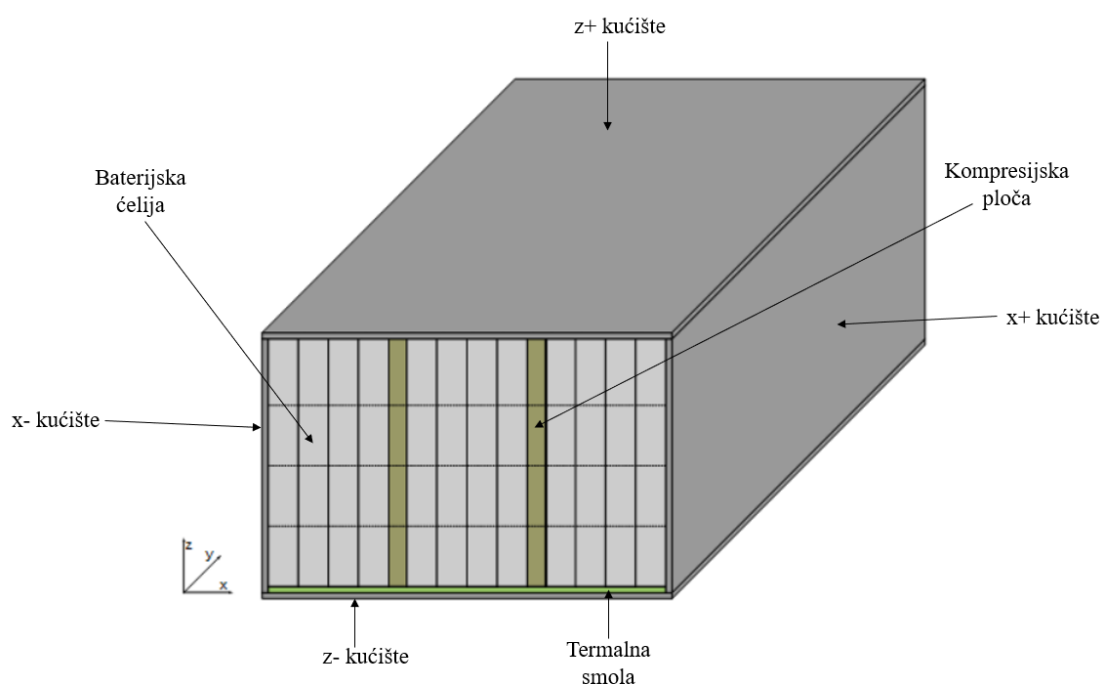
Slika 3. Performanse baterijskih ćelija u ovisnosti o temperaturi

Također je bitna uniformnost temperaturne raspodjele unutar baterijskog modula, o čemu također ovise performanse odnosno dostupna snaga punjenja i pražnjenja baterijskih ćelija. Neuniformna raspodjela temperatura unutar baterijskog modula može dovesti do različitog punjenja i pražnjenja baterijskih ćelija što uzrokuje električno neuravnoteženi baterijski modul, koji zbog toga ima slabije performanse. Temperaturne varijacije stoga ne bi trebale biti veće od 5°C do 10°C. Naravno, baterijske ćelije su funkcionalne u puno većem rasponu od gore spomenutih 15°C do 35°C, no rad pri temperaturama izvan tog raspona, dovodi do smanjenja performansi i skraćivanja životnog vijeka baterija. Također, izuzetno visoke temperature mogu biti vrlo opasne, jer mogu dovesti do kratkog spoja unutar baterije što uzrokuje velike temperaturne oscilacije. Ako je baterija duže vrijeme izložena temperaturama većim od oko 60°C postoji rizik od pucanja nakon čega je baterija neupotrebljiva, a u najgorem slučaju dolazi do eksplozije i zapaljenja baterijske ćelije. Temperature niže od 0°C nisu toliko opasne, no kao što je već rečeno dovode do smanjenja performansi zbog smanjenog kapaciteta, te smanjenja životnog vijeka zbog stvaranja litijske obloge. Zbog toga je u hladnijim krajevima ponekad umjesto hlađenja potrebno grijati baterijske ćelije prilikom punjenja ili pražnjenja električnog vozila. Danas u autoindustriji razlikujemo nekoliko vrsta hlađenja baterijskih modula. Najčešće se koristi hlađenje fluidima, pri tome je moguće koristiti rashladne tekućine koje su ujedno i najzastupljenije, naročito kod automobila visokih performansi zbog visokog toplinskog kapaciteta. Baterije je također moguće hladiti plinovima, ovakav sustav hlađenja izveden je tako da oko baterijskih ćelija struji hladna struja zraka. Također je moguće hladiti baterije uz pomoć materijala sa promjenom faze „PCM“ (Phase Change Material). Prilikom hlađenja pomoću PCM-a baterije su umetnute u kućište izrađeno od PCM materijala koje prilikom

zagrijavanja baterija provodi njihovu proizvedenu toplinu, te kada dosegne temperaturu taljenja počinje trošiti tu toplinu na promjenu agregatnog stanja materijala i tako usporava podizanje temperature čitavog modula. Intenzitet hlađenja ovisi isključivo o svojstvima PCM materijala i nije ga moguće naknadno regulirati, kao što je to moguće kod hlađenja fluidima kod kojih možemo regulirati ulaznu temperaturu i protok.

2.3. Baterijski modul

Ukoliko za napajanje električnog automobila koristimo „pouch“ baterijske ćelije, tada se nekoliko njih povezuje u cjelinu koju nazivamo baterijski modul, te se naknadno nekoliko baterijskih modula spaja u baterijski paket koji predstavlja cjelokupni izvor napajanja električnog vozila. U autoindustriji se baterijski modul najčešće sastoji od kućišta, obično izrađenog od aluminijskog unutar kojeg se nalazi desetak „pouch“ baterijskih ćelija i nekoliko kompresijskih ploča koje osiguravaju održavanje ujednačenog tlaka na površinama baterijskih ćelija kako u njima ne bi došlo do mehaničkih naprezanja i u najgorem slučaju rupture. Kompresijske ploče također izoliraju baterije jedne od drugih unutar kućišta, te time osiguravaju ujednačeniju raspodjelu temperature. Sljedeća slika prikazuje baterijski modul koji se sastoji od dvanaest baterijskih ćelija i dvije kompresijske ploče. Upravo takav baterijski modul će se koristiti u nekima od simulacija provedenim uz pomoć AVL Cruise M softvera.

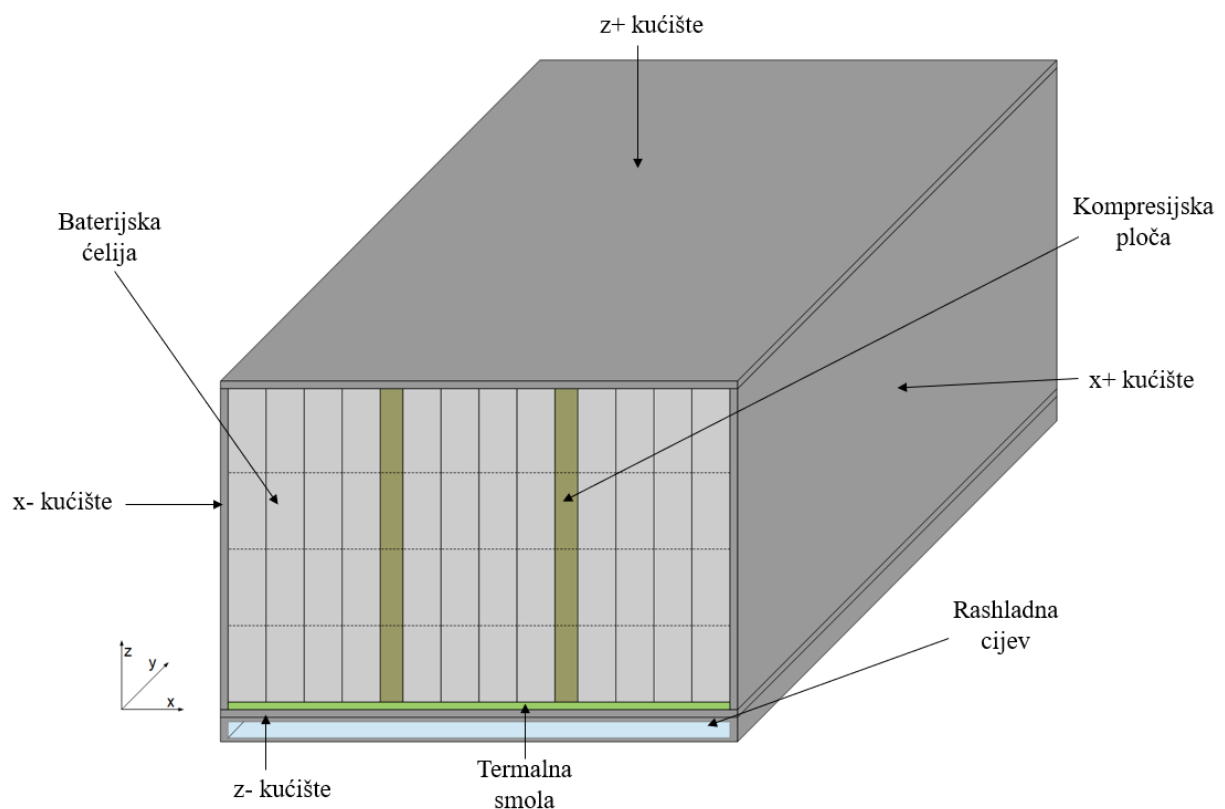


Slika 4. Baterijski modul

Čitavi baterijski paket može se sastojati od tridesetak međusobno povezanih baterijskih modula, ovisno o željenom kapacitetu i težini samog vozila.

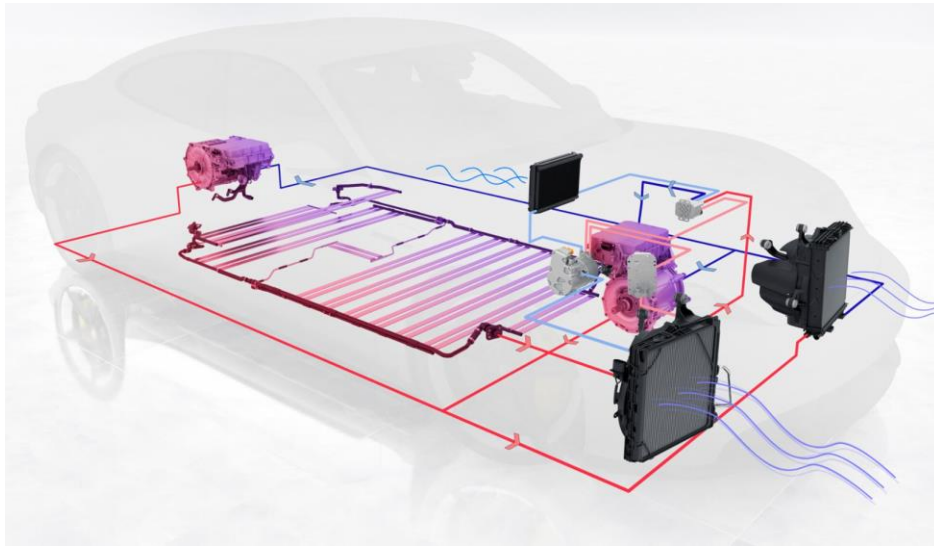
2.4. Hlađenje baterijskih modula

Prilikom hlađenja gore opisanog baterijskog modula tekućinama, generalno postoji nekoliko mogućih izvedbi, koje kao što ćemo kasnije vidjeti, utječu na konstrukciju baterijskog modula, odnosno čitavog baterijskog paketa i njegovog sustava hlađenja. Najčešće je konstrukcija izvedena tako da je donja strana kućišta baterijskog modula povezana na ploču za hlađenje kroz koju struji rashladna tekućina i time odvodi toplinu sa baterijskog modula.



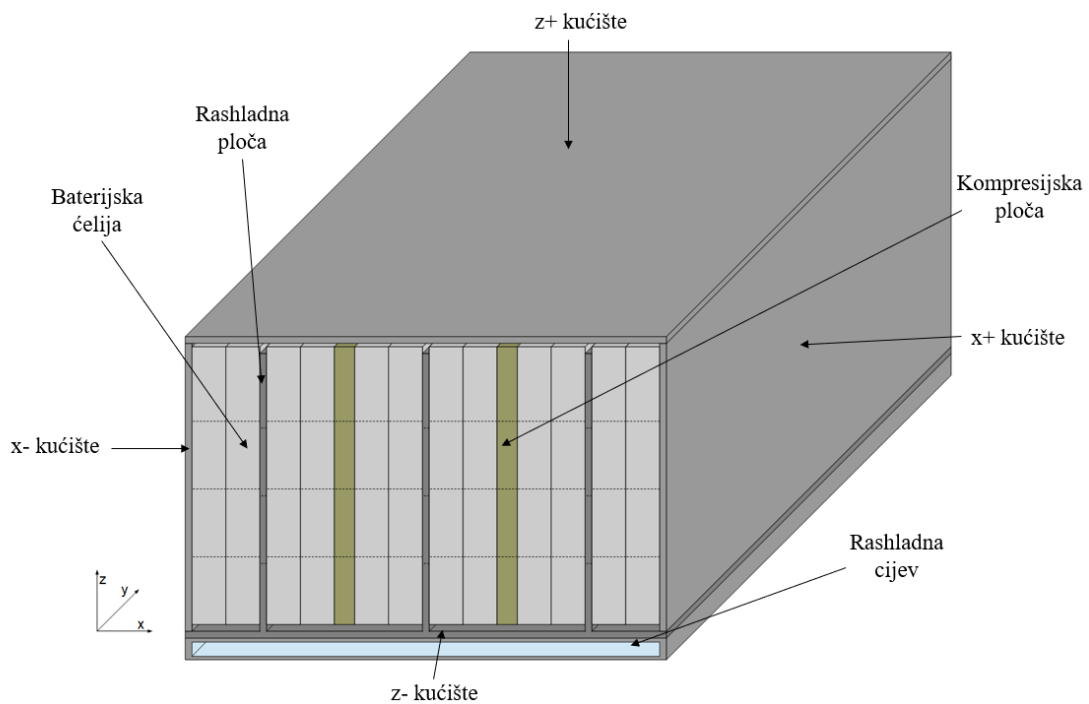
Slika 5. Baterijski modul sa rashladnom pločom

Rashladna tekućina struji uz pomoć pumpe koja osigurava željeni protok, te se može koristiti i za hlađenje elektromotora i invertera električnih automobila. Na kraju se zagrijana rashladna tekućina hladi pomoću isparivača (eng.-,„Chiller“) koji predaje toplinu HVAC klimatskom sustavu automobila i/ili pomoću hladnjaka (eng.-,„Radiator“) koji hladi tekućinu uz pomoć protoka vanjskog zraka.



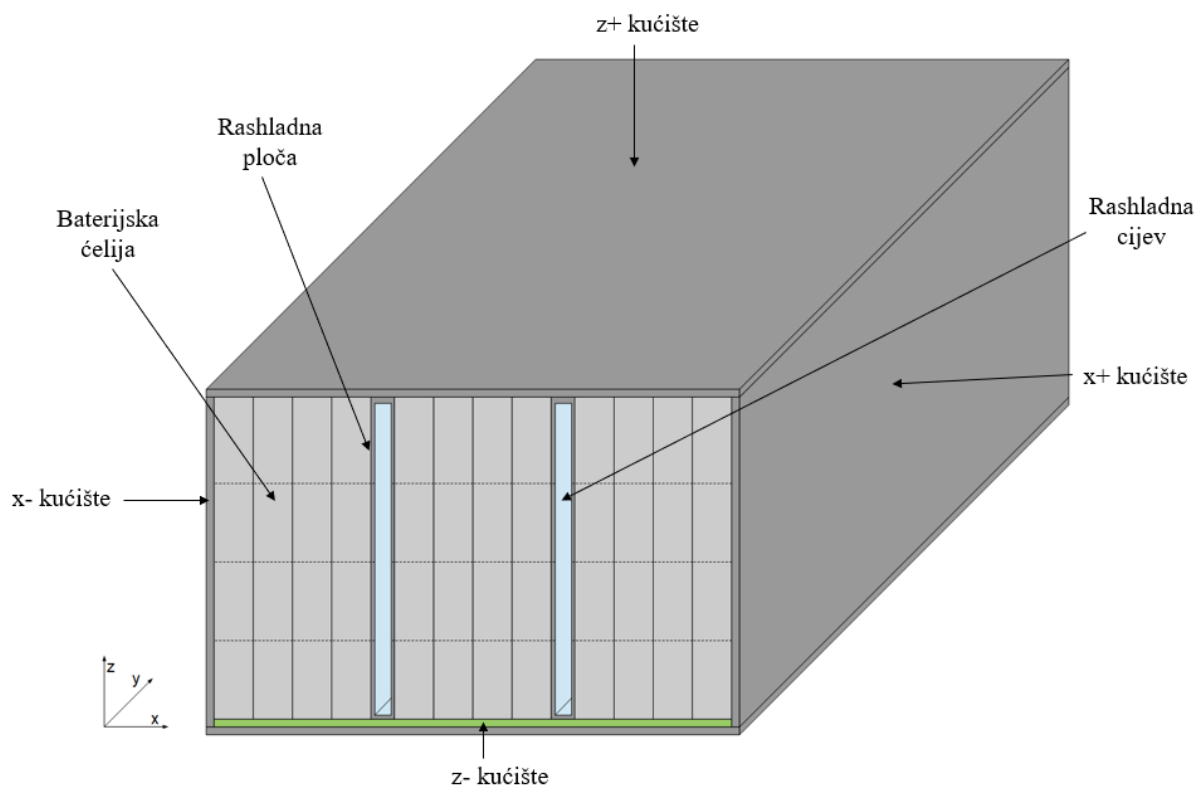
Slika 6. Rashladni krug električnog vozila

Osim gore spomenutog direktnog hlađenja donje plohe baterijskog modula, moguća je i izvedba pri kojoj je rashladna ploča sa donje strane baterijskog modula direktno povezana sa pločama visoke toplinske provodnosti koje se nalaze između baterijskih ćelija, te tako odvodi toplinu sa bočnih strana baterijskih ćelija, a ne sa donje plohe.



Slika 7. Baterijski modul sa aluminijskim rashladnim pločama unutar modula

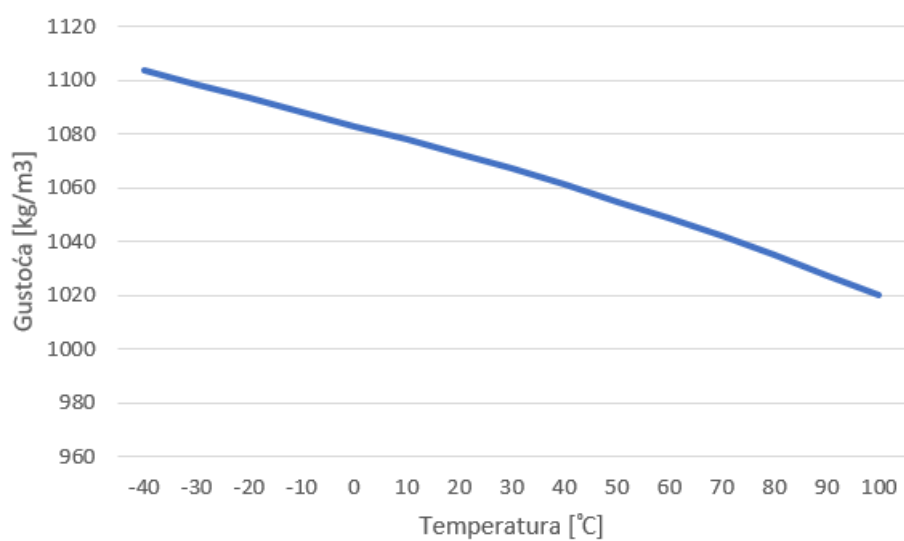
Također se u autoindustriji koristi i konstrukcija hlađenja pri kojoj su rashladne cijevi postavljene unutar baterijskih modula na bočne strane baterijskih ćelija.



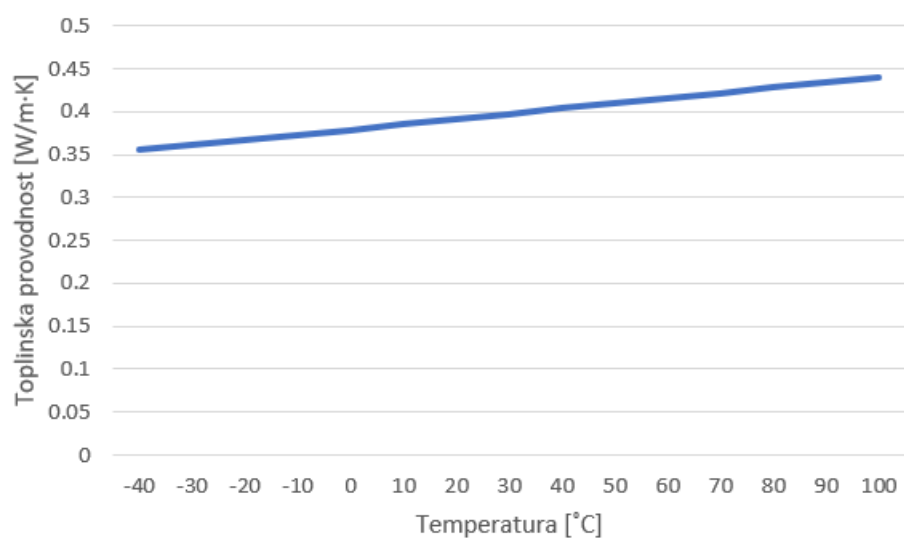
Slika 8. Baterijski modul sa rashladnim pločama unutar modula

2.5. Rashladna tekućina

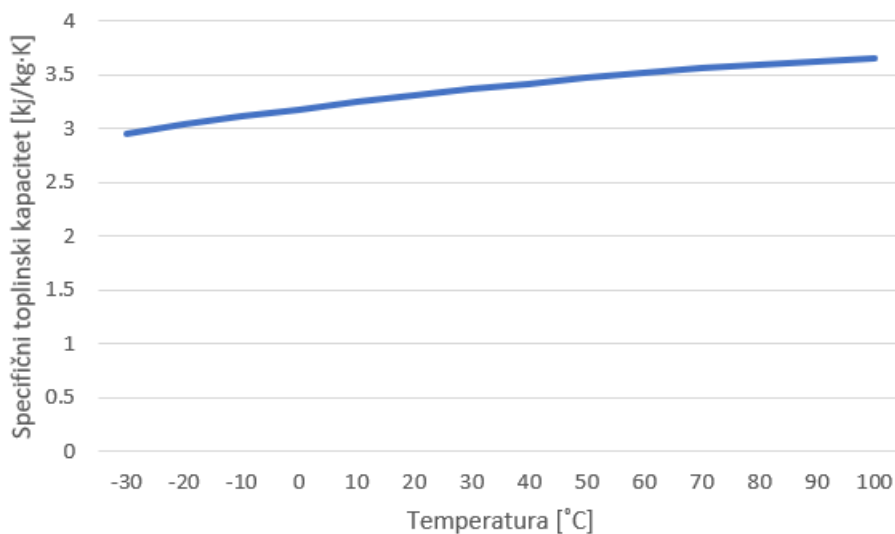
Prijenos topline značajno ovisi o termodinamičkim svojstvima rashladne tvari koja struji rashladnim krugom. Kada govorimo o hlađenju baterijskih paketa, obično se u rashladnom sustavu sa tekućinama koriste mješavine rashladnih tekućina koje imaju pogodna termodinamička svojstva i sprječavaju smrzavanje tekućine pri niskim temperaturama, što se kod same vode događa već pri 0°C . Tako se na primjer koriste mješavine glikola ili glistanina u određenim omjerima sa vodom. U ovom radu u simulacijama provedenim uz pomoć Cruise M-a koristiti će se 50% mješavina glistanina i vode. Fizikalna svojstva tekućine mijenjaju se s promjenom temperature te će se prikazati u sljedećih nekoliko grafova:



Slika 9. Gustoća rashladne tekućine u ovisnosti o temperaturi



Slika 10. Toplinska provodnost rashladne tekućine u ovisnosti o temperaturi



Slika 11. Specifični toplinski kapacitet rashladne tekućine u ovisnosti o temperaturi

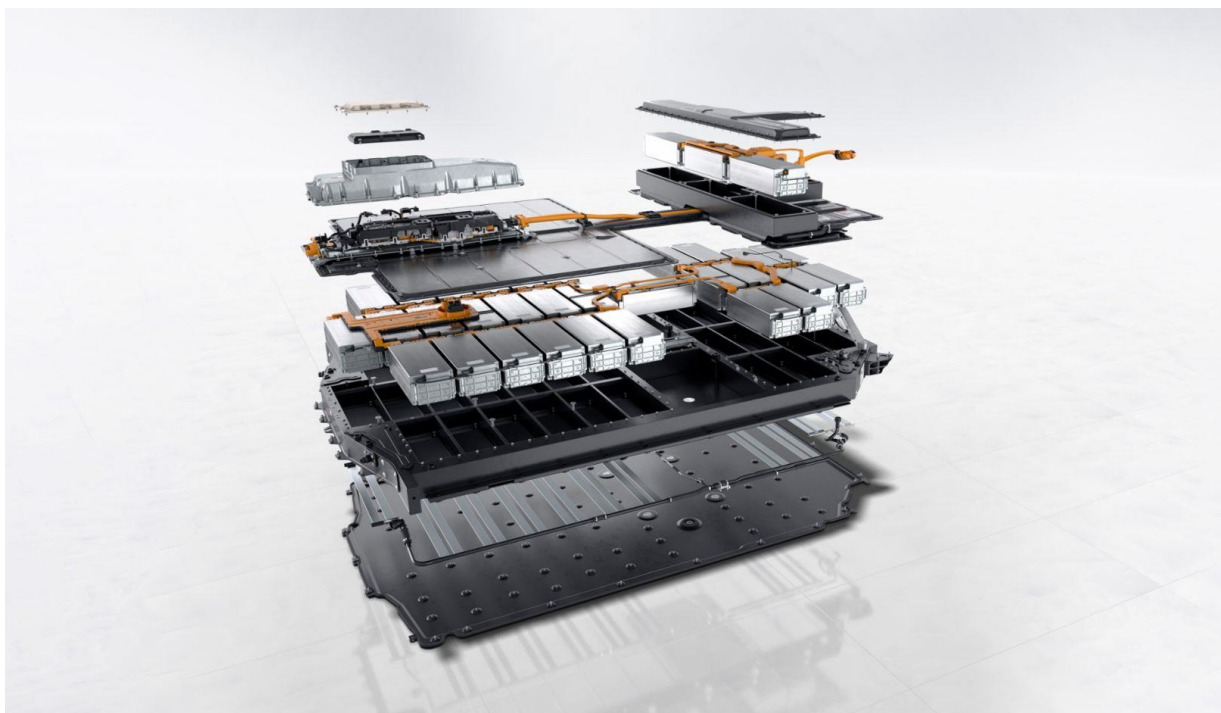
Ukupna toplina koja je prenesena s baterijskog modula na rashladnu tekućinu računa se kao produkt koeficijenta prijenosa topline, ukupne površine preko koje se toplina izmjenjuje i razlike srednjih temperatura baterijskog modula i rashladne tekućine. Srednju temperaturu rashladne tekućine računamo prema:

$$T_{tekućine} = T_{ulaz} + \frac{Q}{2 \cdot \dot{m} \cdot c_p} \quad 2.1$$

Gdje je $T_{tekućine}$ srednja temperatura tekućine, T_{ulaz} temperatura na ulazu u rashladnu cijev preko koje se hladi baterijski modul, Q toplina koja je preuzeta sa baterijskog modula, \dot{m} maseni protok i c_p specifični toplinski kapacitet. Kako bi povećali prijenos topline, želimo smanjiti srednju temperaturu rashladne tekućine. Iz gornje jednadžbe je vidljivo da ukoliko ne mijenjamo temperaturu na ulazu u rashladnu ploču, smanjenje srednje temperature možemo postići povećanjem protoka. Također želimo da razlika temperature na ulazu i izlazu iz rashladne ploče bude što manja kako bi postigli uniformno hlađenje ćelija, što će se kasnije prikazati i u rezultatima.

2.6. Baterijski paket referentnog vozila

Referentno vozilo za potrebe ovog rada je Porsche Taycan Turbo S čiji baterijski paket sadrži 33 baterijska modula u kojima se nalazi po 12 baterijskih ćelija, odnosno 396 baterijskih ćelija ukupno. Tako je postignut ukupni kapacitet od 93.4 kWh.



Slika 12. Baterijski paket električnog vozila

Porsche Taycan Turbo S predstavlja sportsko vozilo izuzetno visokih performansi pa je tako prisutan i zahtjev za adekvatan sustav hlađenja koji će osigurati optimalan rad unutar velikog spektra radnih uvjeta.

Tablica 2. Specifikacije referentnog električnog vozila

Maksimalna snaga	560 kW
Maksimalna snaga punjenja	270 kW
Maksimalna brzina	260 km/h
Ubrzanje 0-100 km/h	2.8 s
Ukupni kapacitet	93.4 kWh

Taycan je prvo proizvodno vozilo sa naponom sustava od 800 volta, dok većina ostalih električnih vozila koji se trenutno nude na tržištu imaju napon sustava od oko 400 volta. To mu omogućava konzistentne visoke performanse i smanjuje potrebno vrijeme punjenja. Kućište baterijskog modula izrađeno je od aluminija kako bi težina vozila bila što manja. Cijev za hlađenje kroz koju struji rashladna tekućina zalijepljena je za dno baterijskih modula. Ovisno o vanjskoj temperaturi, napunjenosti baterije i željenom programu vožnje, baterije se hlade ili griju na određenu temperaturu.

3. TEORIJSKE OSNOVE

Za modeliranje i simulaciju zadanog problema koristiti će se AVL-ov softverski paket Cruise M. Kasnije će biti objašnjen način modeliranja i zadane postavke proračuna, a u ovom će se poglavlju ukratko opisati teorijske osnove za proračun baterijskog modula. Na početku ovog poglavlja su dane osnovne jednačbe dinamike fluida iz kojih proizlaze jednačbe potrebne za numeričku simulaciju baterijskog modula.

3.1. Osnovni zakoni dinamike fluida

Sve jednačbe koje su nam potrebne za toplinski proračun simulacije hlađenja baterijskog modula proizlaze iz tri osnovne jednačbe dinamike fluida:

- Zakon očuvanja mase

$$\frac{\partial(\rho v_j)}{\partial x_j} = 0 \quad 3.1$$

U danoj jednačbi ρ predstavlja gustoću, a v_j vektor brzine fluida, te jednačba vrijedi za nestlačivo strujanje fluida

- Zakon očuvanja količine gibanja

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-p \delta_{ji} + \Sigma_{ji}) + \rho f_i \quad 3.2$$

U prethodnoj jednačbi, Σ_{ji} predstavlja simetrični tenzor viskoznih naprezanja koji se zapisuje prema sljedećoj jednačbi (prema Newtonovom zakonu viskoznosti):

$$\mu \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ji} = \Sigma_{ji} \quad 3.3$$

Zakon očuvanja količine gibanja govori nam da je brzina promjene količine gibanja materijalnog volumena jednaka sumi vanjskih sila. Vanjske sile se dijele na masene i površinske.

- Zakon očuvanja energije

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho e)}{\partial x_j} = -p \frac{\partial v_j}{\partial x_j} + \Sigma_{ji} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + s \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + q_h \quad 3.4$$

Zakon očuvanja energije dovodi u vezu brzinu promjene zbroja kinetičke i unutarnje energije materijalnog volumena sa snagom vanjskih površinskih i masenih sila na materijalni volumen, te izmjenom topline materijalnog volumena i okoline.

Prilikom proračuna pomoću Cruise M softvera, strujanje fluida se opisuje pomoću osnovnih jednadžbi dinamike fluida, no one su svedene na jednodimenzionalni slučaj odnosno u proračunu koristimo empirijske izraze za trenje i prijelaz topline u pojedinim ćelijama diskretiziranog prostora. Dok za kondukcijski dio proračuna, koristi se zakon očuvanja energije u trodimenzionalnom obliku.

3.2. Postavke rješavača

Kao što je već spomenuto AVL Cruise M nudi nam mogućnost rješavanja više domena unutar jedne simulacije, kao što su proračun strujanja tekućine, proračun strujanja zraka, toplinski proračun i električni proračun. Postavke simulacije moguće je podesiti kao Single-Rate i kao Multi-Rate kosimulacije. U slučaju Single-rate simulacije, jedan skup postavki se koristi za sve domene odnosno fizičke jednadžbe sustava simulacije koju rješavamo. U slučaju Multi-Rate kosimulacije, različite domene odnosno skupovi fizičkih jednadžbi odvajaju se od globalnog sustava, te je moguće postaviti različite postavke na pojedine domene. Lokalni sustavi komponenti se povezuju tako da poštuju uvjete poput očuvanja mase ili energije u jednadžbama koje opisuju cjelokupni fizikalni sustav. U konačnici, izloženi matematički model se u paketu AVL Cruise M rješava kao sustav običnih diferencijalnih jednadžbi (ODE) u obliku:

$$\dot{x} = f(t, x) \quad 3.5$$

gdje je t vrijeme i x stanje sustava, ili kao sustav algebarskih diferencijalnih jednadžbi (DAE).

$$\dot{x} = f(t, x, y) \quad 3.6$$

$$0 = g(t, x, y) \quad 3.7$$

gdje je t vrijeme, x predstavlja diferencijalne varijable i y predstavlja algebarske varijable.

Razlikujemo implicitni i eksplicitni rješavač. U većini slučajeva nam implicitni rješavač dopušta veći vremenski korak od eksplicitnog, te su općenito implicitni rješavači prikladni za „krute“ probleme, dok su eksplicitni prikladniji za fleksibilnije probleme. Implicitni rješavač zahtijeva rješavanje Jakobijana, stoga je za veće sustave i teže probleme učinkovitije koristiti eksplicitne adaptivne rješavače od implicitnih. Zbog potrebne kontrole pogreške, implicitni rješavači uvijek koriste adaptivnu shemu vremenskog koraka, dok je za eksplicitne moguće koristiti fiksni korak koji je potreban za primjenu u HiL-u (Hardware in the Loop). Kod eksplicitnih rješavača, moguće je odabrati između fiksnog, auto ili adaptivnog vremenskog koraka. U slučaju fiksnog vremenskog koraka ne provodi se kontrola pogreške i rješenje može divergirati i dovesti do pogrešnog rezultata bez upozorenja. Kao što je i spomenuto, fiksni je korak zato namijenjen za primjenu na HiL sustavima. U slučaju auto vremenskog koraka, uključene su različite komponente koje nameću ograničenje na vremenski korak, na primjer Courant Friedrichs Lewy kriterij kod računanja sa nekim komponentama. Ako niti jedna komponenta ne ograničava veličinu koraka, automatski je gotovo jednak fiksnom koraku. Prilikom računanja sa adaptivnim vremenskim korakom, rješavač može koristiti procjenu pogreške. Minimalni vremenski korak za adaptivnost ne smije biti prevelik, te se simulacija može zaustaviti i obavijestiti o grešci kada se dosegne postavljeni minimalni vremenski korak. Svi eksplicitni rješavači koriste Runge-Kutta metode. Implicitni rješavači zahtijevaju adaptivni korak vremenske integracije.

3.3. Baterijski modul

3.3.1. Električni proračun

Baterijski modul ima pravilnu unutarnju strukturu od nekoliko ćelija spojenih paralelno, a zatim i serijski. Ćelija predstavlja ili granicu napona koja ovisi o lokalnoj struji, ili RC element. Ako pretpostavimo da imamo n ćelija paralelno i samo jedan serijski sloj (ako postoji m serijskih slojeva, radimo sljedeće za svaki sloj zasebno) za svaki dio ćelije j imamo napon:

$$U_{N,j} = U_j(I_j) + (R_j + R_C) \cdot I_j \quad 3.8$$

Gdje U_N označava napon primijenjen na priključni čvor, U_j je napon ćelije, R_j je otpor u grani (ili nula), a R_C je otpor spoja.

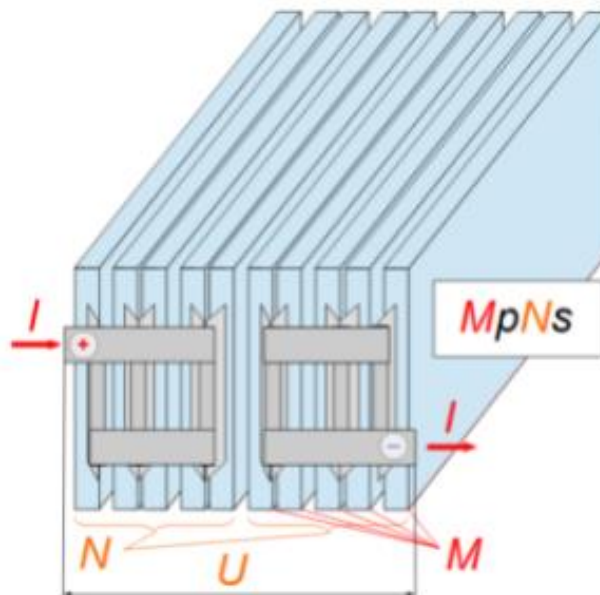
Uvjeti su sljedeći:

$$U_{N,j} = U_{N,k} \text{ za } j \neq k \quad 3.9$$

Za određivanje struja sa:

$$\sum I_j = I_N \quad 3.10$$

Gdje desna strana predstavlja struju koja ulazi u baterijski modul, odnosno u paralelne spojeve.

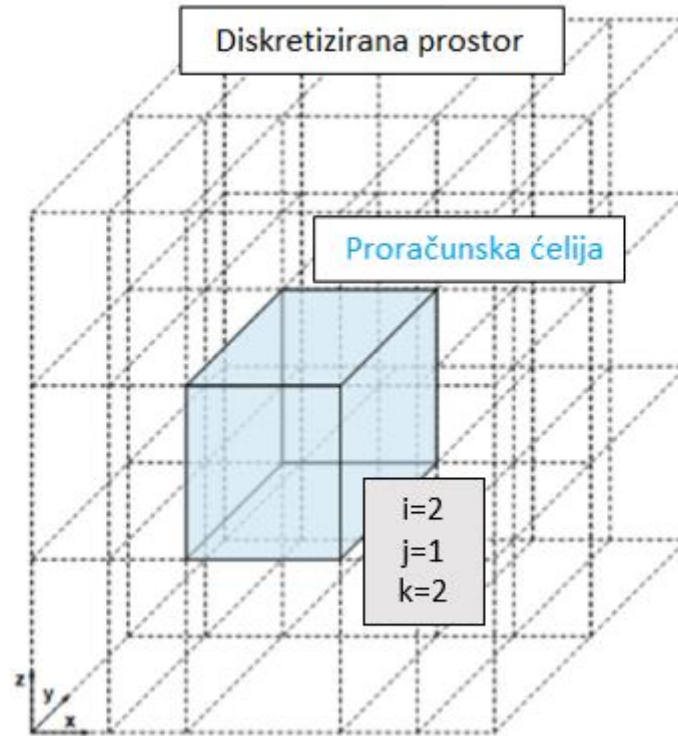


Slika 13. Električni raspored

Slika prikazuje način spajanja baterijskih ćelija unutar baterijskog modula, gdje imamo M paralelno spojenih ćelija i N serijskih spojeva tih paralelno spojenih ćelija.

3.3.2. Toplinski proračun

3.3.2.1. Kondukcijski prijenos topline

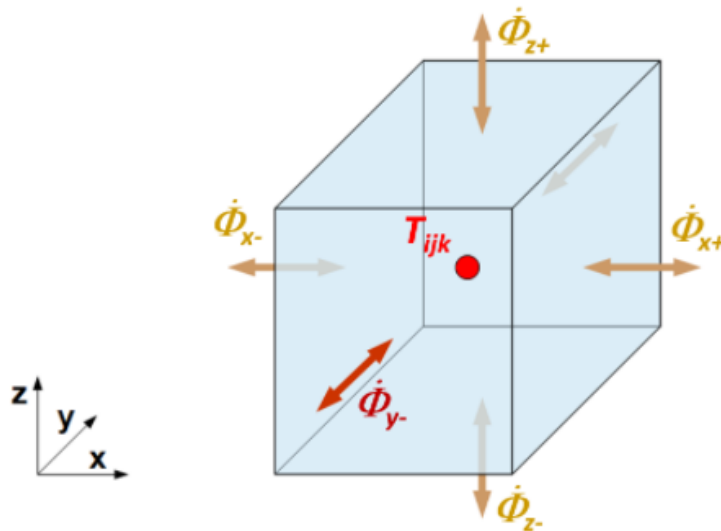


Slika 14. Diskretizirani proračunski prostor

Toplinska jednadžba gore prikazane proračunske ćelije glasi:

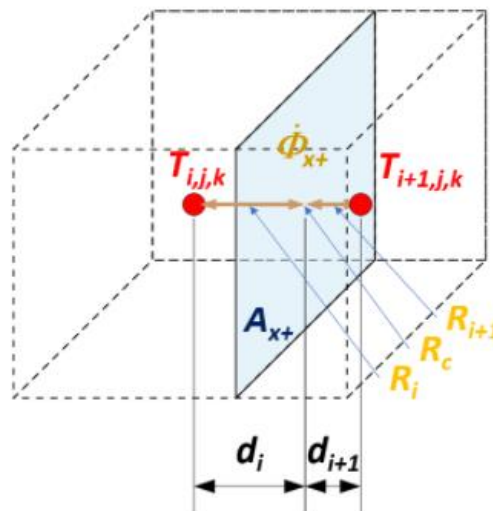
$$m_{ijk} \cdot c_p(T_{ijk}) \cdot \frac{dT_{ijk}}{dt} = \sum_{xyz}^{\pm} \Phi_{ijk} \quad 3.11$$

Gdje i, j, k prikazuju broj ćelije u smjerovima x, y i z , m_{ijk} označava masu proračunske ćelije, c_p predstavlja specifični toplinski kapacitet materijala zadane ćelije, T_{ijk} predstavlja temperaturu proračunske ćelije i član $\sum_{xyz}^{+/-} \Phi_{ijk}$ predstavlja sumu toplinskih tokova kroz svih šest vanjskih površina proračunske ćelije.



Slika 15. Toplinski tok kroz površine proračunske ćelije

Sljedeća slika prikazati će kako računamo konduktivni prijenos topline između susjednih ćelija u diskretiziranom prostoru (u ovom slučaju krutini).



Slika 16. Kondukcija između susjednih ćelija

Iznos toplinskog toka računa se prema:

$$\Phi_{ijk-x+} = \frac{1}{R_{i,i+1}} \cdot (T_i - T_{i+1}) \quad 3.12$$

Gdje Φ_{ijk-x+} predstavlja toplinski tok između (i,j,k) i $(i+1,j,k)$ proračunskih ćelija, zatim $R_{i,i+1}$ predstavlja toplinski otpor između (i,j,k) i $(i+1,j,k)$ proračunskih ćelija, te T_i i T_{i+1} predstavljaju temperature u središtu ćelija (i,j,k) i $(i+1,j,k)$.

Također je bitno spomenuti kako se računa gore spomenuti toplinski otpor:

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i + A_{x+}} \quad 3.13$$

Gdje je d_i kondukcijska udaljenost ćelije (i,j,k) , λ_i toplinska provodnost i A_{x+} površina dodira dvaju ćelija.

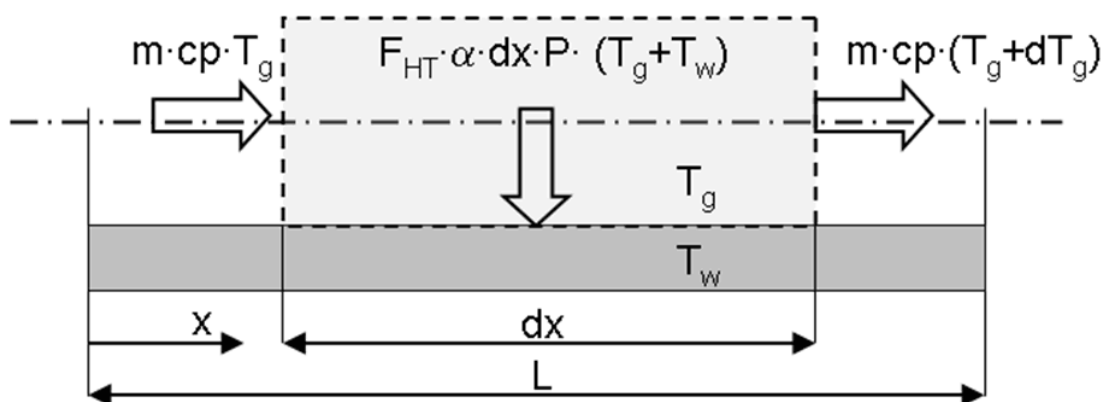
Te na kraju, toplinska otpornost zbog kontakta dvaju ćelija računa se kao:

$$R_c = \frac{1}{C_c A_{x+}} \quad 3.14$$

Gdje C_c predstavlja toplinski kontakti koeficijent između ćelija koje su u dodiru.

3.3.2.2. Konvekcijski prijenos topline

Zakon o prijenosu topline u komponentama protoka izveden je za idealan protočni volumen s aksijalnom ujednačenom temperaturom stijenke, toplinskim kapacitetom fluida i koeficijentom prijenosa topline. Za takav sustav može se primijeniti jednadžba očuvanja energije u sljedećem obliku:



Slika 17. Konvekcijski prijenos topline

Pa tako jednadžbu ukupnog toplinskog toka između fluida i krutine možemo zapisati kao:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{ulaz} - T_w) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-A \cdot \alpha \cdot F_{HT} \cdot F_t}{\dot{m} \cdot c_p}\right) \right] \quad 3.15$$

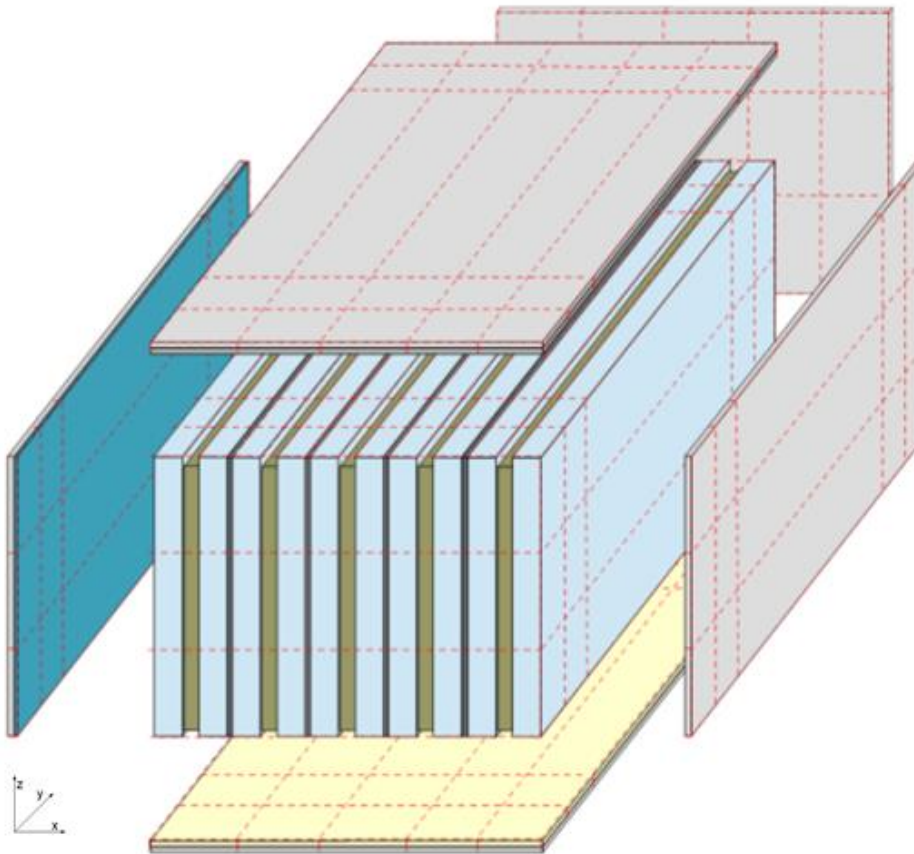
Gdje \dot{Q} predstavlja toplinski tok, \dot{m} maseni protok, c_p specifični toplinski kapacitet, T_{ulaz} temperaturu na ulazu, T_w temperaturu krutine, A površinu prijenosa topline, α koeficijent prijenosa topline, F_{HT} multiplikator prijenosa topline i F_t faktor pomoću kojeg računamo traženi pad tlaka. Za većinu komponenti se za proračun prijenosa topline koristi ulazna temperatura. Prijenos topline dodaje se nizvodnom entalpijskom toku i nema utjecaja na proračun protoka mase.

Kako bi proračun prijenosa topline bio fizikalan potrebno je izračunati koeficijent prijenosa topline α . Cruise M softver nudi nekoliko različitih metoda za proračun koeficijenta prijenosa topline kao što su Colburn, Gnielinski, Nusselt. Također je moguće samostalno definirati koeficijent koji u tom slučaju ostaje konstantan za vrijeme proračuna. U simulacijama prikazanim u ovom radu korištena je „Local Nusselt based on VDI“ metoda koja je prikladna za širok spektar uvjeta protoka i uzima u obzir varijabilnost Nusseltovog broja duž duljine cijevi. Također predstavlja prikladnu metodu za računanje prijenosa topline pri strujanju na malim Reynolds-ovim brojevima kao što je slučaj u simulacijama koje ćemo provoditi.

3.3.3. Geometrija i diskretizacija

Baterijski modul sastoji se od „stack-a“ i „kućišta“. „Stack“ je dio modula unutar kojeg se nalaze baterije, te ploče za hlađenje i kompresijske ploče između baterija. „Kućište“ je direktno naslonjeno na „stack“ na njegovim vanjskim površinama kao što je prikazano na sljedećoj slici. Moguće je postaviti više slojeva kućišta različitih materijala i debljina, kako bi što točnije opisali geometriju stvarnog baterijskog modula i dobili fizikalni prikaz prijenosa topline. Baterijski „stack“ moguće je diskretizirati u ćelije oblika kvadra u sva 3 smjera. Te se kućište na x- i x+ stranama automatski diskretizira tako da se veličina ćelija sa „stack-a“ preslika na dio kućišta na koji je naslonjen, te svaki podsloj kućišta predstavlja jednu ćeliju u smjeru debljine samog kućišta. Dok je kućište na z- i z+ stranama diskretizirano tako da u y smjeru ima jednako ćelija kao i „stack“, dok u x smjeru jedna ćelija predstavlja jedan „stack“ element

koji se definira kao grupa određenog broja baterijskih ćelija, kompresijskih ploča i rashladnih ploča.



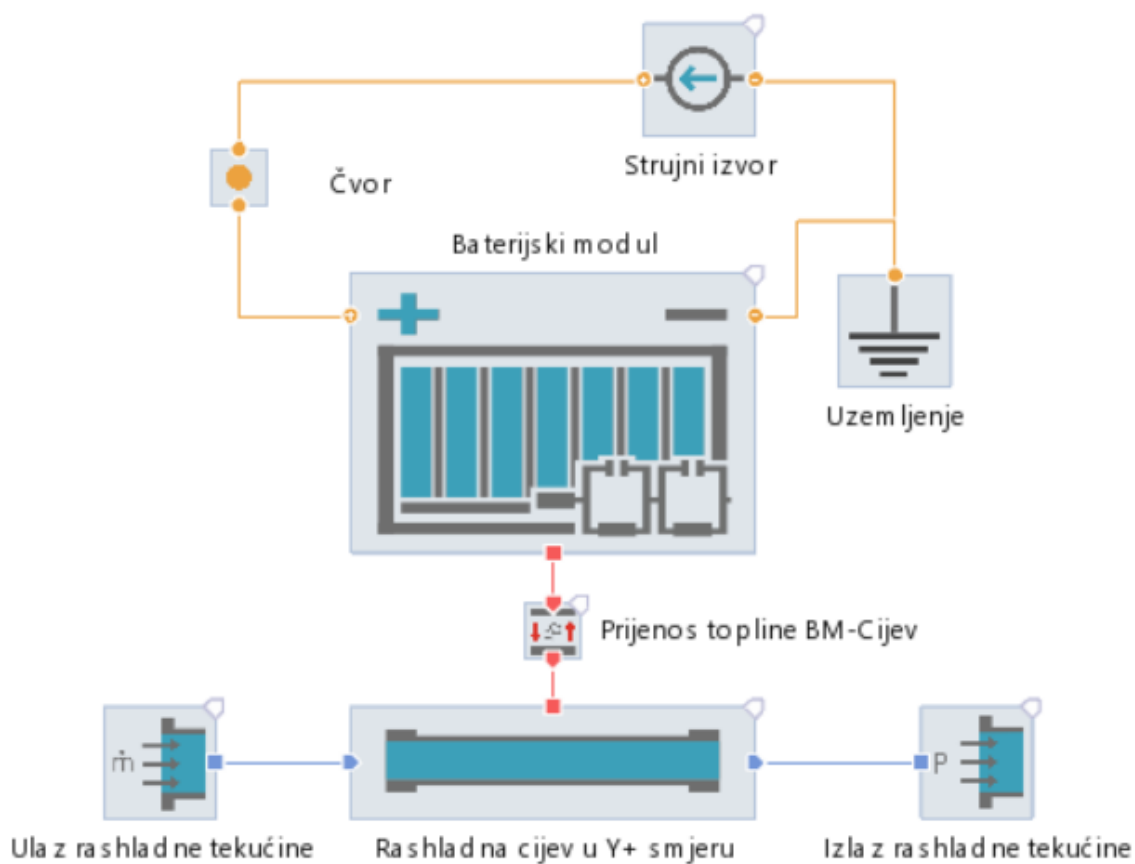
Slika 18. Prikaz moguće diskretizacije baterijskog modula

4. NUMERIČKA SIMULACIJA HLAĐENJA BATERIJSKOG MODULA

MODULA

Simulacijski modeli koji prikazuju različite konfiguracije rashladnih ploča baterijskog modula sastoje se od nekoliko komponenata:

- Baterijski modul
- Strujni izvor
- Električni čvor
- Uzemljenje
- Komponenta za prijenos topline
- Cijev za strujanje tekućina
- Ulaz rashladne tekućine
- Izlaz rashladne tekućine



Slika 19. Simulacijski model hlađenja baterijskog modula (konfiguracija 1)

Narančasta boja spojeva komponenti predstavlja strujni krug na koji je baterijski modul spojen, crvena predstavlja toplinski spoj sa rashladnom cijevi, te plava predstavlja spojeve strujanja tekućine.

Unutar komponente baterijskog modula definira se njegova geometrija, električni spojevi unutar baterijskog modula i fizikalna i termalna svojstva baterijskog modula i materijala od kojih je sačinjen. Ulaz rashladne tekućine definiran je pomoći komponente toka mase unutar koje se definiraju rubni uvjeti kao što su tlak i temperatura, te iznos toka mase rashladne tekućine. Izlaz rashladne tekućine definiran je pomoću izlazne komponente strujanja tekućine. Unutar komponente cijevi definira se geometrija unutrašnjosti rashladne ploče i ostali parametri pomoću kojih računamo pad tlaka u rashladnoj ploči. Komponenta prijenosa topline definira način prijenosa topline, površinu preko koje se prenosi i metoda računanja koeficijenta prijenosa topline. Električni krug baterijskog modula simuliramo uz pomoć metode ekvivalentnog kruga gdje se na strujni izvor zadaje iznos struje, te bateriju predstavlja kombinacija otpornika i kondenzatora koji predstavljaju njeno stvarno ponašanje pri zadanim uvjetima.

Sljedeća tablica prikazuje postavke rješavača za pojedine domene proračuna. Također možemo spomenuti da je na svaku od domena postavljena željena točnost od 10^{-5} .

Tablica 3. Postavke rješavača

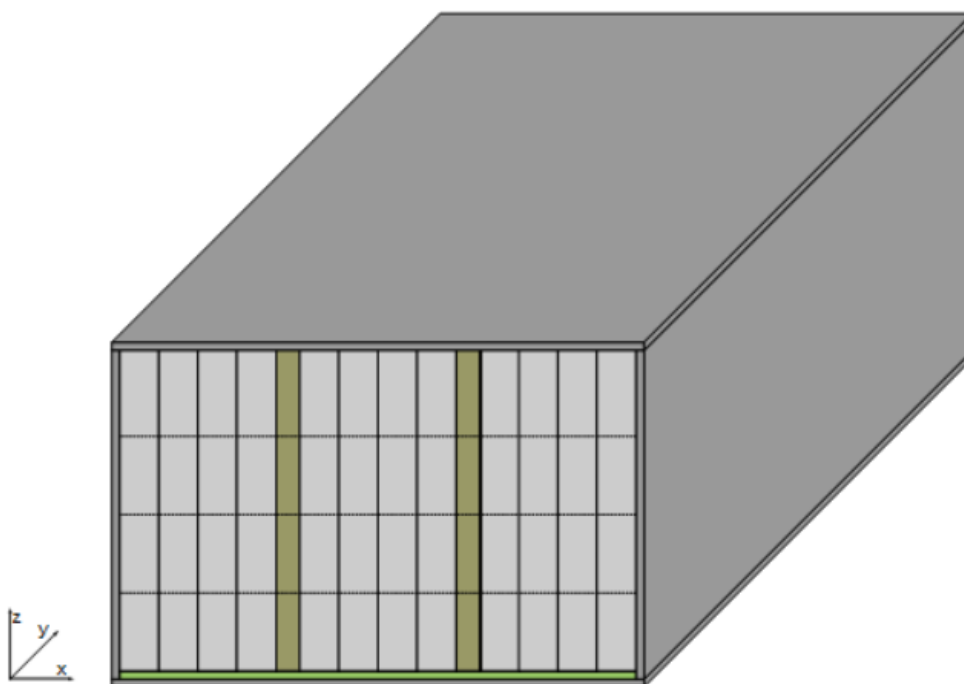
	Tip rješavača	Tip vremenskog koraka	Maksimalni vremenski korak [s]
Domena fluida	Implicitni	Adaptivni	0.1
Električna domena	EksPLICITNI	Adaptivni	0.01
Domena plina	EksPLICITNI	Adaptivni	0.01
Toplinska domena	Implicitni	Adaptivni	0.1

U sljedećih nekoliko pod-poglavljja prikazati ćemo tri konfiguracije rashladnih komponenti baterijskog modula, za koje je provedena simulacija u trajanju od 4800 sekundi. No zadnje pod-poglavlje prikazivati će simulaciju čitavog kruga hlađenja koje će uključivati komponente preko kojih se ovisno o vanjskim uvjetima i željenom režimu rada rashladna tekućina hladi/grije u trajanju od 4440 sekundi.

4.1. Simulacija hlađenja baterijskog modula preko donje plohe kućišta

4.1.1. Baterijski modul

Baterijski modul korišten u proračunu hlađenja preko donje plohe kućišta sastoji se od „stack-a“ koji se sastoji od ukupno 12 već spomenutih *LG Chem E66A* baterijskih ćelija, te od dvije kompresijske ploče između po 4 baterijske ćelije. Kućište je kao što je već spomenuto načinjeno od aluminijske ploče debljine 2 mm oko baterijskog modula. Donja ploča kućišta također sadrži i sloj termalne smole koja povezuje „stack“ sa kućištem, te je ispod samog kućišta postavljena još jedna ploča od 2 mm koja predstavlja rashladnu ploču.



Slika 20. Baterijski modul (konfiguracija 1)

Za potrebe toplinskog dijela proračuna simulacije, potrebni su nam podatci o fizikalnim i toplinskim svojstvima gore navedenih materijala koji su korišteni. Korišteni podatci prikazani su u sljedećoj tablici gdje možemo primijetiti da su korištene konstantne vrijednosti za gustoću, toplinsku provodnost i specifični toplinski kapacitet. No također vidimo da baterijske ćelije sadrže tri vrijednosti toplinske provodnosti koje predstavljaju njene vrijednosti u x, y i z smjeru

jer se zbog svoje lisnate strukture baterijska ćelija u „pouch“ obliku ponaša kao anizotropni materijal.

Tablica 4. Svojstva materijala korištenih u baterijskom modulu

	Gustoća [kg/m^3]	Toplinska provodnost [W/mK]	Specifični toplinski kapacitet [kJ/kgK]
Aluminij	2700	236	950
Baterija	2576	1, 35, 35	1160
Kompresijska ploča	240	0.02	1400
Termalna smola	1230	4.5	1080

Također su postavljene vrijednosti toplinskog otpora zbog kontakta između pojedinih slojeva koji nije savršen, te se zbog toga između slojeva pojavljuje i zrak koji predstavlja toplinski otpor. Toplinski otpor zbog kontakta ovisi o tlaku i materijalima slojeva koji se dodiruju.

Tablica 5. Kontaktni otpor

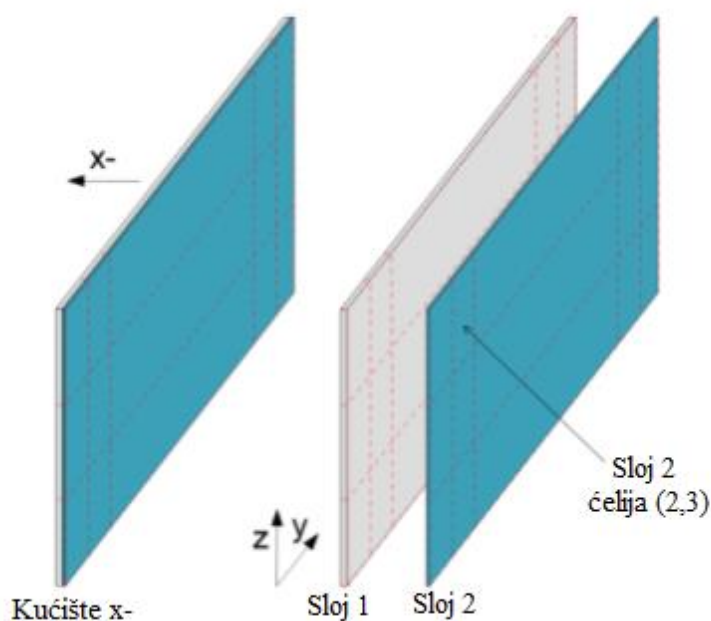
	Kontaktni toplinski otpor [$\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$]
Baterija/Baterija	0.001
Baterija/Kompresijska ploča	0.003
„Stack“/Kućište	0.003
„Stack“/Termalna smola	0.0008
Termalna smola/Kućište	0.0008

U poglavlju 3.2.3 objašnjeno je na koji se način diskretizira baterijski modul u x smjeru, te kako je diskretizirano kućište. Bilo je potrebno definirati kako će baterijski modul biti diskretiziran

u y, z smjeru. Tako da u y smjeru imamo 20 ćelija po 17 mm i u z smjeru 8 ćelija po 13 mm. Tako da je baterijsko „stack“ sačinjen od ukupno 2240 diskretiziranih ćelija, dok je čitavi baterijski modul sačinjen od ukupno 2587 ćelija.

4.1.2. Toplinski kontakt

Unutar prethodnog pod-poglavlja je već prikazana većina toplinskih i termalnih svojstava baterijskog modula, no baterijski modul je potrebno spojiti sa rashladnom cijevi putem komponente prijenosa topline u kojoj se definira način prijenosa topline kondukcija/konvekcija, odnosno u našem slučaju konvekcijski prijenos topline, te površina plohe preko koje se toplina prenosi i metoda računanja koeficijenta prijenosa topline. Kao što je već spomenuto u teorijskom dijelu rada, korištena je „*Local Nusselt based on VDI*“ metoda. Na rashladnu ploču je moguće postaviti jednodimenzionalnu diskretizaciju u smjeru strujanja, u našem slučaju to je y+ smjer na baterijskom modulu koji u y smjeru sadrži 20 ćelija, pa je sa 20 ćelija diskretizirana i rashladna cijev.



Slika 21. Definiranje ćelija kućišta baterijskog modula

Unutar baterijskog modula potrebno je pomoću tablice definirati termalne priključke, odnosno ćelije koje će se povezivati sa rashladnom pločom. Te ćelije će u ovome primjeru predstavljati

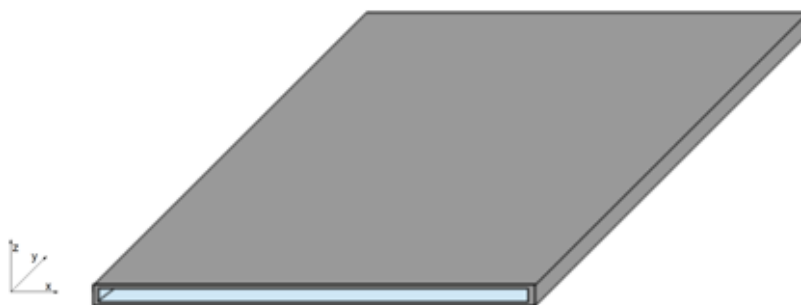
donji sloj z- kućišta. Nakon definiranja termalnih priključaka sa strane baterijskog modula, komponenta prijenosa topline prepoznaje prvi red ćelija u y smjeru i povezuje ih sa prvom ćelijom na strani rashladne cijevi, što će biti vidljivo iz prikazanih rezultata.

4.1.3. Električni krug

Unutar prva 3 simulacijska modela, električni krug predstavlja strujni izvor sa konstantnom 0.75 C strujom radi jednostavnosti pri usporedbi željenih rezultata odnosno utjecaja različitih konfiguracija na hlađenje baterijskog modula.

4.1.4. Strujanje rashladne tekućine

Rashladna tekućina izmjenjuje toplinu sa baterijskim modulom preko komponente rashladne cijevi unutar koje se definira unutrašnja geometrija rashladne cijevi. Geometriju je moguće definirati kao cijev okruglog presjeka, kao volumen ili kao cijev kvadratnog presjeka. U ovom simulacijskom primjeru rashladna cijev je definirana kao cijev kvadratnog presjeka. Dimenzije unutrašnjosti rashladne cijevi su 100 x 340 x 4 mm.



Slika 22. Rashladna cijev

Unutar komponente ulaza rashladne tekućine definiran je protok mase, te tlak i temperatura na ulazu. Unutar modela definirati ćemo nekoliko vrijednosti protoka mase kako bi prikazali njihov utjecaj na izmjenu topline sa baterijskim modulom.

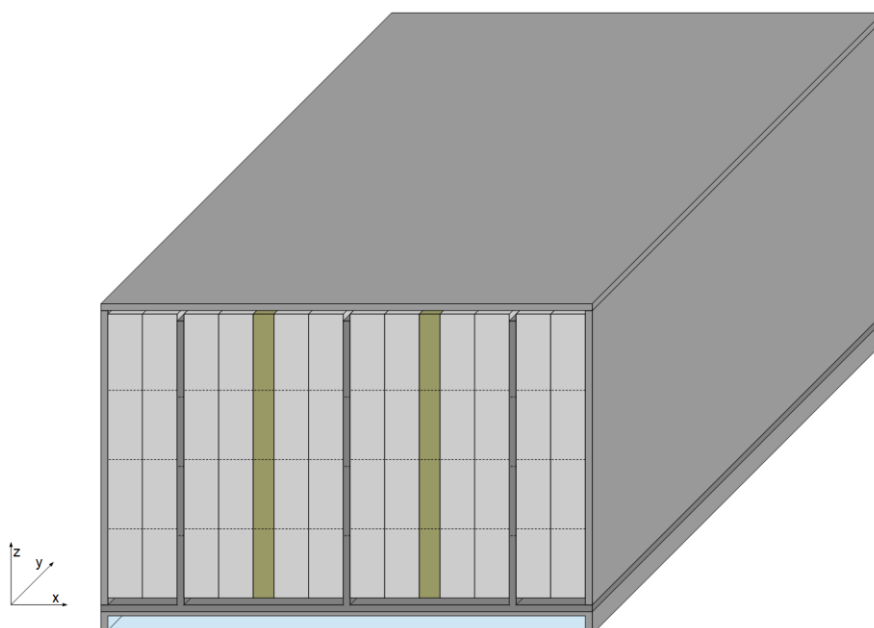
Tablica 6. Protok mase rashladne tekućine

	Protok mase rashladne tekućine [kg/s]
1. Slučaj	0.005
2. Slučaj	0.01
3. Slučaj	0.02

4.2. Simulacija hlađenja baterijskog modula preko donje plohe uz pomoć rashladnih ploča unutar „stack-a“

4.2.1. Baterijski modul

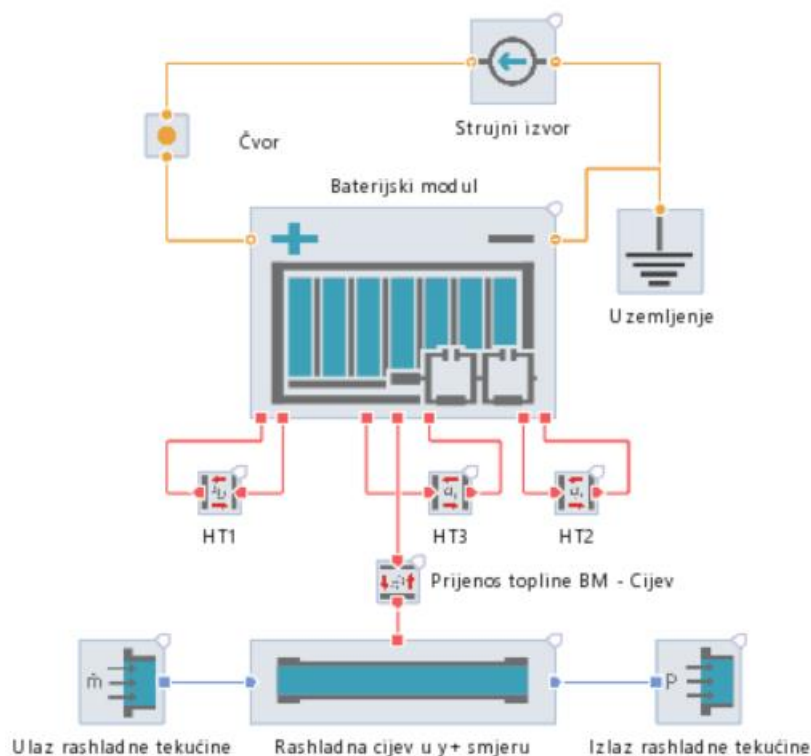
Baterijski modul korišten u ovom primjeru sastoji se od „stack-a“ koji se sastoji od ukupno 12 LG Chem E66A baterijskih ćelija, dvije kompresijske ploče kao i u prethodnom primjeru, no sada se između po dvije baterijske ćelije nalazi i rashladna ploča od aluminija debljine 1.5 mm koja je direktno povezana sa rashladnom cijevi. Kućište je načinjeno od aluminija i sastoji se od ploča debljine 2 mm oko baterijskog modula, no u ovom slučaju donja strana kućišta odnosno z- ploča nije direktno povezana sa „stack-om“ putem termalne paste, već između „stack-a“ i z- ploče postoji zračni raspor.



Slika 23. Baterijski modul i rashladna ploča (konfiguracija 2)

4.2.2. Termalne konekcije

Kako bi simulirali prijenos topline putem rashladnih ploča prikazan skicom iz poglavlja 4.2.1. potrebno je povezati donju z- ploču kućišta sa rashladnom cijevi putem komponente prijenosa topline kao i u 4.1. primjeru. No potrebno je postaviti adekvatan kontaktni toplinski otpor između z- ploče i „stack-a“. Te je potrebno direktno povezati donje ćelije „stack-a“ koje predstavljaju rashladne ploče sa z- pločom putem komponenti prijenosa topline.



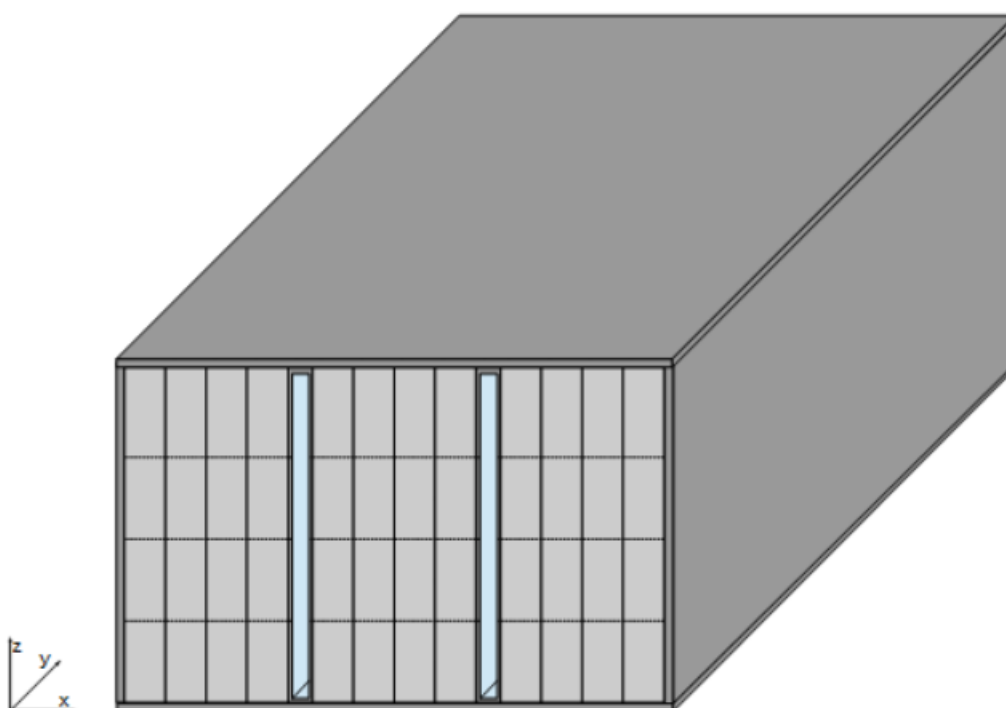
Slika 24. Simulacijski model (konfiguracija 2)

Električni krug i strujanje fluida jednako je kao i u prethodnom simulacijskom primjeru.

4.3. Simulacija hlađenja baterijskog modula preko rashladnih ploča unutar „stack-a“

4.3.1. Baterijski modul

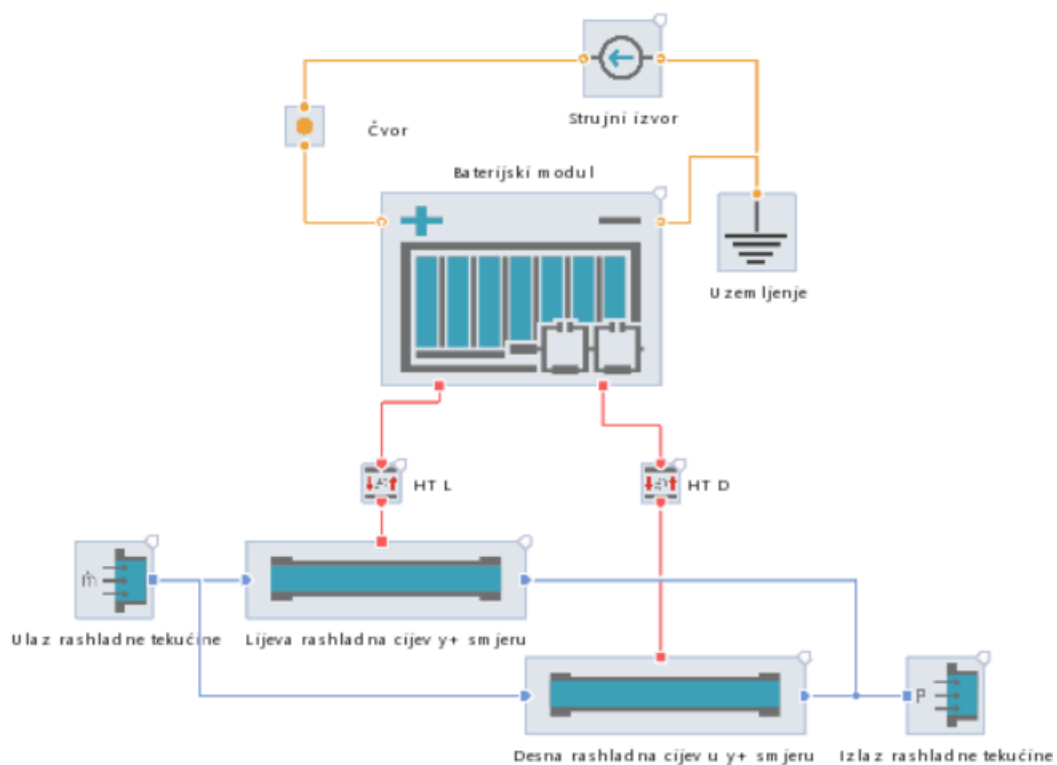
Baterijski modul korišten u ovom primjeru sastoji se od „stack-a“ koji se sastoji od ukupno 12 LG Chem E66A baterijskih ćelija, no sada su na mjesto kompresijskih ploča postavljene dvije rashladne cijevi koje su u direktnom kontaktu sa baterijskim ćelijama. Kućište je načinjeno od aluminijske ploče debljine 2 mm oko baterijskog modula.



Slika 25. Baterijski modul i rashladne ploče (konfiguracija 3)

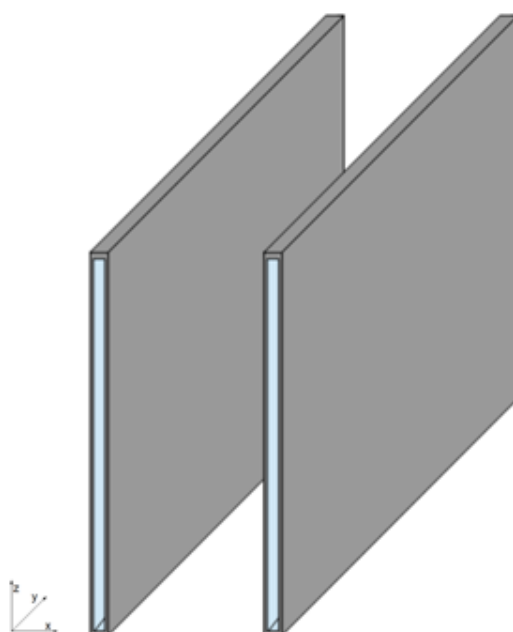
4.3.2. Termalne konekcije

Rashladne cijevi unutar baterijskog modula simuliramo tako da smo unutar komponente baterijskog modula definirali dvije aluminijske ploče koje predstavljaju volumen same cijevi, te su na taj volumen putem komponente toplinskog prijenosa povezane komponente cijevi koje predstavljaju unutrašnjost tih rashladnih ploča i tako prenose toplinu sa aluminijskih ploča na sebe. U ovom su slučaju bile potrebne dvije komponente rashladne cijevi.



Slika 26. Simulacijski model (konfiguracija 3)

U ovom primjeru imamo dvije rashladne ploče unutrašnjih dimenzija 4 x 340 x 100 mm.



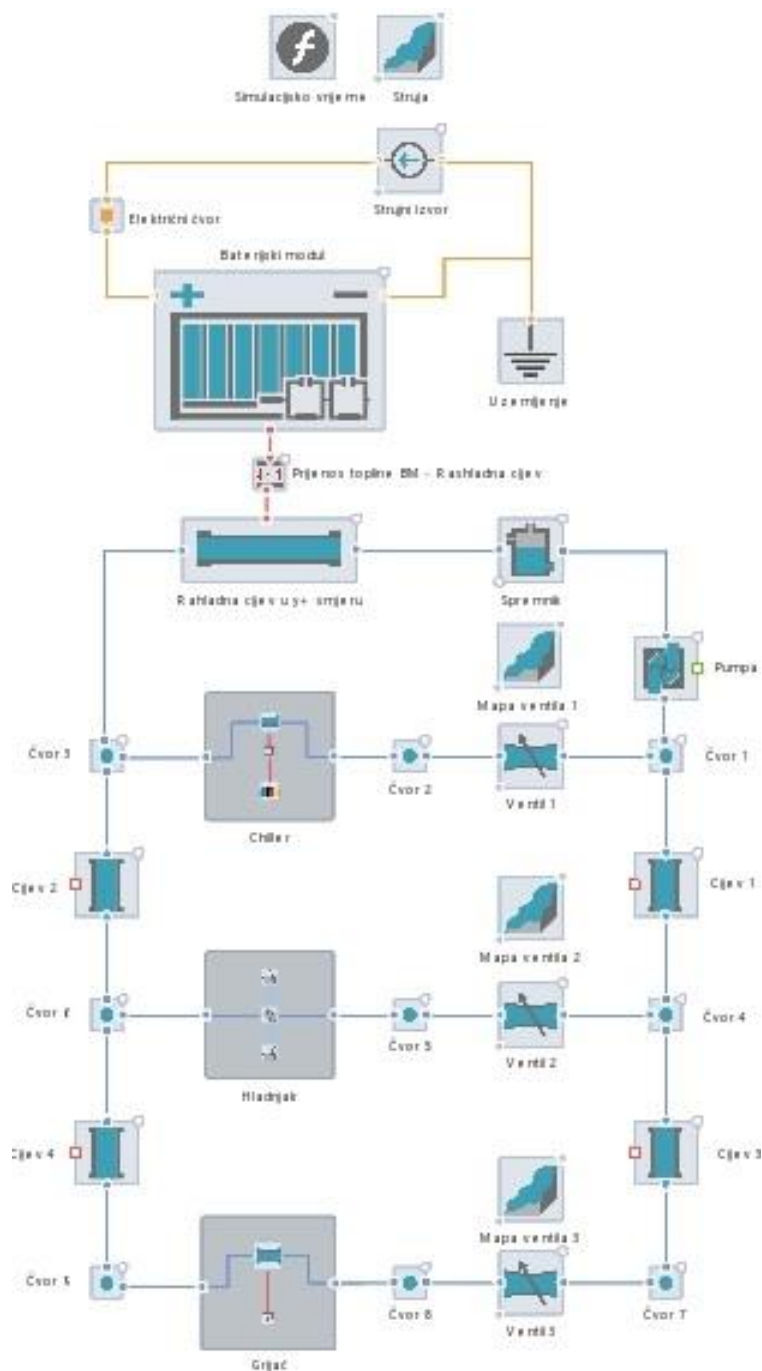
Slika 27. Rashladne ploče (konfiguracija 3)

4.4. Simulacija rashladnog kruga baterijskog modula

Kako bi držali baterijske ćelije na željenoj temperaturi u raznim uvjetima okoliša i pri željenom režimu vožnje ili punjenja, potrebno je osigurati željenu temperaturu rashladne tekućine na ulazu u rashladnu ploču. Željena temperatura rashladne tekućine postiže se preko 3 komponente u električnim automobilima, odnosno postoje 3 režima rada rashladnog kruga baterijskog modula:

1. Hlađenje preko hladnjaka koji hladi tekućinu uz pomoć protoka vanjskog zraka
2. Hlađenje preko isparivača, pomoću kojeg rashladna tekućina predaje toplinu AC klimatskom sustavu automobila
3. Grijanje preko električnog „grijača“

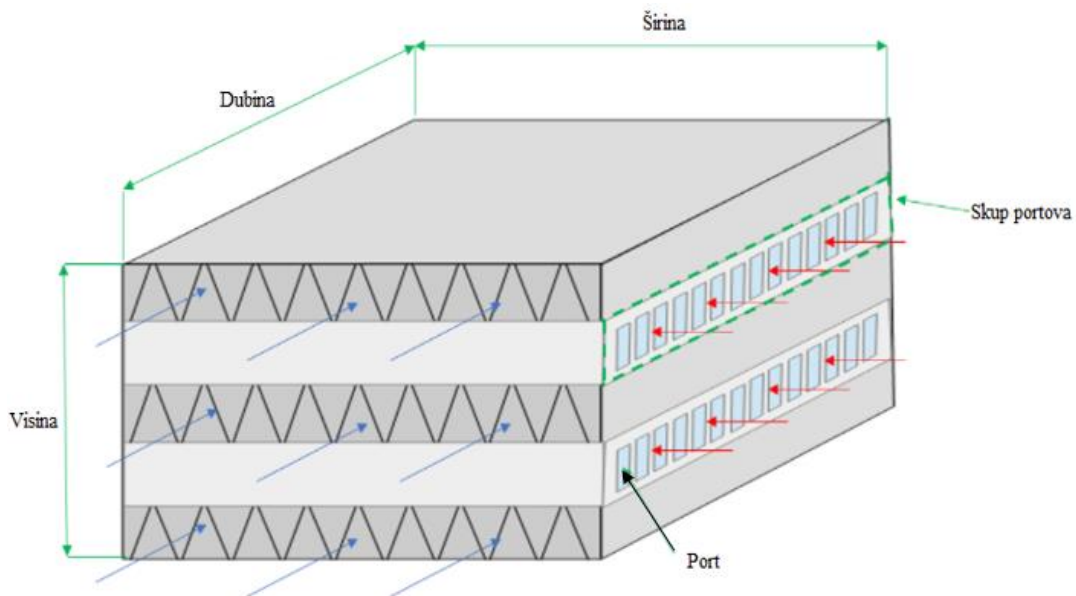
Pri pražnjenju baterija električnog automobila u normalnim okolišnim uvjetima i umjerenom režimu vožnje, za hlađenje rashladne tekućine koristi se hladnjak. Ukoliko postoji potreba za jačim odvođenjem topline, rashladnu je tekućinu potrebno hladiti putem isparivača. Unutar isparivača se toplina koju rashladna tekućina baterijskog modula predaje rashladnom fluidu AC klimatskog sustava automobila troši na isparavanje rashladnog fluida klimatskog sustava. Kako bi od baterije dobili maksimalne performanse i usporili njeno starenje potrebno ju je držati u temperaturnom rasponu od 15 °C do 35 °C. Ukoliko se automobil sa takvim baterijama nalazi u hladnijim krajevima gdje okolišne temperature mogu dosežati i -50 °C, baterije je za vrijeme rada potrebno što prije ugrijati na željenu temperaturu, što ne možemo postići toplinom koju proizvode same baterije. Tako je u rashladni krug hlađenja baterijskog modula uključen i grijač, koji se uključuje u uvjetima niske okolišne temperature kako bi što prije doveo baterijske ćelije na željenu temperaturu. Pomoću upravljanih ventila dovodimo sustav u željeni režim hlađenja rashladne tekućine.



Slika 28. Simulacijski model rashladnog kruga

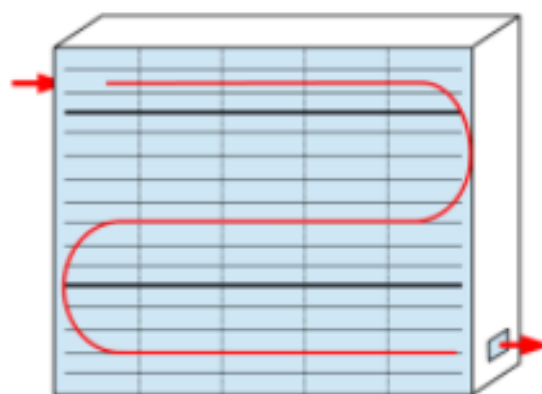
4.4.1. Hladnjak

Hladnjak u simulacijskom primjeru simuliramo uz pomoć „Cooling Package“ komponente koja predstavlja hladnjak automobila. U komponentu su uključene dvije domene strujanja, strujanje rashladne tekućine i strujanje zraka. Potrebno je definirati geometriju hladnjaka za obje domene.



Slika 29. Geometrija hladnjaka

Smjer strujanja zraka na gornjoj je slici prikazan plavim strelicama, dok je smjer strujanja rashladne tekućine prikazan crvenim strelicama. Potrebno je definirati dimenzije hladnjaka, ukupnu površinu kroz koju struji zrak, te broj portova u skupu i geometriju porta. Nakon toga je potrebno odrediti smjer strujanja rashladne tekućine, broj prolaza i broj skupa portova u pojedinim prolazima.



Slika 30. Smjer strujanja rashladne tekućine u hladnjaku

U sljedećoj tablici prikazati ćemo osnovne parametre korištene pri proračunu hladnjaka u ovom simulacijskom primjeru:

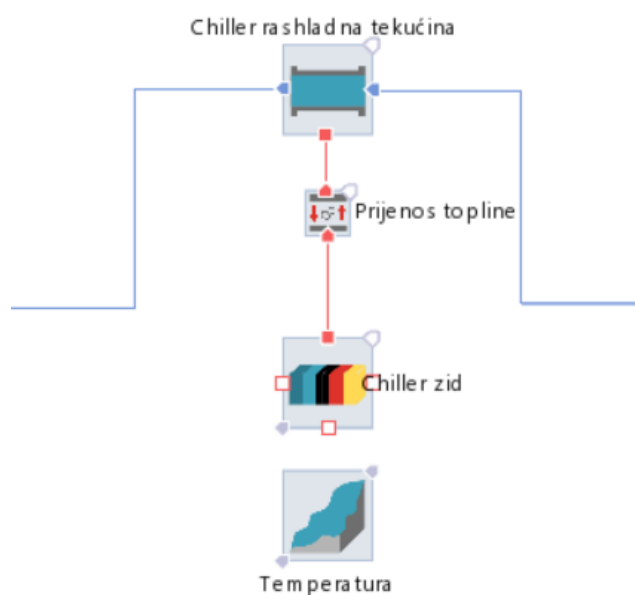
Tablica 7. Opis geometrije hladnjaka

Dimenzije	25 x 500 x 400 mm
Broj portova u skupu	10
Broj prolaza	3
Broj skupa portova u prolazu	10

Također je bilo potrebno dodati komponente ulaza i izlaza struje zraka i definirati njegovu temperaturu i protok mase zraka koji ovisi o brzini kretanja vozila.

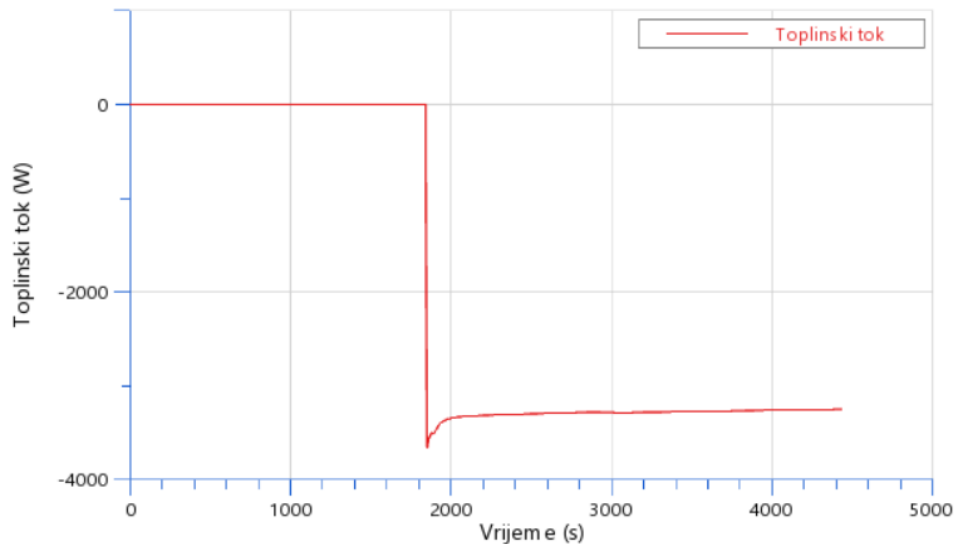
4.4.2. Isparivač

Isparivač je komponenta unutar koje se toplina koju rashladna tekućina baterijskog modula predaje rashladnoj tekućini AC klimatskog sustava automobila troši na isparavanje rashladnog fluida klimatskog sustava. Kako bi simulirali AC klimatski sustav automobila, potrebno je koristiti VLE domenu koja predstavlja proračune koji uključuju promjenu agregatnog stanja fluida. Takav je proračun poprilično računalno zahtjevan te je zbog toga u zasebnom primjeru izračunata temperatura plohe preko koje se toplina prenosi na rashladnu tekućinu.



Slika 31. Simulacijski model isparivača

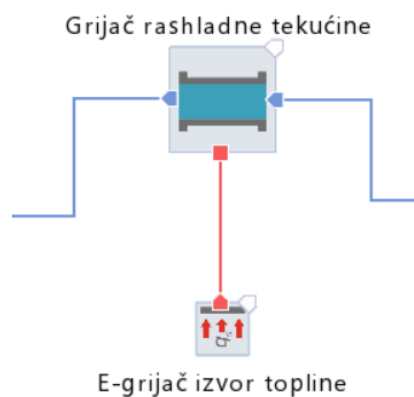
Tablica tako dobivene temperature je ubačena u ovaj simulacijski primjer, pošto nas ne zanimaju rezultati VLE domene. Što nam je omogućilo da isparivač simuliramo pomoću samo 4 komponente. Komponenta cijev koja predstavlja volumen rashladne tekućine preko koje se izmjenjuje toplina, zatim komponenta prijenosa topline i komponenta zid na koju je postavljena krivulja željene temperature.



Slika 32. Toplinski tok isparivača

4.4.3. Grijač

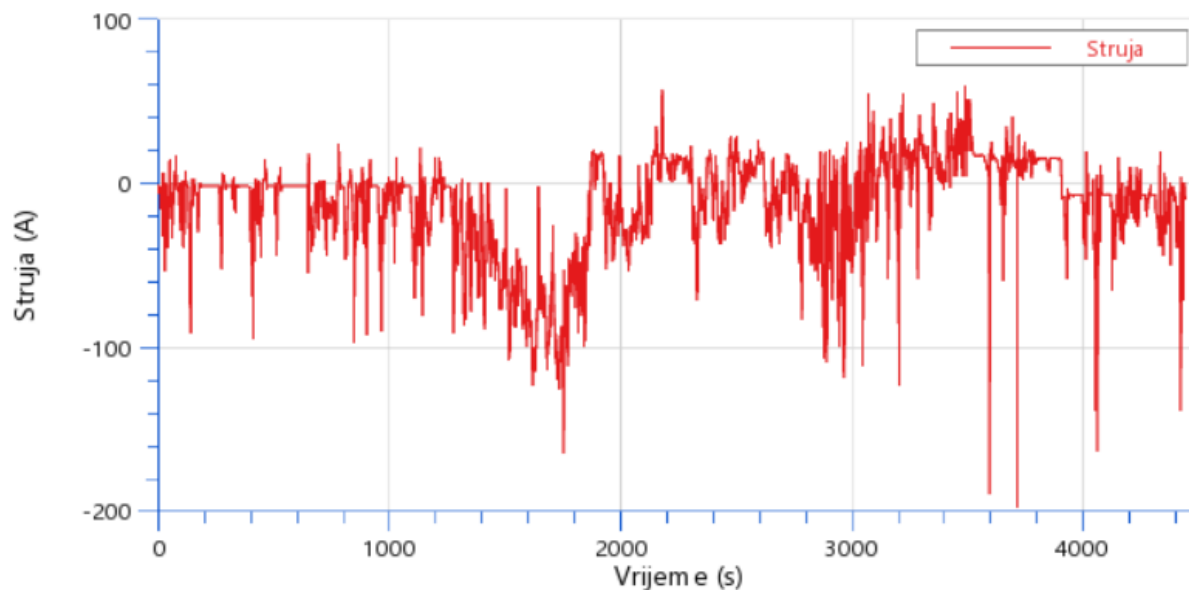
Grijač je u ovom primjeru simuliran pomoću komponente cijevi koja predstavlja volumen rashladne tekućine preko kojeg se prenosi toplina, te komponente izvora topline, na koju se direktno zadaje iznos toplinskog toka koji prelazi na rashladnu tekućinu.



Slika 33. Simulacijski model grijača

4.4.4. Električni krug

Unutar ovog simulacijskog primjera, na baterijski modul je postavljen strujni izvor koji simulira stvarni ciklus vožnje. Prikazani ciklus predstavlja putovanje automobilom od Graz-a do Gleisdorf-a.



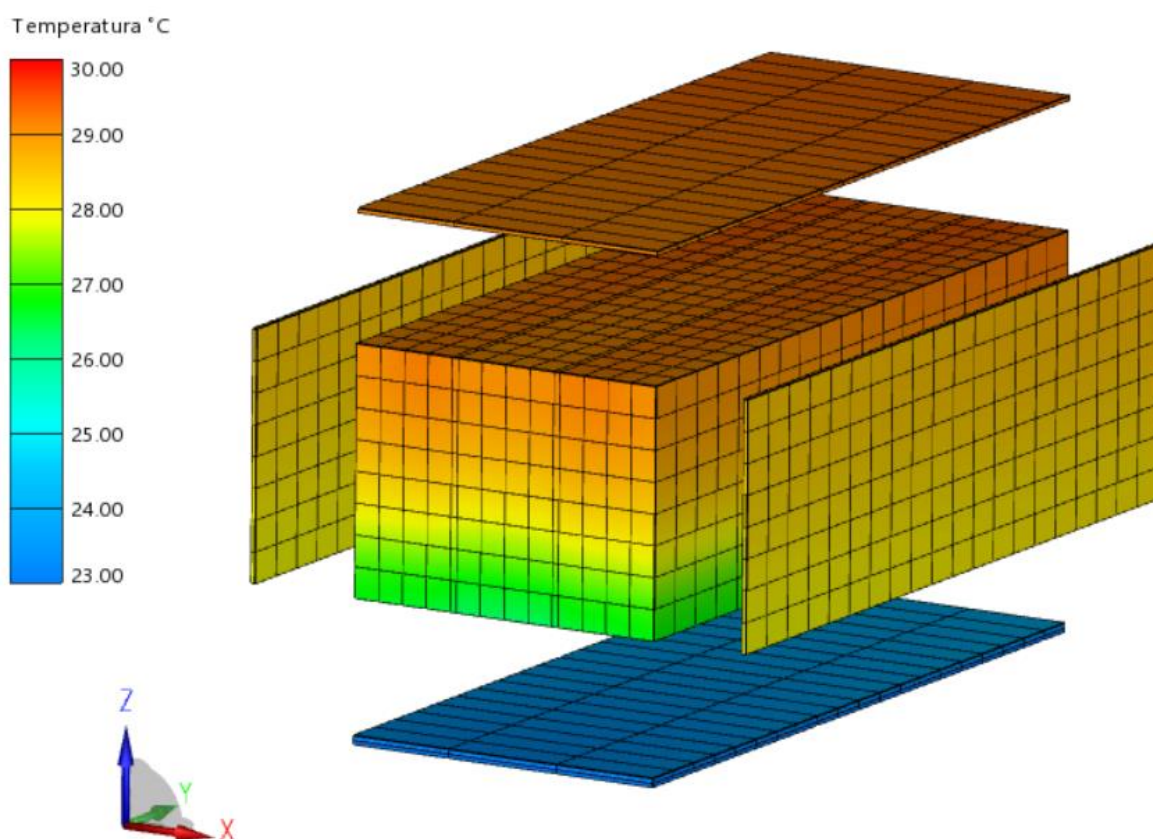
Slika 34. Struja u bateriji pri stvarnom ciklusu vožnje

5. REZULTATI

Rezultati su prikazani unutar Cruise M softvera koji sadrži dio za post-procesiranje rezultata. Prikazati ćemo krivulje rezultata kao što su temperature pojedinih ćelija, stanje napunjenosti baterije, količina izmijenjene topline između rashladne ploče i baterijskog modula u ovisnosti o vremenu. Te nam komponenta baterijskog modula nudi mogućnost praćenja 3D rezultata temperaturne raspodjele unutar baterijskog modula.

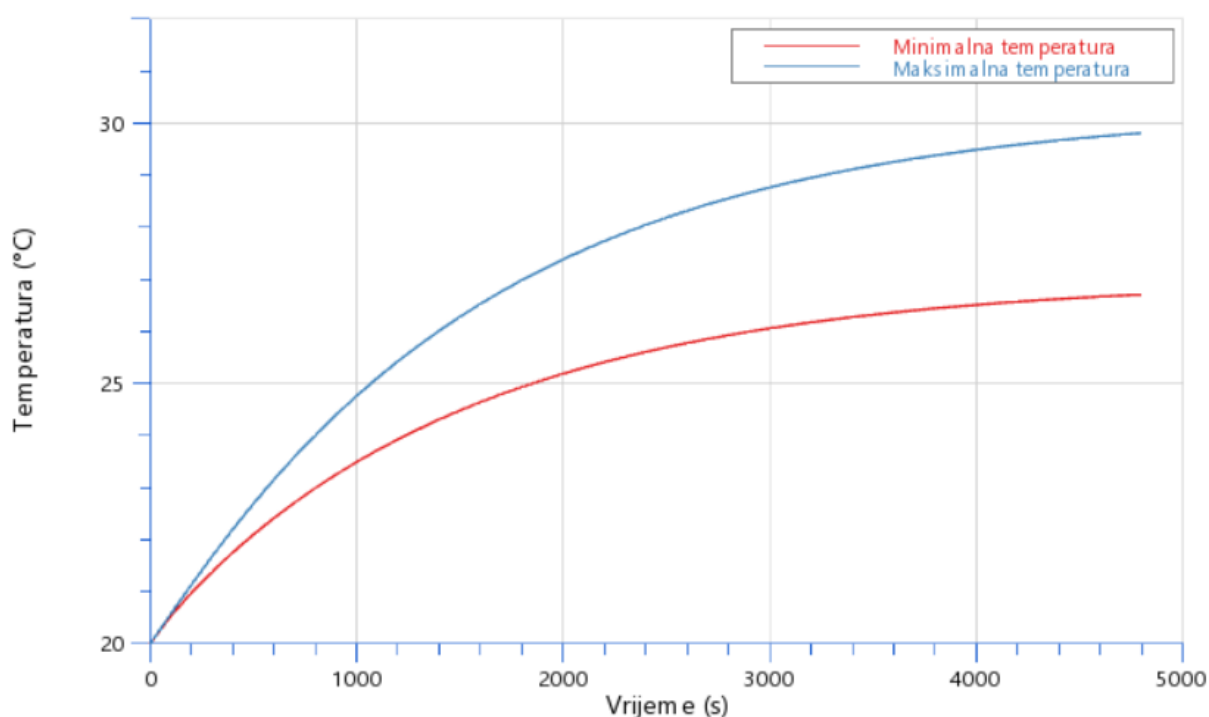
5.1. Rezultati simulacije hlađenja baterijskog modula preko donje plohe kućišta

Krivulje će prikazivati rezultate u ovisnosti o vremenu, dok će 3D raspodjela temperature u baterijskom modulu biti prikazana u trenutku završetka simulacije. Prvo ćemo prikazati 3D raspodjelu temperature na „stack-u“ i kućištu baterijskog modula pri protoku mase rashladne tekućine od 0.02 kg/s.



Slika 35. Temperaturna raspodjela na baterijskom modulu, konfiguracija 1

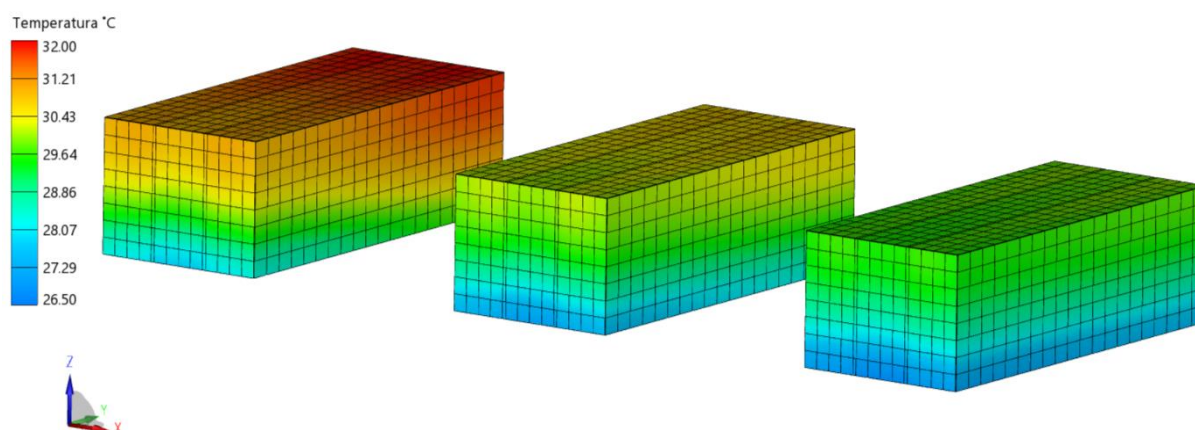
Sa slike je vidljivo kako je donja ploha kućišta baterijskog modula značajno hladnija od ostatka modula. Te je tako raspoređena i temperatura unutar samog „stack-a“ i zbog toga dolazi do razlika u temperaturi unutar samih baterijskih ćelija, pa tako i unutar cijelog baterijskog modula. Vidimo da pri ovakvom načinu rada i vanjskim uvjetima baterijskog modula, temperatura ćelija ostaje u željenom rasponu od 15 °C do 35 °C. Sljedeća slika prikazati će maksimalnu i minimalnu temperaturu baterijske ćelije u ovisnosti o vremenu, simulacija je provedena za upotrebu baterijskog modula pri konstantnim vanjskim uvjetima i opterećenju u trajanju od 4800 sekundi, koliko je potrebno da se baterijski modul potpuno isprazni pri 0.75C opterećenju.



Slika 36. Temperaturna baterijskih ćelija

Ukoliko baterijski modul pri ovakvom strujnom opterećenju ne bi imao sustav hlađenja, tada bi baterijske ćelije dostigle temperaturu od 48.5 °C na kraju provedene simulacije.

Simulaciju smo proveli za 3 vrijednosti protoka navedenih u poglavlju 4.1., pa ćemo prikazati 3D raspodjele temperature za dane protoke na „stack-u“ baterijskog modula.



Slika 37. Raspodjela temperatura na baterijskom "stack-u" pri protocima rashladne tekućine od 0.005, 0.01 i 0.02 kg/s

Prvi baterijski „stack“ s lijeva prikazuje raspodjelu temperature na kraju simulacije pri protoku od 0.005 kg/s, na tom primjeru naravno vidimo i najveći gradijent temperature u y smjeru, odnosno u smjeru strujanja rashladne tekućine. Zatim je u sredini prikazan primjer simuliran pri protoku od 0.01 kg/s, te već prikazani primjer pri protoku od 0.02 kg/s na desnoj strani.

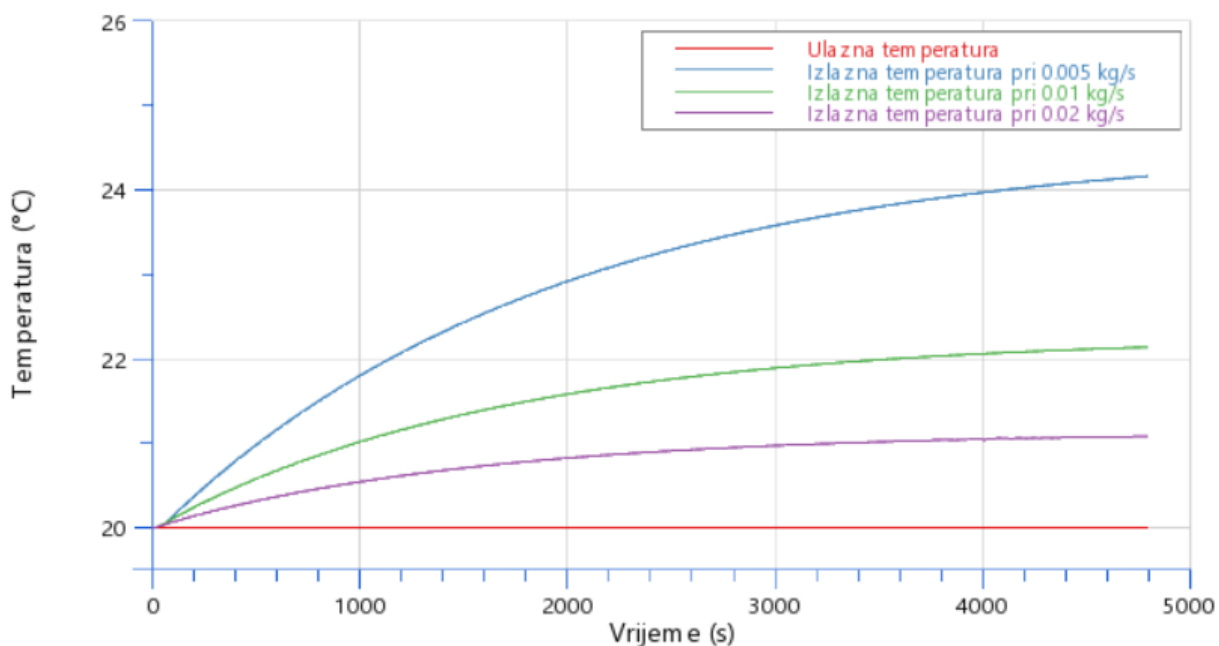
Sljedeća tablica prikazuje vrijednosti minimalne i maksimalne temperature te maksimalne temperaturne razlike unutar baterijskog modula.

Tablica 8. Temperature baterijskih ćelija u ovisnosti o protoku

Protok [kg/s]	Minimalna temperatura baterijskih ćelija [°C]	Maksimalna temperatura baterijskih ćelija [°C]	Maksimalna razlika temperatura unutar modula [°C]
0.005	27.81	31.78	3.97
0.01	27.12	30.53	3.41
0.02	26.71	29.81	3.10

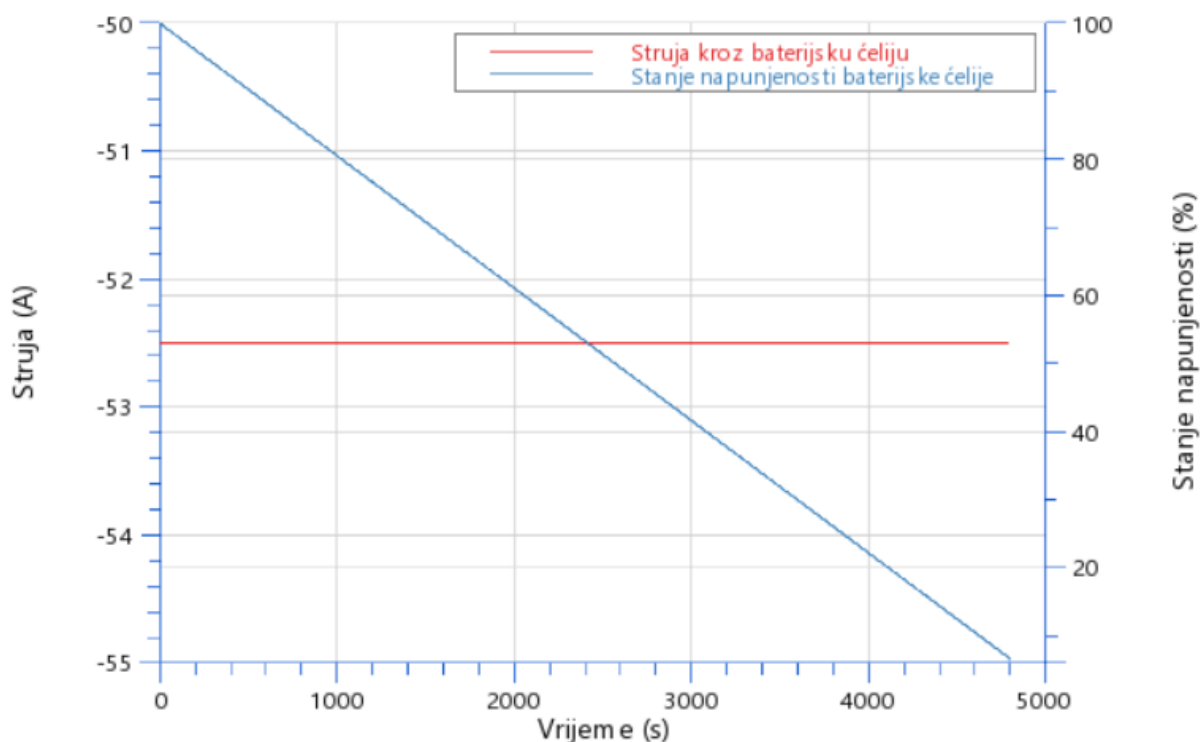
Kako iz slika, tako i iz tablice možemo primijetiti da za najmanji protok dobivamo najveću temperaturnu razliku, zbog veće temperaturne razlike rashladne tekućine unutar rashladne cijevi. Također su u ovom primjeru povećane minimalna i maksimalna temperatura, jer kako je objašnjeno u poglavlju 2.5., izmijenjena toplina između rashladne ploče i baterijskog modula direktno ovisi o protoku mase rashladne tekućine.

Također ćemo prikazati krivulje promjene temperature rashladne tekućine na ulazu i izlazu iz rashladne cijevi u ovisnosti o vremenu i protoku rashladne tekućine.



Slika 38. Temperatura rashladne tekućine u ovisnosti o protoku

Kao što je već spomenuto simulacijski primjer predstavlja vožnju automobila konstantnom brzinom po ravnoj podlozi, što znači da kroz baterije teče konstantna struja. Pri takvim uvjetima, dani primjer predstavlja linearno pražnjenje baterije. U stvarnosti bi brzina pražnjenja baterijskih ćelija ovisila o stanju napunjenosti, struji i njihovoj temperaturi. Za modeliranje stvarnog modela pražnjenja baterijskih ćelija trebali bi imati eksperimentalne podatke baterijske ćelije koju koristimo u modelu. No pošto se u ovom radu fokusiramo na toplinski proračun baterijskih ćelija, zadovoljiti ćemo se jednostavnim modeliranjem električnog kruga pomoću metode ekvivalentnog modela strujnog kruga.

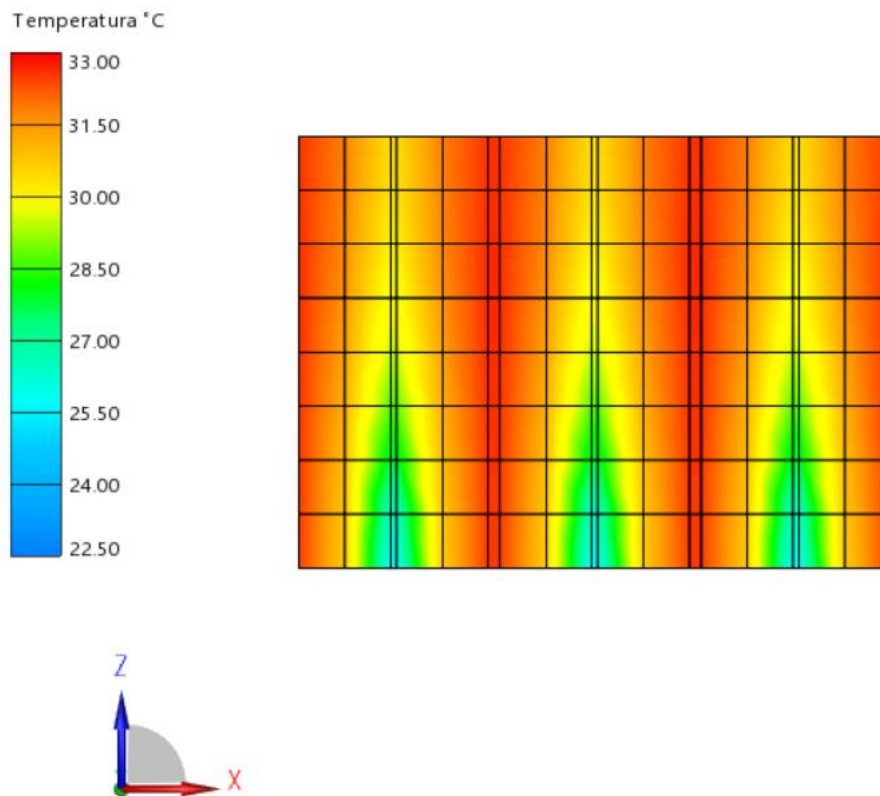


Slika 39. Struja i stanje napunjenosti baterije

Pri ovakvom strujnom naporu na baterijske ćelije, svaka baterijska ćelija ispušta otprilike 8.25 W topline kao rezultat otpora. Što znači da kada bi trebali odvoditi oko 100 W topline sa baterijskog modula kako bi njihovu srednju temperaturu baterijskih ćelija držali konstantnom, pošto se u baterijskom modulu nalazi 12 baterijskih ćelija.

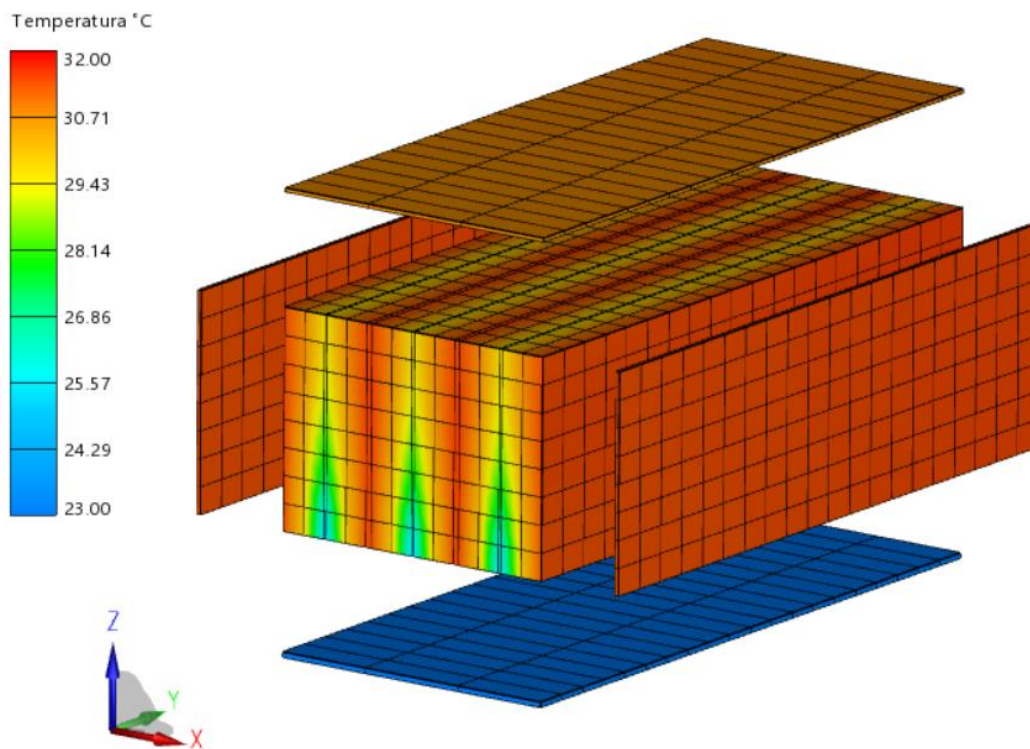
5.2. Rezultati simulacije hlađenja baterijskog modula preko donje plohe uz pomoć rashladnih ploča unutar „stack-a“

Sljedeća slika prikazuje 3D raspodjelu temperature na prednjoj plohi „stack-a“ baterijskog modula pri hlađenju uz pomoć rashladnih ploča unutar „stack-a“. Jasno je vidljivo kako se toplina odvodi upravo putem rashladnih ploča, te slično kao i u prošlom primjeru, temperatura baterijskih ćelija je najmanja na dnu baterijskog modula, ovaj puta direktno uz rashladne ploče od aluminijske. Ova simulacija provedena je za protok od 0.02 kg/s.



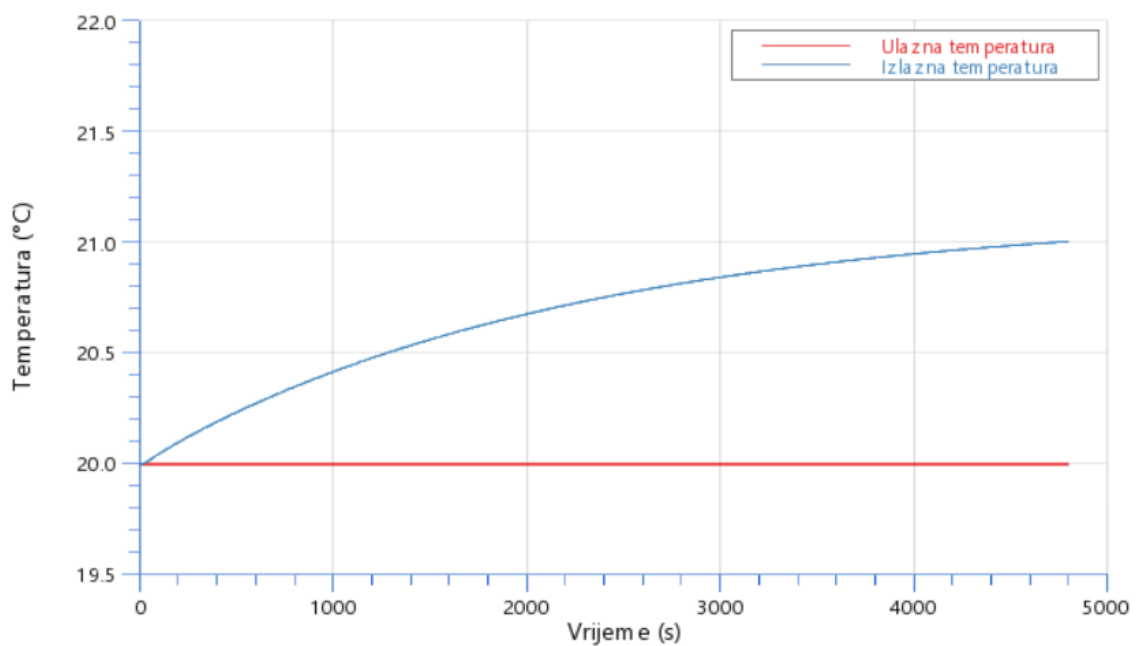
Slika 40. Temperatura prednje plohe „stack-a“ na završetku simulacije

Prikazati ćemo i raspodjelu temperature na čitavom baterijskom modulu, kako bi prikazali da se toplina odvodi preko donje plohe kućišta i aluminijskih rashladnih ploča unutar „stack-a“. Možemo primijetiti da u ovom primjeru baterijske ćelije postižu veću temperaturu nego u prošlom primjeru. Iako ovakav pristup donosi 3 nova sloja unutar „stack-a“ i zahtjeva da su ta tri sloja zavarena za donju plohu kućišta, u ovom primjeru nema potrebe za dodatnim slojevima na donjoj plohi kućišta koji omogućuju bolji prijenos topline između baterijskih ćelija i rashladne cijevi, kao što je to bio slučaj u prethodnom primjeru sa termalnom pastom.



Slika 41. Temperaturna raspodjela na baterijskom modulu, konfiguracija 2

Prikazati ćemo i krivulje temperature rashladne tekućine na ulazu i na izlazu iz rashladne ploče.

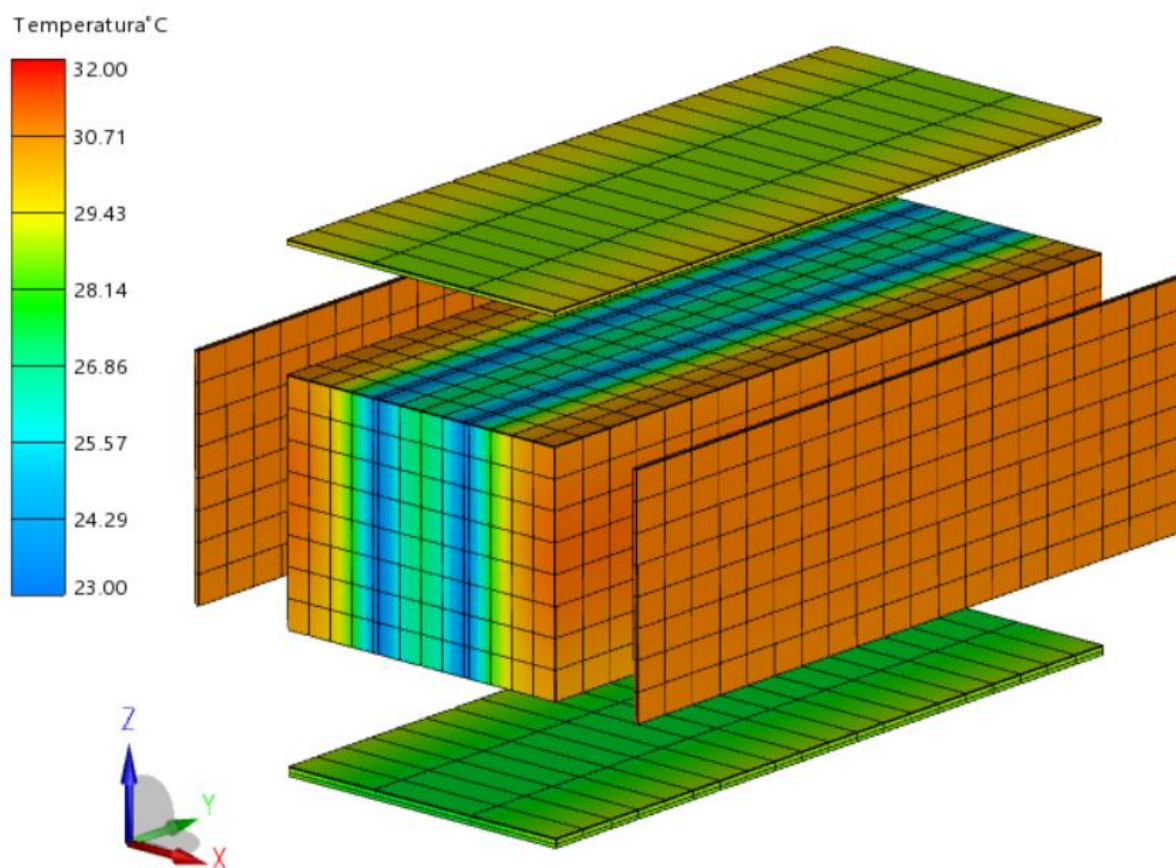


Slika 42. Temperatura rashladne tekućine

5.3. Rezultati simulacije hlađenja baterijskog modula preko rashladnih ploča unutar „stack-a“

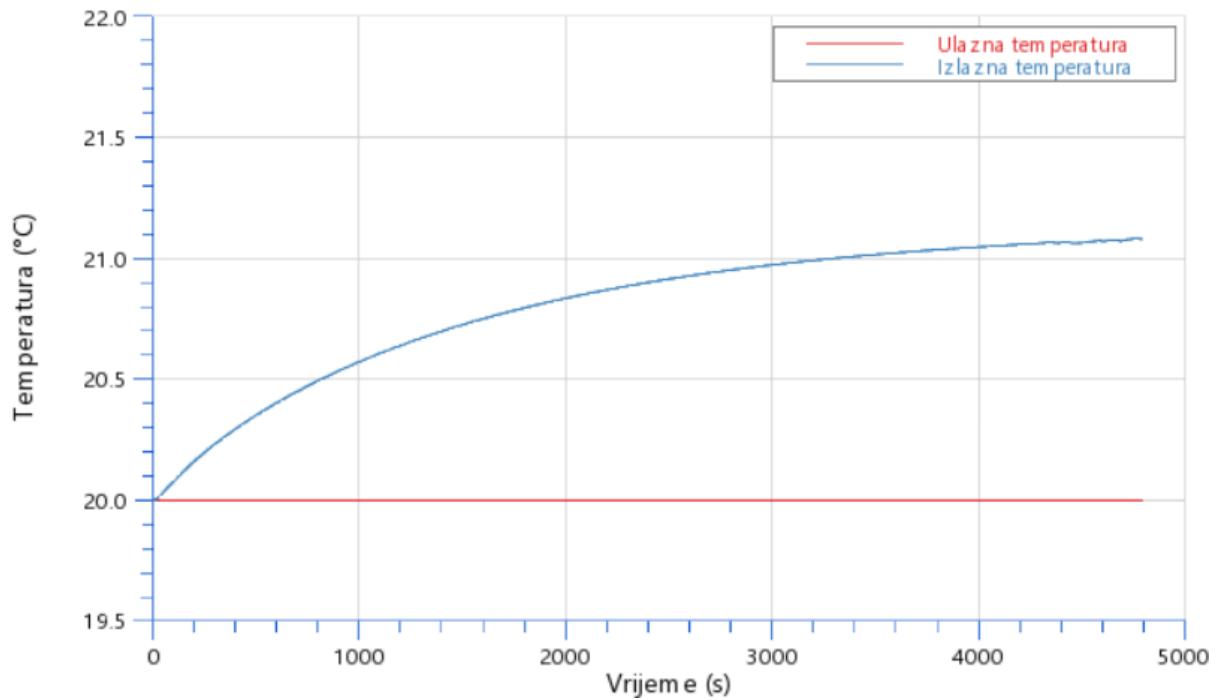
Sljedeći primjer predstavlja konstrukcijski najkompliciraniji slučaj hlađenja baterijskih ćelija, zbog potrebe za značajnim konstrukcijskim izmjenama na samim kućištima baterijskih modula. Također bi u ovakvoj izvedbi baterijski moduli bili znatno širi od onih u prethodna dva primjera, no pošto u ovom slučaju rashladne ploče nisu smještene ispod baterijskog modula možemo ih smjestiti niže, što bi spustilo ukupno težište automobila i time bi poboljšali dinamiku vozila.

Slika 43. prikazuje raspodjelu temperature unutar „stack-a“ baterijskog modula. Simulacija je također provedena za protok od 0.02 kg/s. Vidimo kako u ovom primjeru toplinu odvodimo u smjeru slaganja baterijskih ćelija i time dobivamo bolju ujednačenost temperature unutar pojedinih baterijskih ćelija, no i dalje je prisutna značajna temperaturna razlika unutar samog baterijskog modula.



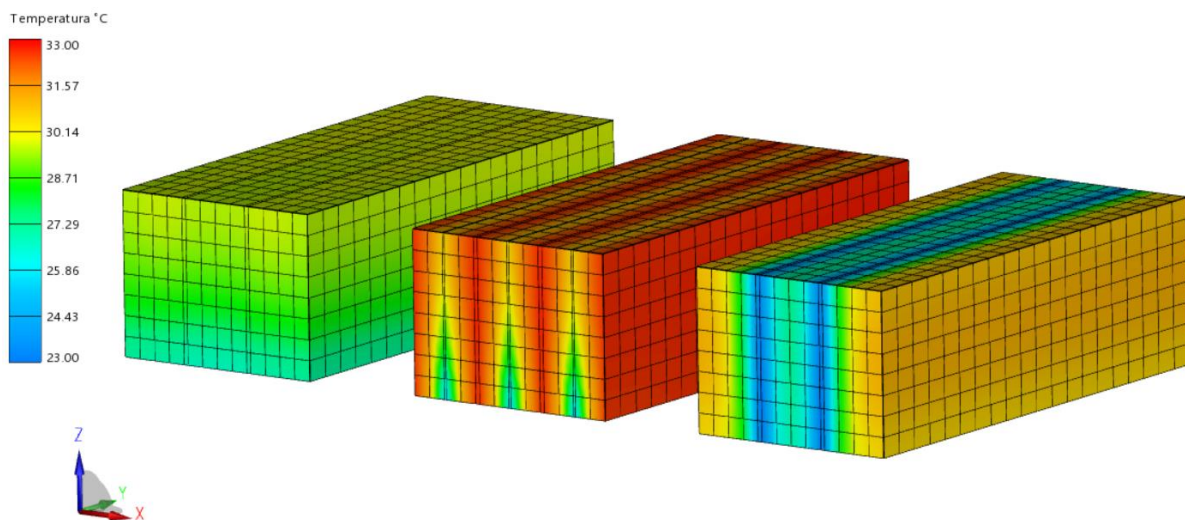
Slika 43. Raspodjela temperature na baterijskom modulu, konfiguracija 3

Kao i u prethodnim primjerima, prikazati ćemo i krivulju temperature rashladne tekućine na ulazu i na izlazu iz rashladne ploče.



Slika 44. Temperatura rashladne tekućine, konfiguracija 3

Unutar ovog poglavlja prikazati ćemo i usporedbu već prikazanih konfiguracija rashladnih ploča baterijskog modula pri protoku rashladne tekućine od 0.02 kg/s. Sljedeća slika prikazuje 3 baterijska „stack-a“ koji predstavljaju pojedine konfiguracije hlađenja baterijskog modula pri temperaturnoj skali od 23 °C do 33 °C u zadnjem vremenskom koraku provedene simulacije.



Slika 45. Usporedba temperaturne raspodjele pri prikazanim konfiguracijama

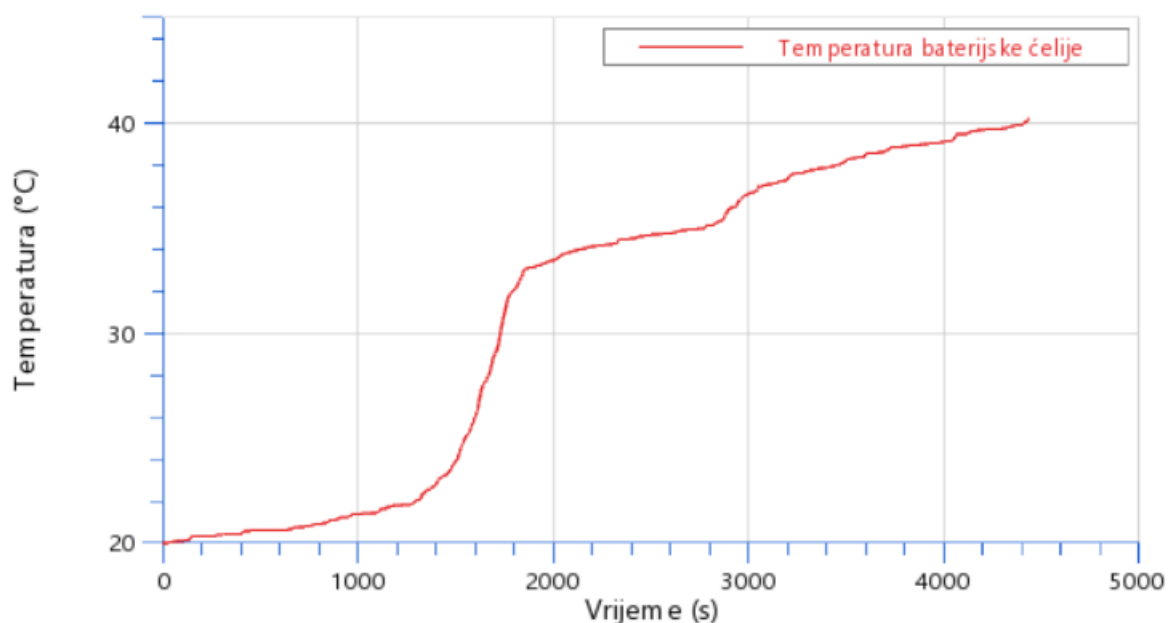
Iz tablice 9, pa tako i sa prikazane slike 44, vidljivo je da model sa hlađenjem baterijskog modula preko donje plohe nudi najefikasnije rješenje hlađenja, pošto pri takvoj konfiguraciji dobivamo najmanju srednju temperaturu baterijskog modula, te najmanju temperaturnu razliku unutar modula. Model sa hlađenjem preko donje plohe pomoću rashladnih ploča unutar „stack-a“ daje najvišu prosječnu temperaturu modula, razlog tomu je mala površina preko koje se toplina prenosi na „stack“. Konfiguracija 2 bi se mogla značajno poboljšati dodavanjem više rashladnih ploča unutar „stack-a“, te korištenjem legura koje provode toplinu bolje od aluminija. Zatim je prikazan model sa hlađenjem pomoću rashladnih cijevi unutar „stack-a“ koji nam daje poprilično dobru ujednačenost temperature unutar pojedinih baterijskih ćelija, no u ovom primjeru dobivamo najveću maksimalnu razliku temperatura unutar čitavog baterijskog modula. Zadnja prikazana konfiguracija se također može poboljšati tako da se smanji širina rashladne cijevi, te se takva rashladna cijev postavi uz svaku ili svaku drugu baterijsku ćeliju.

Tablica 9. Usporedba temperatura pri prikazanim konfiguracijama

Konfiguracija	Minimalna temperatura baterijskih ćelija [°C]	Maksimalna temperatura baterijskih ćelija [°C]	Maksimalna razlika temperatura unutar modula [°C]
1	26.71	29.81	3.10
2	29.26	32.75	3.49
3	27.06	31.06	4.00

5.4. Rezultati simulacije rashladnog kruga baterijskog modula

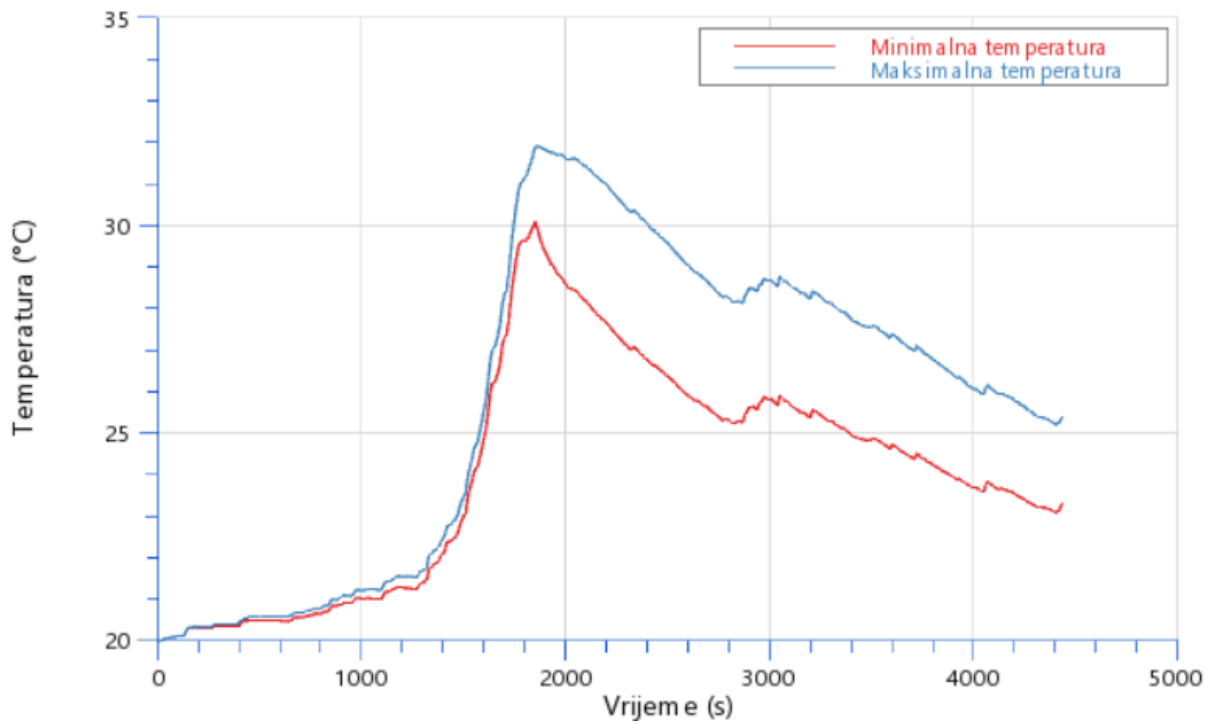
Prva provedena simulacija rashladnog kruga uključuje hlađenje baterijskog modula putem hladnjaka, sve dok se ne postigne visoka temperatura, nakon čega se promjenom pozicija ventila rashladna tekućina počinje hladiti putem isparivača



Slika 46. Temperatura baterijskih ćelija bez sustava hlađenja

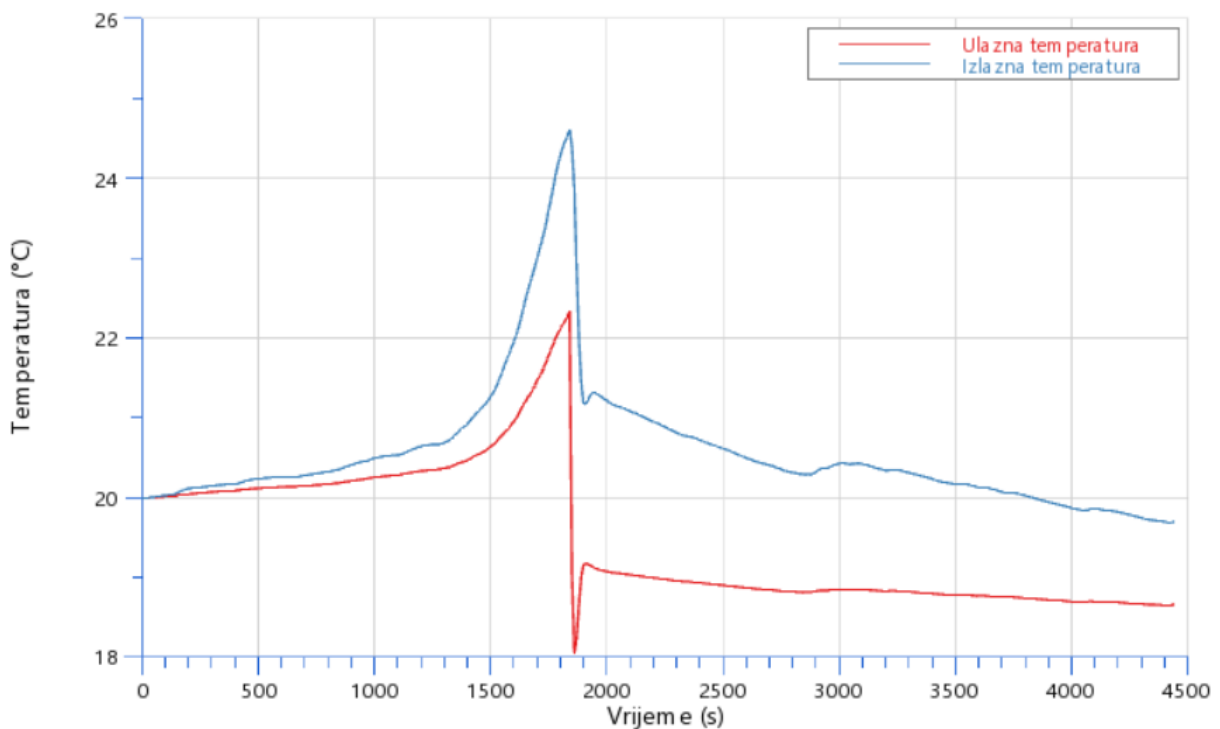
Ukoliko pri ciklusu vožnje prikazanom u poglavlju 4.4.4. ne koristimo sustav hlađenja baterijskog modula, tada na kraju ciklusa temperatura baterijskih ćelija dostiže temperaturu od preko 40 °C, te temperatura prelazi 35 °C već na polovici ciklusa, kao što je prikazano na prethodnoj slici.

No kada koristimo sustav hlađenja, tada temperatura baterijskih ćelija ostaje u željenom temperaturnom rasponu. Baterijski modul se u ovom slučaju hladi putem hladnjaka sve dok minimalna temperatura unutar baterijskog modula ne dosegne temperaturu od 30 °C, nakon toga sustav hlađenja prelazi na hlađenje pomoću isparivača.



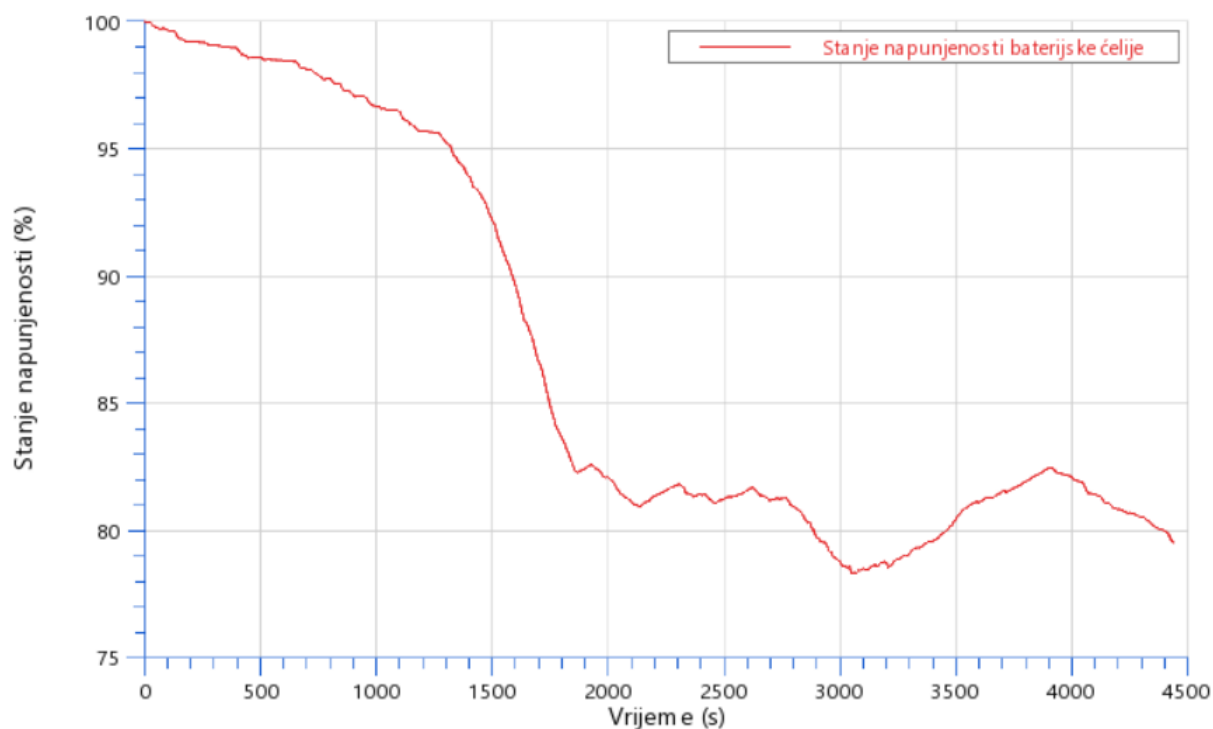
Slika 47. Temperatura baterijskih ćelija uz uključen rashladni krug

Na temperaturi rashladne tekućine jasno je vidljivo u kojem se trenutku uključuje hlađenje putem isparivača



Slika 48. Temperatura rashladne tekućine

Prikazati ćemo i stanje napunjenosti baterije u ovisnosti o vremenu simulacije, gdje je potrebno napomenuti da nam dani strujni profil prikazuje vožnju automobila pri korištenju maksimalne regeneracije energije prilikom kočenja. Odnosno za kočenje automobila se u značajnom postotku koriste elektromotori koji prilikom usporavanja automobila pune baterijske ćelije.



Slika 49. Stanje napunjenosti baterije

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je prikazati ponašanje baterijskog modula pri različitim konfiguracijama hlađenja, te opisati čitavi rashladni krug baterijskog modula u električnim vozilima. Na temelju analizirane literature i tehnologija koje se trenutno koriste u autoindustriji izrađena su tri simulacijska modela sa različitim konfiguracijama hlađenja i konstrukcije samog baterijskog modula. Također je izrađen i model čitavog rashladnog kruga baterijskog modula sa konfiguracijom hlađenja koja se pokazala optimalnom. Model rashladnog kruga uključuje i komponente preko kojih se rashladna tekućina hladi u električnim automobilima, te stvarni ciklus vožnje na kojem je prikazan mogući način rada sustava za upravljanje temperaturom baterijskih ćelija.

Primjenom numeričke simulacije koja se temelji na jednodimenzionalnom proračunu strujanja fluida, gdje je rashladna cijev diskretizirana samo u smjeru strujanja, te trodimenzionalnom proračunu kondukcijske izmjene topline unutar baterijskog modula koji je podijeljen na kontrolne volumene, napravljen je proračun hlađenja baterijskog modula rashladnom tekućinom. U prvom su primjeru prikazani rezultati za tri različite vrijednosti protoka mase rashladne tekućine. Prvi primjer konfiguracije hlađenja baterijskog modula putem donje plohe se ujedno pokazao kao najučinkovitiji, jer kako je prikazano, daje najnižu srednju temperaturu baterijskih ćelija, a ujedno i najmanju temperaturnu razliku unutar baterijskog modula što je izuzetno bitno za performanse automobila, a i vijek trajanja baterijskih ćelija. Drugi primjer konfiguracije hlađenja baterijskog modula putem donje plohe preko rashladnih ploča unutar baterijskog modula se pokazao kao najlošiji, zbog najveće prosječne temperature, no pri zadanim uvjetima i protoku, baterijski modul i u ovom primjeru ostaje u željenom temperaturnom rasponu. Treći primjer nudi hlađenje koje nam daje najveću temperaturnu razliku unutar baterijskog modula, no i u ovom primjeru, za zadane uvjete i protok, dobivamo njenu vrijednost unutar željenog temperaturnog raspona.

Na kraju je izrađen i prikazan simulacijski model čitavog rashladnog kruga kakav je moguće koristiti u električnim vozilima. Model uključuje baterijski modul prikazan u prvom primjeru konfiguracije hlađenja putem donje plohe i uređaje za hlađenje/grijanje rashladne tekućine. Unutar rashladnog kruga je moguće regulirati željene načine rada odnosno hlađenja pomoću ventila., te je prikazana moguća regulacija sustava upravljanja temperaturom baterija za zadane vanjske uvjete i prikazani ciklus vožnje.

LITERATURA

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [2] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [3] Virag, Z., Šavar, M., Džijan, I.: Mehanika fluida I predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [4] Virag, Z., Šavar, M., Džijan, I.: Mehanika fluida II predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [5] Cruise M User Manual
- [6] BATEMO <https://www.batemo.de/products/batemo-cell-library/e66a/>
- [7] PORSCHE <https://newsroom.porsche.com/en/products/taycan/battery-18557.html>
- [8] Ibrahim Dincer, Halil S. Hamut, Nader Javani: Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems

PRILOZI

I. CD-R disc