



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje



Jelena Križaić, Iva Mraz

Numerička i eksperimentalna analiza hlađenja baterijskog modula električnog vozila

Zagreb, 2025.

Ovaj rad izrađen je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (FSB) pod vodstvom mentora, prof. dr. sc. Vladimira Solde na Zavodu za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2024./2025.

Jelena Križaić, Iva Mraz

SADRŽAJ

SADRŽAJ	3
POPIS SLIKA	4
POPIS KRATICA.....	6
1. MOTIVACIJA	7
2. PREGLED LITERATURE.....	9
3. CILJEVI I HIPOTEZA RADA	11
4. TEORIJSKE OSNOVE ELEKTRIČNIH VOZILA.....	12
4.1 Baterijski sustavi	13
4.2 Litij-ionske ćelije.....	13
4.3 Kapacitet baterija u električnim vozilima	15
5. HLAĐENJE BATERIJA	17
5.1 Utjecaj temperature na performanse baterija.....	17
5.2 Vrste toplinskog upravljanja baterijskog sustava	20
6. EKSPERIMENTALNI POSTAV I REZULTATI MJERENJA	22
7.1 Krug radne tvari	23
7.2 Hidraulički krug	26
7.3 Obrada mjernih podataka	27
7. SIMULACIJSKI MODEL I REZULTATI SIMULACIJE	32
7.1 Detaljan model ćelije.....	32
7.2 Model bloka baterije.....	36
8. USPOREDBA REZULTATA I RASPRAVA.....	46
9. ZAKLJUČAK	49
10. ZAHVALA	50
SAŽETAK	51
SUMMARY	52
POPIS LITERATURE.....	53

POPIS SLIKA

Slika 1 Električno vozilo na baterijski pogon [22].....	12
Slika 2 Raspon gustoće energije i gustoće snage Li-ion baterija [26].....	14
Slika 3 Formati Li-Ion ćelija: male i velike cilindrične, vrećaste i prizmatične [28]	15
Slika 4 Graf koji prikazuje promjenu amper-satnog kapaciteta nominalno 42 Ah baterije. Ovaj graf temelji se na mjeranjima olovno-kiselinske vučne baterije proizvođača Hawker Energy Products Inc. [22]	16
Slika 5 Prikaz posljedica toplinskog bijega baterije [31]	17
Slika 6 Formiranje toplinskog bijega i topljenje pojedinih komponenti baterije [33]	18
Slika 7 Primjer grafičkog prikaza rezultata CFD simulacije temperaturnog polja baterijskog paketa [19].....	19
Slika 8 Klasifikacija BTMS-a	20
Slika 9 Shema eksperimentalnog postava	22
Slika 10 Eksperimentalni postav za vrijeme mjerenja	22
Slika 11 Pozicije termopara na baterijskom modulu	28
Slika 12 Prikaz ugrađenog termopara 2 na baterijskoj ćeliji.....	28
Slika 13 Promjena temperature baterijskog modula pri hlađenju s 40°C	29
Slika 14 Proces radne tvari u log p-h dijagramu [50].....	30
Slika 15 Tlak isparavanja i kondenzacije tijekom mjerenja.....	30
Slika 16 Profil temperature rashladne kapljevine.....	31
Slika 17 Toplina odvedena od baterije u periodu hlađenja	31
Slika 18 Detaljan model ćelije	32
Slika 19 Prikaz visine kanala	33
Slika 20 Obuhvatni kut rashladnog kanala cilindrične ćelije [52]	33
Slika 21 Simulink model ćelije	34
Slika 22 Temperaturni profil hlađenja više dijelova ćelije	34
Slika 23 Simulacijski model spoja dvije ćelije.....	35
Slika 24 Temperaturni profil hlađenja dvije ćelije u seriji	35
Slika 25 Model baterijske ćelije	37
Slika 26 Model paralelnog sklopa 1.....	38
Slika 27 Model paralelnog sklopa 2.....	38
Slika 28 Baterijski modul.....	39
Slika 29 Simulink simulacijski model cijelog modula.....	40
Slika 30 Temperaturni profil prve paralele.....	42
Slika 31 Temperaturni profil pretposljednje paralele	42
Slika 32 Prosječna temperatura baterije i posrednog prijenosnika energije.....	44
Slika 33 Temperatura segmenata baterije i posrednog prijenosnika energije	45
Slika 34 Usporedba temperaturnog profila osjetnika 1 i simulacije prve paralele.....	47
Slika 35 Usporedba temperaturnog profila osjetnika 2 i simulacije 6. paralele.....	48

POPIS TABLICA

Tablica 1 Odabrane komponente rashladnog kruga i mjerna oprema	23
Tablica 2 Odabrane komponente hidrauličkog kruga.....	26
Tablica 3 Osnovne specifikacije korištene baterije	36

POPIS KRATICA

EV	Električno vozilo (<i>Electric Vehicle</i>)
BEV	Baterijska električna vozila (<i>Battery Electric Vehicle</i>)
PHEV	Plug-in hybrid električno vozilo (<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>)
Li-ion	Litij-ionska (baterija)
BTMS	Sustav grijanja i hlađenja baterije (<i>Battery Thermal Management System</i>)
PEI	Indeks za procjenu performansi (<i>Peak efficiency indeks</i>)
HP	Toplinska cijev (<i>Heat pipe</i>)
PCM	Fazno promjenjivi materijali (<i>Phase Change Material</i>)
CFD	Računalna dinamika fluida (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)

1. MOTIVACIJA

Elektrifikacija voznog parka jedan je od ključnih čimbenika za dekarbonizaciju transporta u Europskoj Uniji, ali i svijetu. Prema odredbama Europske Unije, cilj je smanjenje ugljičnog otiska iz transporta za 90% do 2050. u odnosu na emisije iz 1990-te [1]. Trenutno transport emitira četvrtinu ukupnog ugljičnog otiska u Europskoj Uniji [2], od čega je 70% emitirano iz kategorije cestovnog prometa [3]. U kategoriji cestovnog prometa više od pola čine emisije osobnih automobila, dok 30% otpada na teški transport. Osim toga, jedini je sektor transporta nezasitno rastao po emisijama zadnja tri desetljeća. Iako je jedna od opcija smanjenje ukupnog broja vozila voznog parka, trend brojki prodanih automobila kroz godine u EU pokazuje da razvoj vjerojatno neće ići u tom smjeru. Prema podacima za razdoblje između 2012.-2022., prosječan porast broja automobila u Europskoj Uniji na 1000 stanovnika iznosio je 14,3%. U istom tom razdoblju Hrvatska je zabilježila rast od čak 44,8% [4]. Prema tome, potrebna su nova tehnološka rješenja koja će omogućiti nastavak razvoja voznog parka uz smanjenje ugljičnog otiska. Upravo zbog toga bitno je raditi na razvoju električnih vozila, kako bi se prevladali trenutni nedostaci i prepreke u široj primjeni istih.

Zbog svog potencijala da smanje direktne emisije stakleničkih plinova i ovisnost o fosilnim gorivima, električna vozila (EV) postaju sve popularniji oblik prijevoza koji je u posljednje vrijeme privukao veliku pozornost. Indirektne emisije odnose se isključivo na vrstu proizvodnje goriva, u ovom slučaju električne energije te tako upotrebom obnovljivih izvora energije smanjuju ukupnu emisiju ugljikovog dioksida u životnom ciklusu [5]. Umjesto da koriste benzin ili dizel, električna vozila pokreće električni motor koji crpi energiju iz punjivih baterija. Očekuje se da će broj korisnika električnih vozila do 2030. biti tri puta veći nego 2011. godine. Taj porast rezultat je napretka visoke tehnologije u performansama baterija i njihovom utjecaju na autonomiju vozila [6].

Početni trošak EV vozila može biti viši, no tijekom vremena vozači mogu uštedjeti zahvaljujući nižim troškovima goriva i rjeđem održavanju. Budući da električni motori imaju manje pokretnih dijelova i zahtijevaju manje održavanja, električna vozila često imaju i dulji vijek trajanja od konvencionalnih automobila [7]. Električni automobili dolaze u različitim oblicima, kao što su baterijska električna vozila (BEV) i plug-in hibridna električna vozila (PHEV). Dok PHEV vozila sadrže bateriju i konvencionalni benzinski ili dizelski motor, BEV vozila pokreću isključivo baterije. PHEV vozila mogu prijeći određenu udaljenost koristeći isključivo električni pogon prije nego što se uključi motor s unutarnjim izgaranjem [8].

Bez obzira o kojoj inačici električnog vozila se radi, prema izvješćima iz 2022. premašeno je 26 milijuna vozila na svijetu. Najviše otpada na Kinu s 13,8 miliona, koja također prednjači i u razvoju ovih vozila, dok Europa drži oko 8,1 milijuna, a SAD 3 milijuna vozila [9]. Uz broj vozila svakako raste i razvoj popratne infrastrukture te Kina trenutno raspolaže s 1,15 milijuna punionica, Europa oko 450 tisuća, dok SAD ima 140 tisuća punionica. Cilj Europske Unije dostići je 3,5 milijuna punionica do 2030. [10].

Jedan od bitnih nedostataka električnih automobila je cijena, koja primarno proizlazi iz visoke cijene proizvodnje, koja je drastično iznad cijene konvencionalnih vozila upravo zbog visoke cijene baterijskog paketa. Ipak sama cijena, danas najraširenijih litij-ionskih baterija zbog tehnološkog razvoja, u kontinuiranom je padu. Prosječna cijena litij-ionske baterije 2010. godine iznosila je gotovo 1200 \$/kWh, dok je ona u 2024. pala na 115 \$/kWh [11].

Drugi nedostatak je ograničen domet koji proizlazi iz veličine baterije tj. baterijskog kapaciteta te načinu korištenja, odnosno vožnje. Iako je cijena godišnjeg održavanja električnih vozila manja, najveći problem čini degradacija kapaciteta baterije kroz godine ili zamjena iste. U samom korištenju dodatnu prepreku čini i znatna ovisnost kapaciteta o visokim i niskim temperaturama okoliša te načinu potrošnje, gdje domet značajno pada pri visokim brzinama na otvorenoj cesti.

Još jedan nedostatak koji se često provlači kroz medije je sigurnost. Nerijetko se nailazi na izvore o zapaljenju upravo električnih automobila, što govori o tome da, iako se radi o malom postotku od 0,4% zapaljenih vozila te je ono rjeđe nego kod automobila s unutarnjim izgaranjem, iziskuje kompleksnije gašenje i novu opremu te dodatnu obuku svih uključenih [12].

Kako globalno gospodarstvo sve više osjeća pritisak zbog rasta cijena nafte i ekoloških problema, velik broj istraživanja potaknuo je razvoj različitih vrsta prijevoznih sustava na čistu električnu energiju. Ipak, sustav za pohranu energije, koji mora zadovoljiti potrebe za dometom, snagom za ubrzanje, regenerativnim kočenjem radi učinkovitosti i imati dug vijek trajanja, ostaje ključna komponenta električnih vozila [6]. Pri tome bitno se mijenjaju zahtjevi za hlađenjem automobila. Motori s unutarnjim izgaranjem imali su relativno jednostavno hlađenje gdje je bila viša tolerancija motora na visoke, ali i niske temperature. Kod električnih automobila, posebnu pozornost zauzima hlađenje baterijskog paketa koji radi u relativno uskom optimalnom rasponu temperatura. [13]

2. PREGLED LITERATURE

Poznato je da Li-ionske baterije imaju optimalni operativni raspon temperatura s obzirom na efikasnost, sigurnost i starenje. Više izvora literature navodi optimalan temperaturni raspon baterija između 15 i 35 °C, dok je ukupan raspon upotrebe od -20 do 60°C. Van optimalnog raspona performanse baterija drastično padaju, a smanjuje se i životni vijek baterije [14].

Neke od tih problema spominju i članci objavljeni unutar Internacionalnog časopisa za prijenos topline i mase. Na primjer, L. Zhu et al., [15] opisuje probleme odvijanja kemijskih reakcija unutar baterijskog modula koje daju jasnu sliku oslobađanja topline i bazu za hlađenje iste. Budući da je termodinamičko ponašanje baterija vrlo kompleksna pojava za opisati, autori primjenjuju pojednostavljen Bernardijev model (1985.) koji preko Ohmskog gubitka zamjenjuje izvor topline u termodinamičkim simulacijama. Ovo istraživanje pokriva 3D termodinamičko modeliranje ponašanja baterija u dva ekstremna uvjeta: u ekstremno hladnom okolišu i okolišu ekstremno visokih temperatura.

Nadalje znanstveni časopis *Batteries*, sadrži cijeli niz otvorenih znanstvenih članaka u kojima se donose najnovija otkrića eksperimentalnih i simulacijskih metoda sustava hlađenja i grijanja i upravljanja baterijskim sustavom. Članak Y.Yao et al., [16] govori o kritičnim faktorima toplinskog bijega (engl. *thermal runaway*) cilindričnih baterijskih ćelija u ovisnosti o napunjenosti baterije. Također je utvrđeno i, ovisno o stupnju temperaturnog pregrijanja koji se plinovi i u kojoj mjeri oslobađaju. Kod stanja napunjenosti (engl. *State of charge (SOC)*) baterije od 100%, maksimalna izmjerena temperatura ćelije u toplinskom bijegu je 508,4°C, a tlak od 0,531 MPa, dok je pri SOC-u od 20% temperatura toplinskog bijega bila ispod 400°C i 0,09 MPa. U radu su prikazane osnovne termodinamičke jednadžbe koje uzimaju u obzir elektrokemijski potencijal baterija, jednadžba idealnog plina i očuvanja mase koje služe kao baza za daljnje postavljanje simulacijskog modela. Simulacijski model izgrađen je na jednoj ćeliji te na skupu baterijskih ćelija odnosno modulu. Temperature toplinskog bijega susjednih baterijskih ćelija mjerene su u iznosu od čak 1047°C, što naglašava važnost razvoja sustava upravljanja baterijama i njihovim hlađenjem kako bi se prijenos topline poboljšao, smanjila mogućnost toplinskog bijega te povećala sigurnost baterijskih paketa.

Autori M. Falcone et al. u članku [17] navode više sustava hlađenja baterijskih paketa, temperaturne raspone i razlike između sustava hlađenja zrakom i kapljevinom. Temperaturno

ponašanje baterija simulirano je CFD metodom hibridnog sustava. Promjenom širine kanala, brzine protoka i rasporeda utvrđene su razlike dobivenog temperaturnog polja sustava hlađenja zrakom i onog hlađenog kapljevinom. Kako je očekivano, optimizacijom više parametara dobiveni su najbolji rezultati.

U članaku Mylaudy Dr. S. Rajadurai i S. Ananth, [18] dan je kvalitetan pregled i opis svih BTMS sustava, no uz sustave hlađenja ističu se i mogućnosti grijanja baterija. Sustav grijanja baterija svodi se na tri načina: samozagrijavanje, konvektivno i grijanje opterećenjem ćelije (iz toplinskih gubitaka). Konvektivno grijanje procijenjeno je kao kvalitetnije od samozagrijavanja, dok je najbolje grijanje opterećenjem ćelije, budući da troši samo 5% kapaciteta baterije. Sve tri metode zagrijavaju bateriju na 20°C u 2 minute.

Jedan od opsežnih otvorenih radova [19] koji sadrži BTMS cilindričnih Li-ion baterija koristeći CFD softver Star CCM+. U radu je proveden cijeli niz različitih simulacija koje su uključivale različite sustave hlađenja, poput mikrokanalnog (cijevnog) hlađenja, hlađenja donjom pločom, kombinacija zračnog i direktnog hlađenja i zadnji sustav hlađenja fazno promjenjivim materijalom (engl. *phase-change material*, *PCM*). Simulacijom je dobiven temperaturni profil bloka, ovisno o vrsti hlađenja. Najboljim se pokazalo zračno i direktno hlađenje zbog jednolike kontaktne površine, dok mikrokanalno hlađenje ima znatni temperaturni gradijent po bloku. PMC hlađenje se može koristiti kao pasivni pomoćni sustav, ali budući da je slabijeg kapaciteta teško može zadovoljiti potrebe hlađenja baterija. Dodatno su istaknuti nedostaci simulacija kao što je uzimanje konstantno generirane topline po ćeliji i nedostatak uzimanja u obzir napunjenosti baterije, toplinski bijeg, nesavršen kontakt materijala, starenje baterije i sl.

Mahamud i Park [20] predložili su reciprocirajuće strujanje zraka u BTMS-u kako bi smanjili maksimalnu temperaturu i izjednačili raspodjelu temperature u Li-ion ćelijama. Razvili su brzi prostorno-rezolucijski model s toplinskim otporima i masama za cilindrične ćelije, primjenjiv i pri visokom Biotovom broju, koristan za dimenzioniranje hlađenja. Kasnije su objavili pregled koji sistematizira zračno, tekućinsko, PCM i hibridno hlađenje te daje praktične smjernice za projektiranje BTMS-a u EV/HEV vozilima.

Starenje baterija i pretpostavke električnih simulacija, opisao je u doktorskoj disertaciji 2023., Filip Maletić s FER-a. Ova doktorska disertacija predstavlja osnovne načine modeliranja baterija i nekoliko načina uzimanja u obzir starenja baterija u odnosu na degradirani kapacitet. [21].

3. CILJEVI I HIPOTEZA RADA

Hipoteza rada: Numerički model i eksperimentalni postav unaprijedit će razumijevanje toplinskog ponašanja litij-ionskih baterija te doprinjeti produljenju životnog vijeka i poboljšanja performansi rada baterijskih sustava.

Cilj rada: Razvoj simulacijskog modela za hlađenje baterija električnih vozila vodljivim fluidom te usporedba rezultata s eksperimentalnim rezultatima.

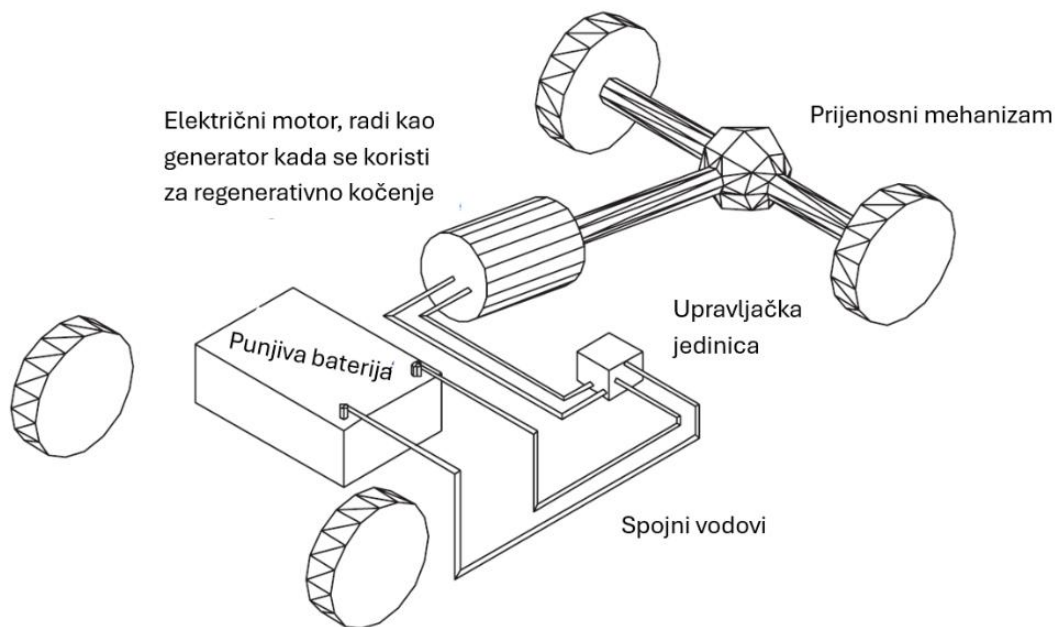
Pregledom literature uočena je potreba povezivanja obrade podataka s eksperimentalnih mjernih linija i simulacijskim modelima za prikaz temperaturne raspodjele kroz baterijski set. Pritom su se pojavila sljedeća istraživačka pitanja:

1. Koje su osnovne postavke eksperimentalnog kruga termalnog upravljanja baterijskim modulom?
2. Koliko numerička konfiguracija baterijskog modula utječe na temperaturno polje?
3. Koje su osnovne postavke simulacijskog modela koje treba uzeti u obzir pri hlađenju baterijskog seta?
4. U kojoj mjeri postoji odstupanje simulacijskog modela u odnosu na eksperimentalne podatke? U kojim područjima rada postoji preklapanje, a u kojima značajno odstupanje?
5. Na koji način se mogu iskoristiti eksperimentalni podaci za korigiranje nepoznanica i poboljšanje simulacija?

4. TEORIJSKE OSNOVE ELEKTRIČNIH VOZILA

Koncept BEV u svojoj je osnovi jednostavan i prikazan je na Slika 1. Vozilo se sastoji od električne baterije za pohranu energije, električnog motora i upravljačke jedinice (kontrolera). Baterija se obično puni iz mreže putem priključka i uređaja za punjenje baterije, koji može biti ugrađen u vozilo ili postavljen na mjestu punjenja. Kontroler obično upravlja količinom energije koja se dovodi motoru, a time i brzinom vozila u vožnji naprijed i natrag. Takav se kontroler obično naziva "dvokvadrantnim kontrolerom" – jer omogućuje kretanje unaprijed i unatrag.

Poželjno je koristiti regenerativno kočenje kako bi se povratila energija i kao prikladan oblik kočenja bez trenja. Kada kontroler osim toga omogućuje regenerativno kočenje i u smjeru naprijed i unatrag, naziva se "četverokvadrantnim kontrolerom". Na tržištu je trenutno dostupno više vrsta ovakvih električnih vozila. U najjednostavnijem obliku to su mali električni bicikli, tricikli i mala gradska vozila [22].



Slika 1 Električno vozilo na baterijski pogon [22]

4.1 Baterijski sustavi

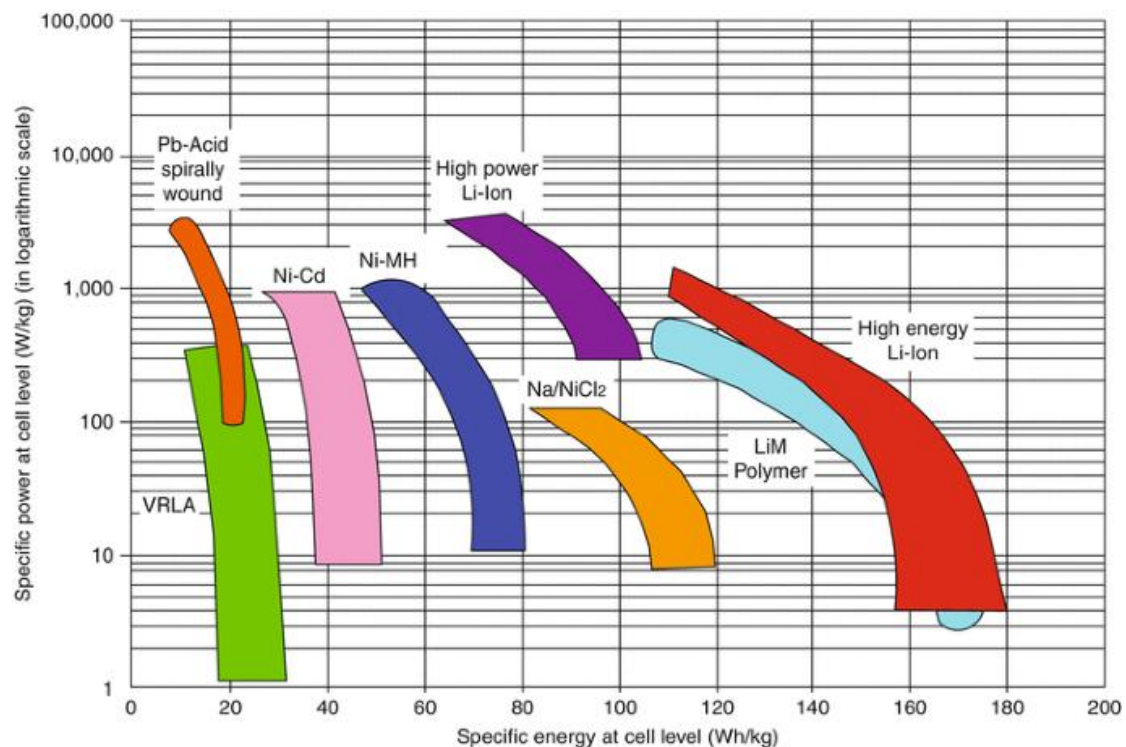
Baterijski sustavi prvenstveno služe za napajanje elektromotora u raznim primjenama, osobito u električnim vozilima. Struktura takvog sustava sastoji se od serijski i/ili paralelno povezanih jediničnih ćelija, čime se postižu željeni naponi i kapaciteti potrebni za pouzdan rad vozila.

Osnovni element svakog baterijskog sustava je ćelija. U slučaju litij-ionskih (Li-Ion) ćelija, svaka pojedinačna ćelija pruža napon između 3 i 4 volta. Više ćelija može se povezati izravno paralelno, formirajući blok, pri čemu se održava isti napon, dok se povećava ukupni kapacitet. Nadalje, više ćelija ili blokova spaja se u seriju, stvarajući bateriju, odnosno fizičku cjelinu koja osigurava viši ukupni napon. Primjerice, baterijski modul sastavljen od četiri ćelije u seriji nominalno će pružati 12 volti. Konačno, više takvih jedinica (modula) organizira se u baterijski paket, gdje se kombiniraju serijski i/ili paralelno ovisno o specifičnim zahtjevima sustava [23].

Jedan od ključnih čimbenika pravilnog rada električnog automobila je osiguravanje optimalne radne temperature elektromotora i baterijskog sustava. Učinkovito upravljanje toplinom neophodno je kako bi se spriječilo pregrijavanje, produžio vijek trajanja komponenata te osigurala sigurnost i optimalne performanse vozila u različitim radnim uvjetima [24].

4.2 Litij-ionske ćelije

Litij-ionske punjive ćelije imaju najveću gustoću energije, preko 705 Wh/l te među najvećim gustoćama snage do 10 000W/l od svih danas komercijalno dostupnih ćelija [25]. Omogućuju izvanredne performanse te su standardni izbor za mnoge potrošačke elektroničke proizvode, poput prijenosnih računala i mobilnih telefona. Također, sve više postaju preferirani izbor za pogonske baterijske pakete u vozilima [14].



Slika 2 Raspon gustoće energije i gustoće snage Li-ion baterija [26]

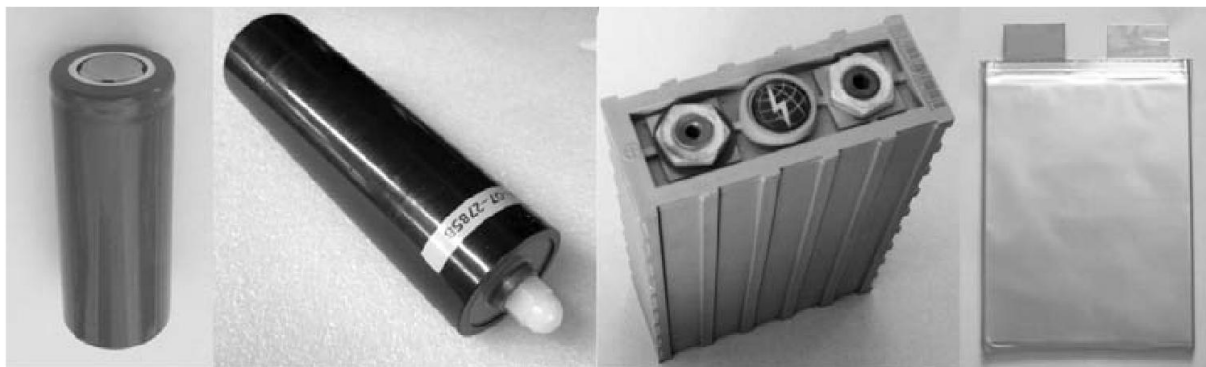
Li-Ion ćelije dostupne su u četiri osnovna formata: cilindrične (male i velike), prizmatične i vrećaste, Slika 3. Neki od tih formata znatno su jednostavniji za korištenje od drugih, što ih čini prikladnijima za manje projekte.

Cilindrične ćelije prirodno zadržavaju svoj oblik protiv širenja uzrokovanog kemijskim procesima kada su potpuno napunjene, dok je kod ostalih formata potrebno osigurati kućište baterije koje će spriječiti njihovo širenje.

Pri odabiru formata litij-ionskih ćelija važno je uzeti u obzir njihove karakteristike i namjenu. Male cilindrične ćelije najbolje su rješenje za nadogradnje jer se zbog svojih kompaktnih dimenzija mogu lako smjestiti u raspoloživi prostor. Velike cilindrične ćelije do nedavno nisu bile široko dostupne, no danas postoje primjeri koji su ušli u široku primjenu. Takav primjer je i Teslina 4680 baterijska ćelija koja ima veću energetska gustoću, bolju toplinsku otpornost i jeftinija je u odnosu na tradicionalne manje cilindrične ćelije. [27]

Prizmatične ćelije imaju najbolju dostupnost i zahtijevaju vrlo malo dizajnerskog prilagođavanja, što ih čini posebno pogodnima za razne primjene.

Vrećaste („pouch“) ćelije odlikuju se visokom gustoćom energije i snage, no zbog složenijih zahtjeva pri ugradnji najprikladnije su za velike serijske proizvodnje gdje se mogu ostvariti najbolje performanse [28].

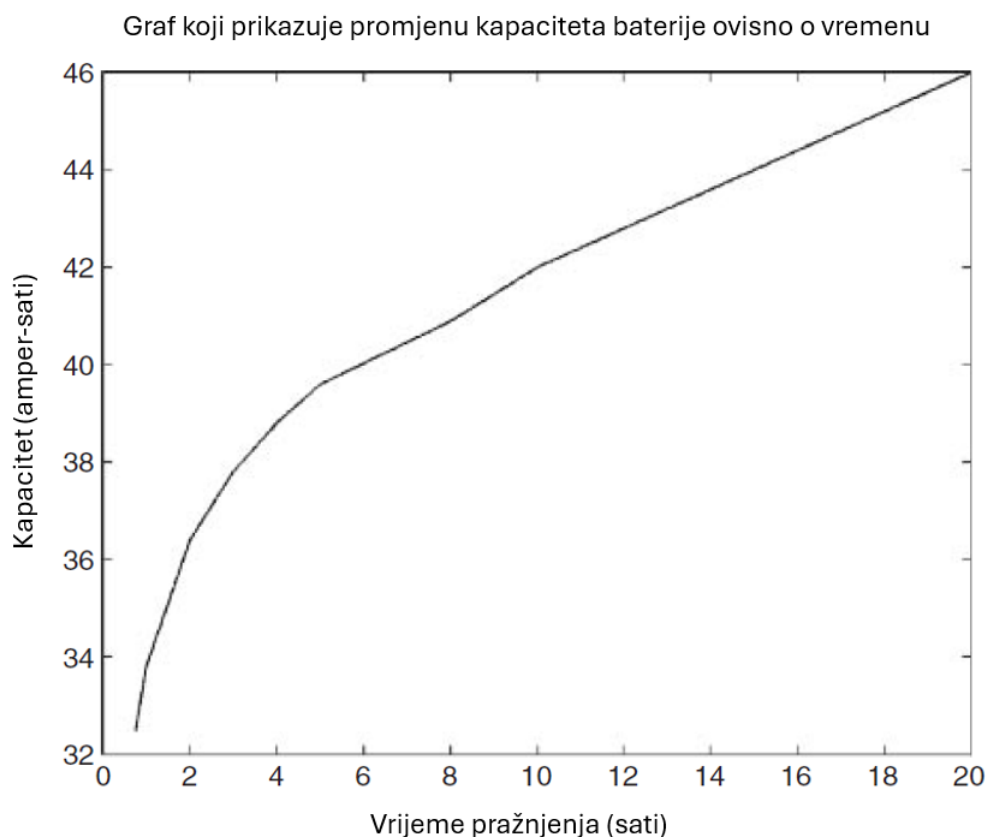


Slika 3 Formati Li-Ion ćelija: male i velike cilindrične, vrećaste i prizmatične [28]

4.3 Kapacitet baterija u električnim vozilima

Električni naboj koji baterija može isporučiti nedvojbeno je jedan od najvažnijih parametara. SI jedinica za to je kulon – naboj koji protječe kada struja od 1 A teče 1 sekundu. Međutim, ova jedinica je nezgodno mala. Umjesto toga koristi se amper-sat (Ah) – 1 A tijekom 1 sata. Kapacitet baterije može biti primjerice „10 Ah“. To znači da može kontinuirano isporučivati struju jakosti 1 A tijekom 10 sati, 2 A tijekom 5 sati ili teoretski 10 A tijekom 1 sata, pritom se ispražnjavajući od 100% SOC do 0% SOC. No, u praksi se kod većine baterija pokazalo nešto drukčije ponašanje u ovisnosti o opterećenju baterije.

Obično je slučaj da, iako baterija može isporučiti 1 A tijekom 10 sati, ako se iz nje povuče 10 A, trajat će manje od 1 sata. Kapacitet velikih baterija koje se koriste u električnim vozilima (tzv. vučne baterije) obično se navodi za pražnjenje tijekom 5 sati. No, Slika 4 prikazuje kako se kapacitet mijenja ovisno o tome koliko brzo (ili sporo) se baterija prazni. Dijagram prikazuje bateriju nominalnog kapaciteta 100 Ah. Primjećuje se da ako se baterija isprazni u 1 satu, stvarno iskoristivi kapacitet znatno opada na oko 70 Ah. S druge strane, ako se struja povlači sporije, primjerice tijekom 20 sati, kapacitet raste na oko 110 Ah.



Slika 4 Graf koji prikazuje promjenu amper-satnog kapaciteta nominalno 42 Ah baterije. Ovaj graf temelji se na mjerenjima olovno-kiselinske vučne baterije proizvođača Hawker Energy Products Inc. [22]

Ova promjena kapaciteta događa se zbog nepoželjnih popratnih kemijskih reakcija unutar ćelije. Učinak je najizraženiji kod olovno-kiselinskih baterija, ali se javlja kod svih vrsta. Vrlo je važno moći točno predvidjeti posljedice tog fenomena [22].

5. HLADENJE BATERIJA

Sustav grijanja i hlađenja baterije (eng. BTMS *battery thermal management system*) jedan je od ključnih upravljačkih sustava električnih vozila. Upravo je održavanje i ograničavanje temperaturnog raspona koji se pojavljuje na površini, ali i u središtu baterije nužno za optimalan rad i dugotrajan životni vijek baterije. Jednako je bitno promotriti sustav pri vrlo niskim i pri vrlo visokim okolišnim temperaturama, ipak niske temperature ograničene su za posebne klimatske regije hladnih klima, dok se problem pregrijanja baterija događa čak i kada nema visokih temperatura vanjskog okoliša, već do pregrijanja dolazi isključivo zbog fizikalne prirode baterije. [14]

5.1 Utjecaj temperature na performanse baterija

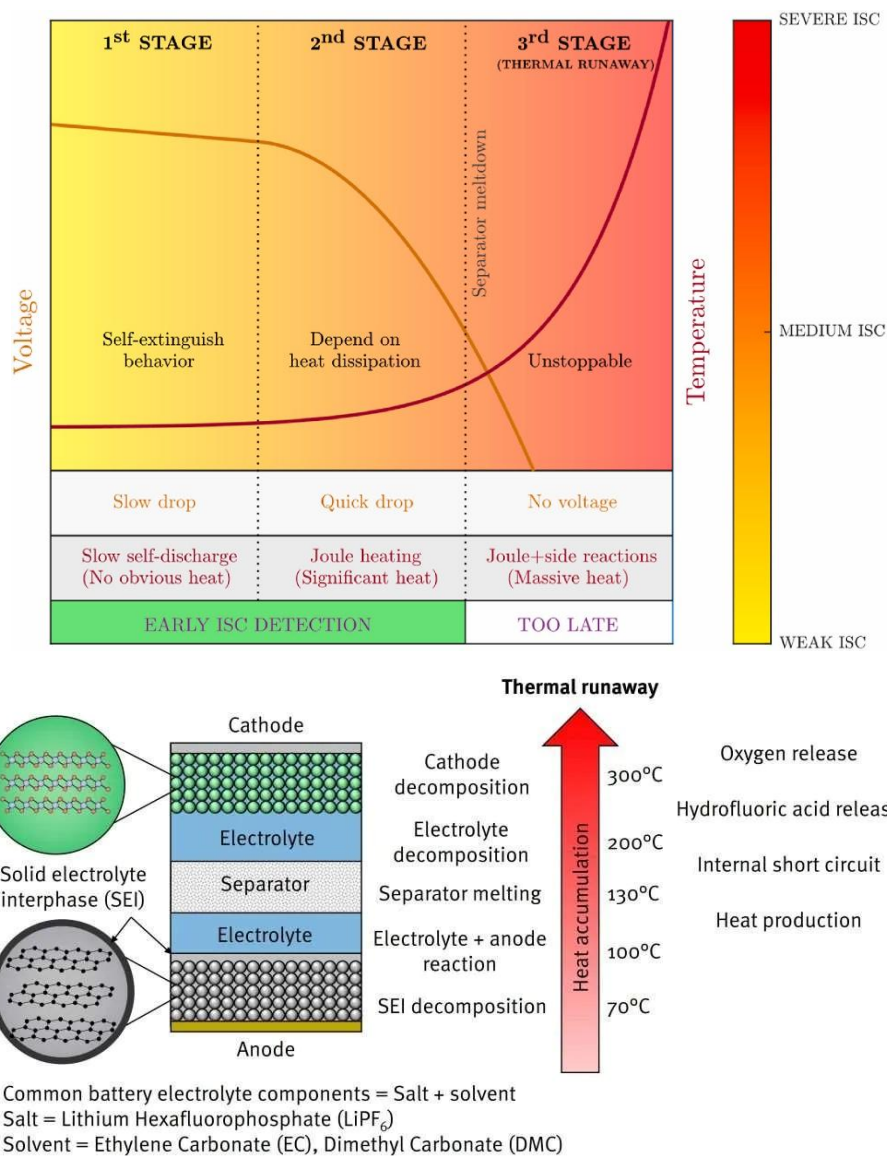
Pri visokim temperaturama dolazi do slabljenja kapaciteta/snage, samopražnjenja i drugih negativnih učinaka koji uzrokuju velik gubitak dostupne energije baterije [29]. U ekstremnim situacijama, poput prekomjerne okolne temperature, visoka temperatura može dovesti do toplinskog bijega (eng. *thermal runaway*) i ugroziti sigurnost električnih vozila (EV), osobito kada se pregrijavanje uzrokovano kratkim spojem ne može kontrolirati. [30]



Slika 5 Prikaz posljedica toplinskog bijega baterije [31]

Do toplinskog bijega dolazi kroz tri faze, Slika 6. Prva faza uključuje izloženost visokoj temperaturi ili unutarnje oštećenje (prepunjenost, kratki spoj ili sl.) što uzrokuje pregrijanje. Zatim druga faza, uključuje seriju egzotermnih kemijskih reakcija koje se aktiviraju i ubrzavaju te dolazi do dekompozicije materijala. Daljnjom dekompozicijom slojeva baterije povisuje se

temperatura te finalno dolazi do dekompozicije katode, zapaljenja elektrolita i eksplozije baterije. [32]



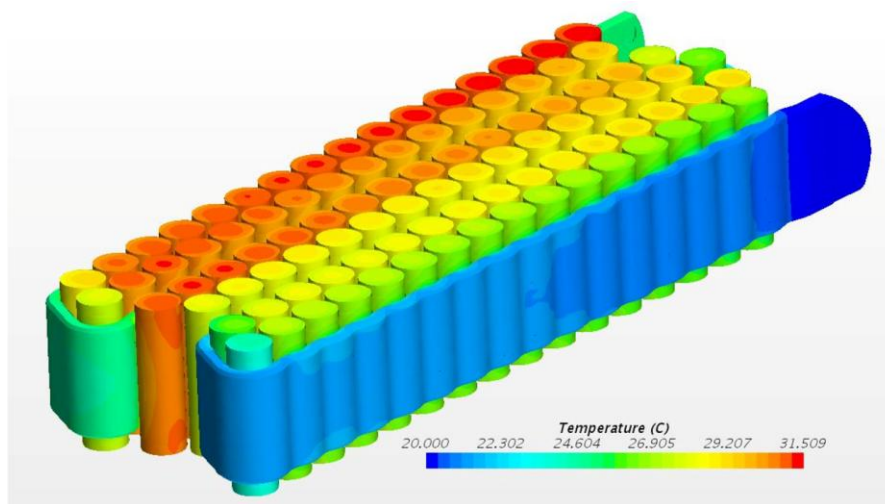
Slika 6 Formiranje toplinskog bijega i topljenje pojedinih komponenti baterije [33]

Niska temperatura negativno utječe na prihvata punjenja [34], kapacitet/snagu, životni vijek i učinkovitost ciklusa punjenja i pražnjenja. [35] Podaci pokazuju da se pri temperaturi od -40°C može isporučiti samo 1,25 % snage u usporedbi s baterijom na 20°C . [36]

Nadalje, zbog razlika u elektrokemijskim svojstvima tijekom punjenja ili pražnjenja, uzrokovanih neujednačenom raspodjelom temperature unutar ćelije, modula ili paketa baterija, dolazi do pogoršanja performansi ćelije i skraćanja životnog vijeka. Održavanje radne

temperature baterije u odgovarajućem rasponu te poboljšanje ujednačenosti temperature glavni su ciljevi BTMS u električnim vozilima. Istraživači i proizvođači razvili su i testirali različite vrste BTMS-a kako bi riješili ovaj problem. Temperatura na površini baterije treba se procjenjivati zajedno s temperaturnim profilom unutar same baterije. Za točniju simulaciju BTMS-a potrebno je izraditi modele prijenosa topline za vanjske sustave hlađenja. U kombinaciji s elektrokemijskim i toplinskim modelima, mnogi modeli baterija služe za određivanje unutarnjeg stanja ćelija [37]. Budući da je teško izravno mjeriti temperaturu unutar baterijskih ćelija, unutarnja temperatura se uglavnom naknadno izračunava mjerenjem temperaturnog profila na površini baterije [38].

Glavni kriteriji za procjenu svakog BTMS-a temelje se na rasponu radne temperature i ujednačenosti temperature uređaja. Idealni BTMS trebao bi održavati temperaturu baterije unutar prikladnog raspona i osigurati ujednačenost temperature kako bi se omogućio dugotrajan, siguran i učinkovit rad baterije. Budući da regulacija temperature ima kašnjenje u odzivu, potreban je BTMS s brзом reakcijom kako bi se promjene temperature baterije mogle pravovremeno detektirati i kontrolirati unutar prihvatljivog raspona. Za optimalan BTMS potrebno je uzeti u obzir i druge čimbenike kao što su masa sustava, volumen, brzina odziva i stabilnost [39], kako bi se omogućila sveobuhvatna procjena.



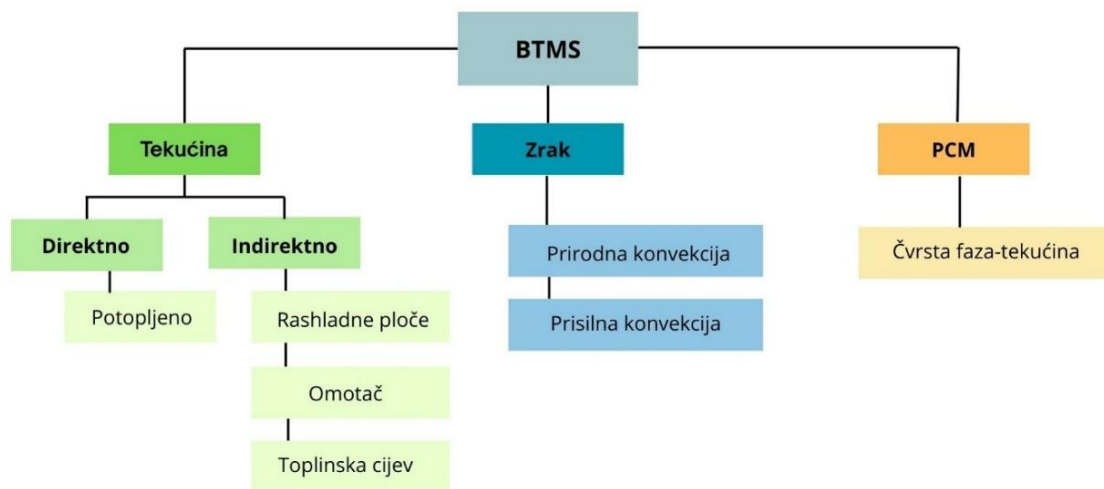
Slika 7 Primjer grafičkog prikaza rezultata CFD simulacije temperaturnog polja baterijskog paketa [19]

Uniformnost temperature baterijskih ćelija također je osjetljiva na brzinu pražnjenja i granične uvjete [40]. Kao posljedica toga, sustavi za termalno upravljanje baterijama (BTMS) moraju se testirati i usporediti u različitim radnim okruženjima, osobito u teškim vanjskim uvjetima i pri

velikim opterećenjima, poput pustinja i polarnih područja. Nužno je konstruirati BTMS tako da osigurava stabilnu raspodjelu temperature baterijskih modula u različitim uvjetima. Jedan od velikih izazova kod električnih vozila (EV) su „vruće točke“ (eng. *hotspots*) na površini baterijskih ćelija, što je osobito opasno u ekstremnim uvjetima vožnje [41]. Tijekom testiranja prenapunjenosti može doći do toplinskog bijega, zbog čega temperatura izlazi iz dopuštenog raspona. Smanjenje tlaka unutar ćelije može donekle spriječiti nesreću [42].

5.2 Vrste toplinskog upravljanja baterijskog sustava

Osnovne vrste BTMS-a koriste zrak, tekućinu, toplinsku cijev (HP) i materijal s promjenom faze (PCM) kao medije ili strukture za provođenje topline, s ciljem prijenosa otpadne topline iz baterije prema vanjskom okruženju. Literatura [43] vrlo detaljno opisuje svaku osnovnu vrstu BTMS-a, uključujući dizajn, izvedbu, trendove razvoja i primjene. Iako mnogi pregledni radovi raspravljaju o hibridnim BTMS-ima, nedostaje sustavnih i ciljanih analiza. BTMS se može klasificirati prema različitim kriterijima [44]. Primjer jedne klasifikacije dan je na Slika 8. [45]



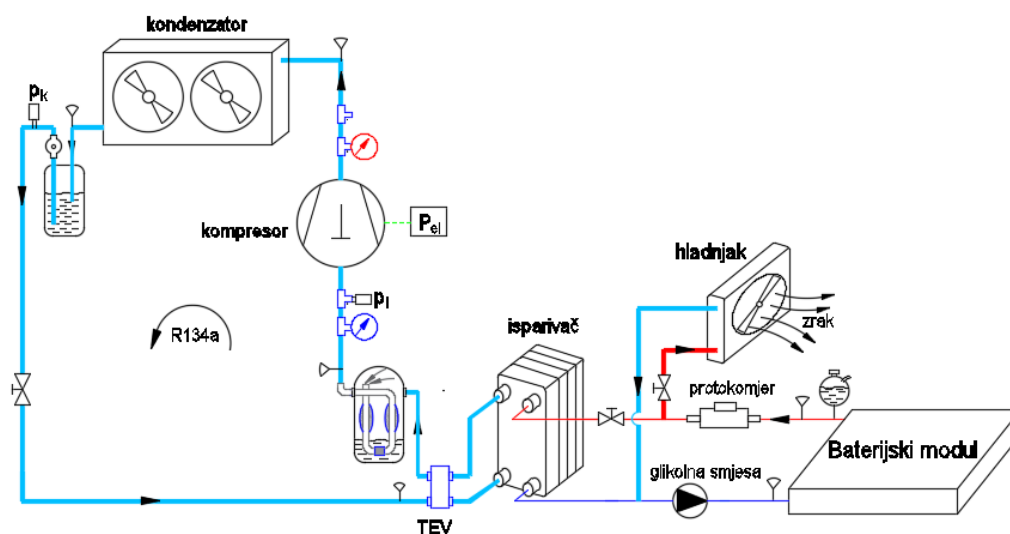
Slika 8 Klasifikacija BTMS-a

Neki pak rade podjelu na aktivne i pasivne sustave, ovisno o korištenju dodatnog izvora energije. Aktivni BTMS troši dodatnu energiju za napajanje ventilatora ili pumpi, što je uobičajeno kod sustava hlađenja zrakom [46] i tekućinom [47]. Kod pasivnih BTMS-a, posebne strukture se ugrađuju na površinu baterije kako bi se postigao veći kapacitet prijenosa topline između baterije i okoline, primjerice PCM [48] i toplinska cijev [49]. Aktivni BTMS se

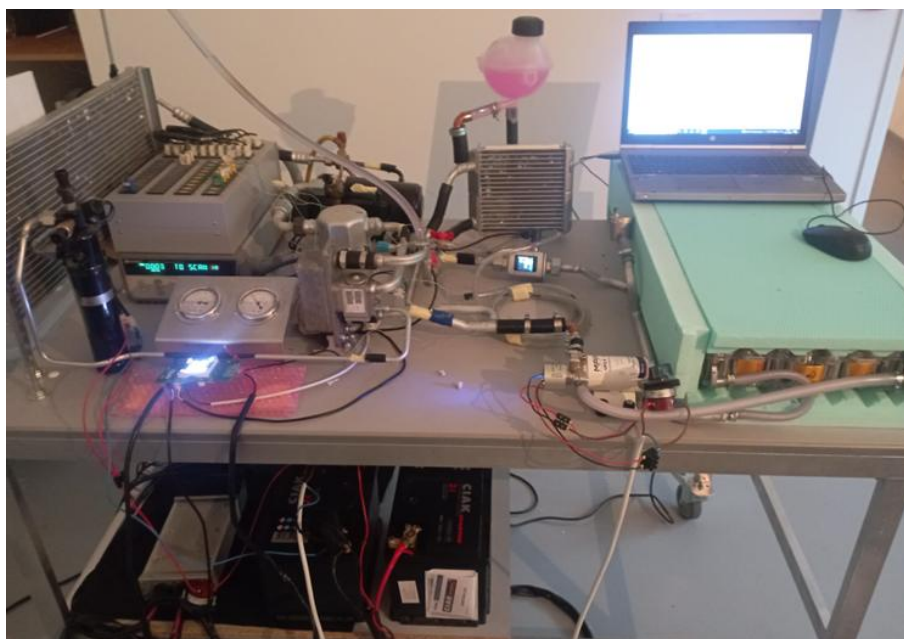
značajno razlikuje od pasivnog, osobito u stabilnosti i složenosti. Aktivni sustavi imaju snažniji kapacitet odvođenja topline zahvaljujući potrošnji energije i složenijim uređajima. Pasivni sustavi mogu postići specifične ciljeve poput ravnomjerne temperature (BTMS na bazi PCM-a) i brze reakcije (BTMS s toplinskom cijevi). Međutim, ako je opterećenje sustava toplineom veće, aktivni BTMS je gotovo uvijek preferirani izbor. U mnogim situacijama potrebno je kombinirati nekoliko osnovnih BTMS-a kako bi se istovremeno postigli različiti ciljevi. Sve više istraživanja usmjerava se na hibridne BTMS-e, a metode integracije sve se češće primjenjuju.

6. EKSPERIMENTALNI POSTAV I REZULTATI MJERENJA

Kako bi se omogućila validacija numeričkog modela, za potrebe ovog rada kreiran je eksperimentalni postav za tehničko hlađenje baterija električnih vozila vodljivim fluidom. On se sastoji od kruga radne tvari i hidrauličkog kruga (Slika 9 i Slika 10). Osim tehničkog hlađenja ispitni sustav ima mogućnost pasivnog hlađenja baterija električnih vozila u uvjetima nižih okolišnih temperatura koristeći hladnjak zraka.



Slika 9 Shema eksperimentalnog postava



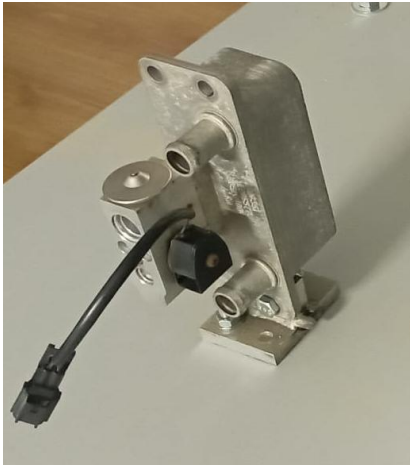
Slika 10 Eksperimentalni postav za vrijeme mjerenja

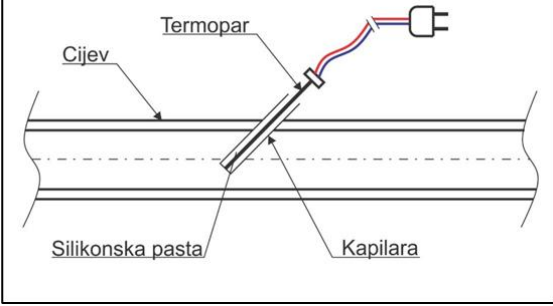
7.1 Krug radne tvari

Osnovne komponente kruga radne tvari su rotacijski kompresor, zrakom hlađen mikrokanalni kondenzator, blok termoekspanzijski ventil i pločasti kompaktni isparivač za hlađenje kapljevine. Rada tvar je R134a. Osim navedenih komponenti, u freonski krug su ugrađene sljedeće pomoćne komponente: skupljača kapljevine s kontrolnim staklom i filtrom, odvajač kapljevine, manometar niskog i visokog tlaka te pretvarači niskog i visokog tlaka i temperature sonde. Odabrane komponente rashladnog kruga i pomoćni mjerni uređaji prikazani su u

Tablica 1 Odabrane komponente rashladnog kruga i mjerna oprema

Komponenta	Specifikacija	Slika
Kompresor	Hermetički rotacijski kompresor 24 V, DC za radnu tvar R134a Dobava 15 cm ³ /ok	
Kondenzator	Zrakom hlađen mikrokanalni kondenzator ogrjevnog učinka 2 kW (temperatura kondenzacije 45 °C)	
Prigušni ventil	Blok termoekspanzijski ventil za radnu tvar R134a	

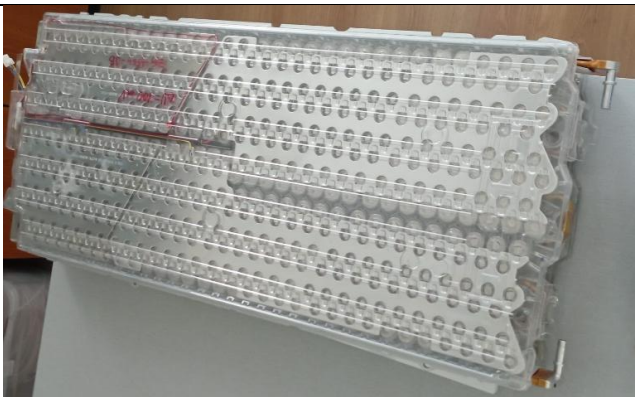
Isparivač	Kompaktni pločasti izmjenjivač s 8 ploča, dimenzije 60x130 mm	
Skupljač kapljevine radne tvari s filtrom i kontrolnim staklom	Volumen 0,45 lit. Integrirani filter/sušilo u kućištu skupljača ("receiver").	
Odvajач kapljevine	Volumen: 0,9 lit	

Manometri niskog i visokog	Manometar s kazaljkom potopljenom u ulju. Radna tvar R134a. Mjerno područje niskog tlaka: 10 bara; mjerno područje visokog tlaka 30 bara.	
Termoparovi	K-tip, Ni/CrNi, točnost $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Pretvarač niskog i visokog tlaka	Kapacitivni pretvarač tlaka: točnost $\pm 0,5\%$ mjernog područja. Mjerno područje: 0 do 32 bara	
Akvizicija podataka	Sustav za prikupljanje podataka s pretvaračem analognog u digitalni signal, 20 kanalni.	

7.2 Hidraulički krug

Hidraulički krug čine kompaktni isparivač, cirkulacijska pumpa, rashladni kanali baterijskog modula, ekspanzijska posuda te magnetni protokomjer i temperaturne sonde. Kao posredni prijenosnik energije koristi se smjesa etilen glikola i vode, 15 % tna. Tablica 2 prikazuje odabrane komponente hidrauličkog kruga.

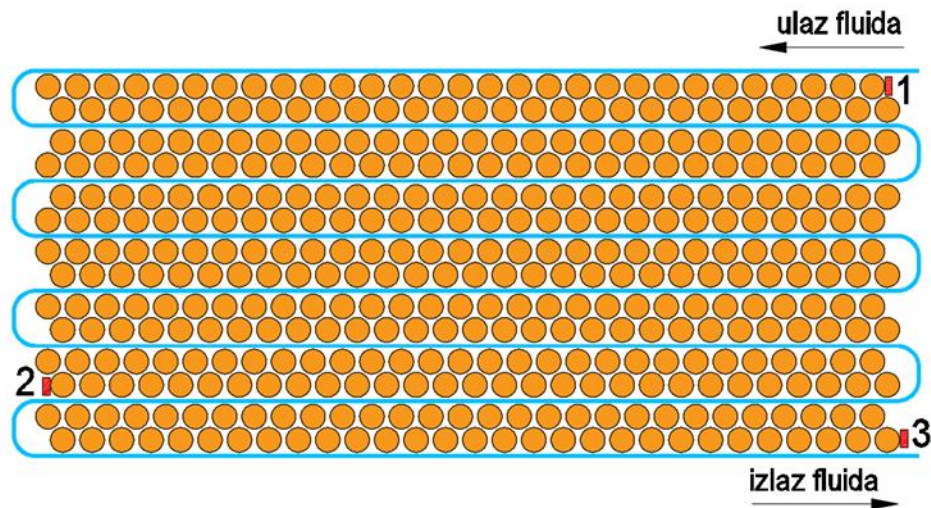
Tablica 2 Odabrane komponente hidrauličkog kruga

Komponenta	Specifikacija	Slika
Rashladni kanali baterijskog modula	Integrirani između redova ćelija baterijskog modula (serpentinasti dizajn). Modul se sastoji 444 litij-ionske ćelije. Serijski spoj rashladnih kanala.	
Cirkulacijska pumpa	Zupčasta pumpa visine dizanja 2 m, protok 1 do 7 lit/min.	
Protokomjer	Elektro magnetski protokomjer, točnost $\pm 1,5$ % mjernog područja.	

		
Otvorena ekspanzijska posuda	Voluman: 1 lit	

7.3 Obrada mjernih podataka

Na laboratorijskom postavu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje provedena su mjerenja parametara hlađenja baterijskog modula, nakon što je isti vanjskim toplinskim opterećenjem zagrijan na 40°C. Temperature određenih baterijskih ćelija na modulu mjerene su termoparovima. Pozicija termoparova po baterijskom modulu prikazana je na Slika 11. Rashladna kapljevina struji kroz serpentinasti kanal. Na tri lokacije mjeri se površinska temperatura ćelije. Na ulazu fluida u baterijski modul, pri posljednjoj trećini paketa i na izlazu iz modula.



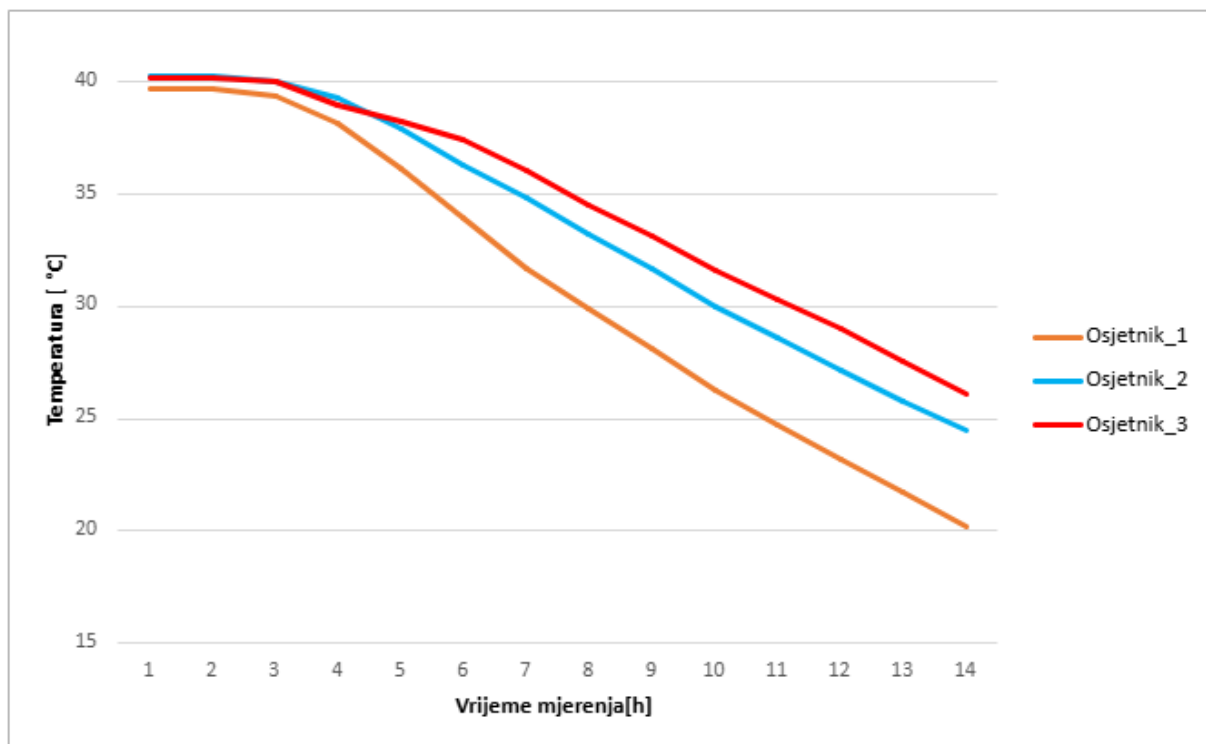
Slika 11 Pozicije termopara na baterijskom modulu

Termoparovi tipa K uz pomoć kapton trake su kontaktno naljepljeni na ćeliju. Kapton traka nalazi se s obje strane termopara Slika 12.



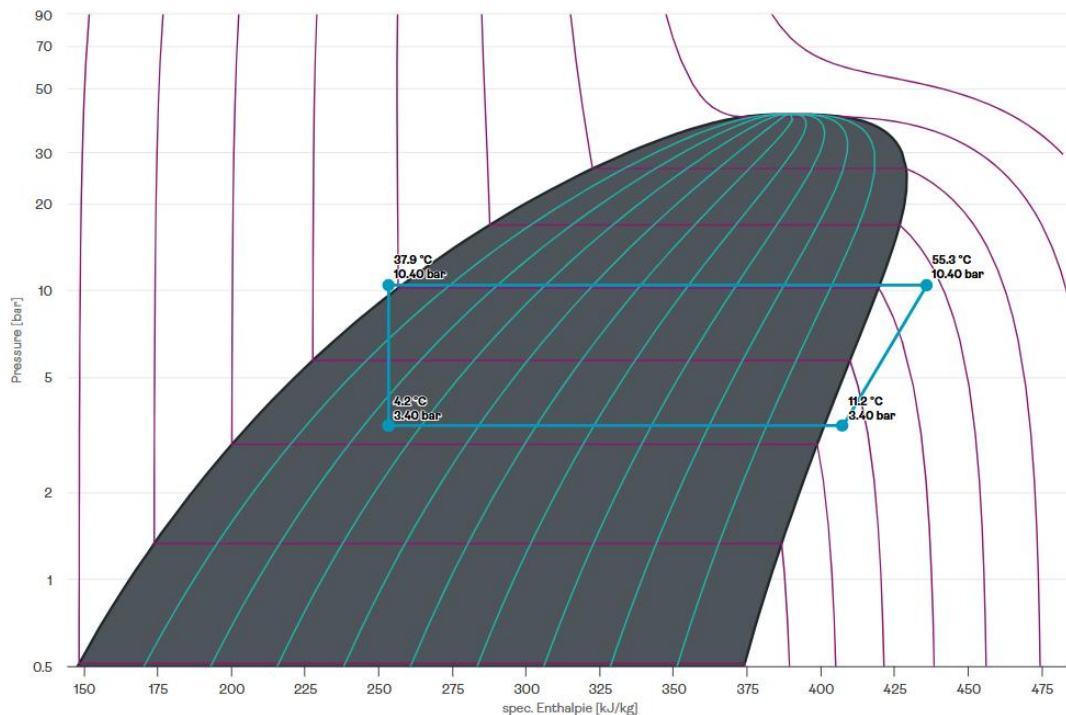
Slika 12 Prikaz ugrađenog termopara 2 na baterijskoj ćeliji

Baterija je aktivnim hlađenjem ohlađena na temperaturu od 20°C za 10 minuta, dok je temperaturna raspodjela više osjetnika prikazana na Slika 13. Osjetnik 1 najbliži ulazu rashladne kapljevine hladi se najbrže i ima najnižu temperaturu. Svaka slijedeći osjetnik duž kanala ima veće temperature i sporiji odaziv.

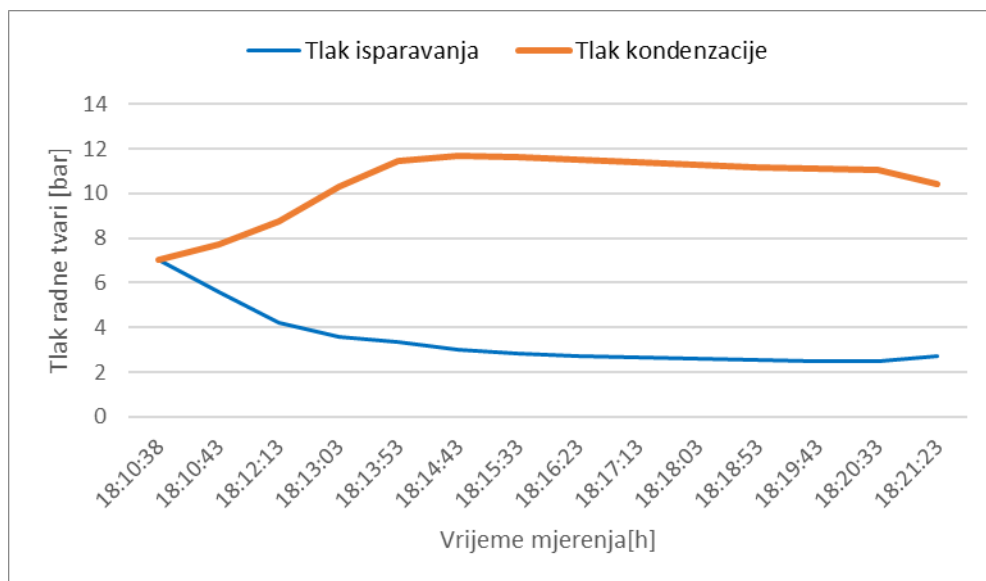


Slika 13 Promjena temperature baterijskog modula pri hlađenju s 40°C

Prikaz karakterističnog procesa u log p-h dijagramu dan je na Slika 14. Nakon početnog pokretanja kompresora, tlak kondenzacije radne tvari R134a je približno 11 bara, dok je tlak isparavanja približno 3 bara.

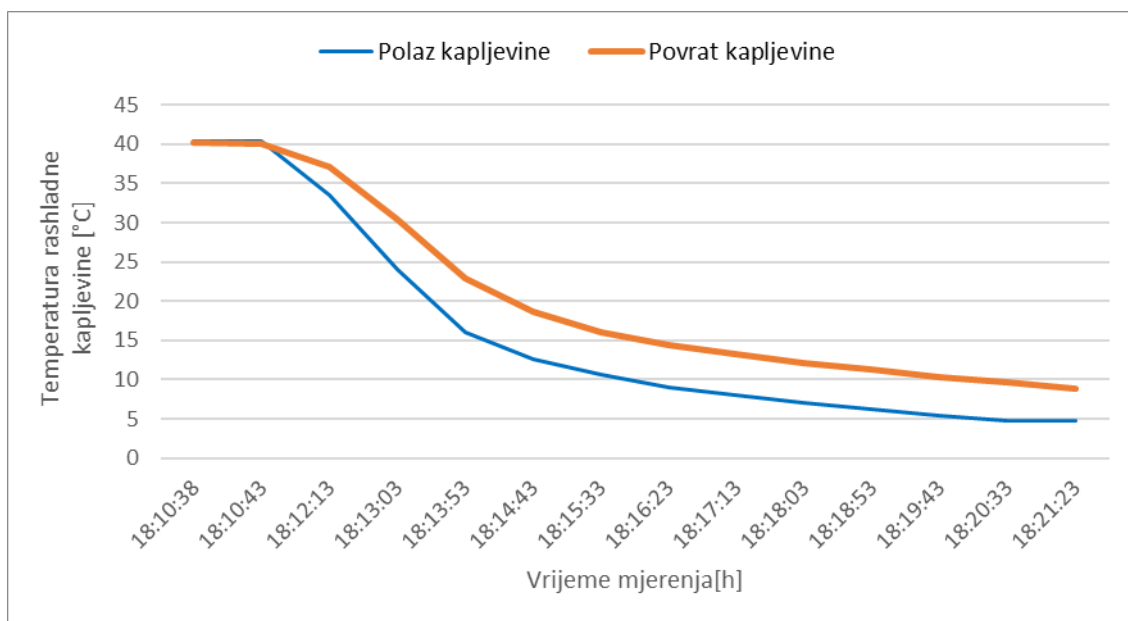


Slika 14 Proces radne tvari u log p-h dijagramu [50]

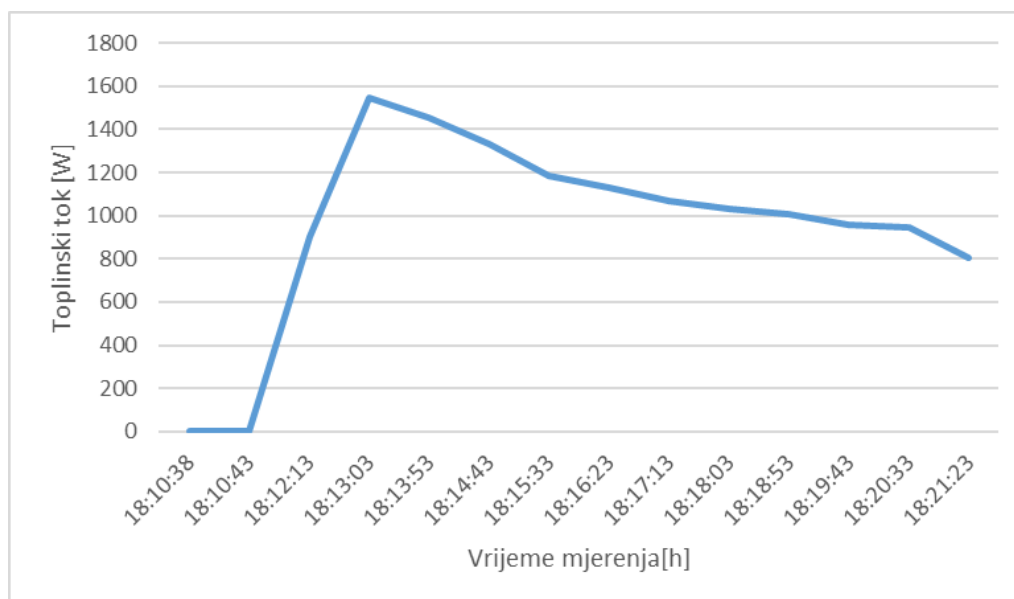


Slika 15 Tlak isparavanja i kondenzacije tijekom mjerenja

Slika 16 prikazuje promjenu temperature polaza i povrata rashladne kapljavine. Početna temperatura je 40°C dok je najniži polaz na kraju mjerenja iznosio 5°C, a povrat 10°C. Temperature polaza i povrata su se stacionirale oko 5. minute mjerenja. Toplinski tok odveden od baterije u periodu hlađenja prikazana je na Slika 17, gdje je maksimalna dostignuta vrijednost iznosila 1600 W.



Slika 16 Profil temperature rashladne kapljevine



Slika 17 Toplina odvedena od baterije u periodu hlađenja

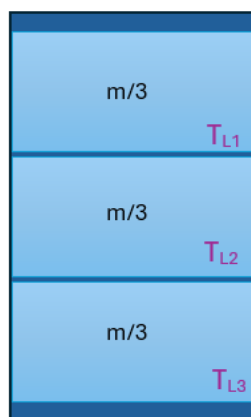
7. SIMULACIJSKI MODEL I REZULTATI SIMULACIJE

OPIS PROGRAMA I MODELA, REZULTATI SIMULACIJE

Simulacijski model ćelije i baterijskog bloka napravljen je u softverskom alatu MATLAB, odnosno Simulink [51]. Umjesto blok dijagrama u Simulink-u, korištene su Simscape fizičke komponente koje u sebi imaju postavljene osnovne termodinamičke i hidrauličke jednadžbe. Napravljena su dva simulacijska modela. Prvi simulacijski model predstavlja detaljnu analizu jedne ćelije baterijskog bloka. Drugi simulacijski model uzima pojednostavljenja te uzima baterijski blok kao cjelinu koja se smješta u krug hlađenja.

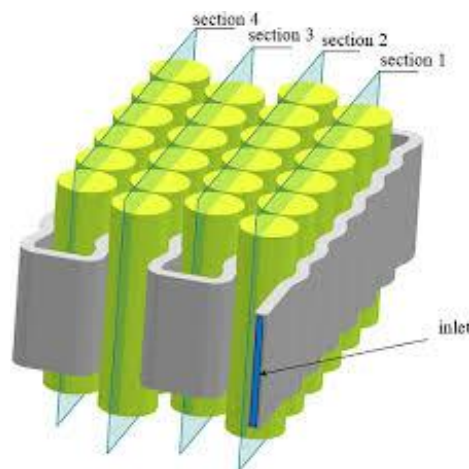
7.1 Detaljan model ćelije

Za detaljnu analizu baterije moguće je podijeliti baterijski blok na prolaze ili ćelije, dok bi najdetaljnija analiza uključivala razdiobu ćelije na nekoliko dijelova budući da cilindrična baterija nema jednak prolaz topline u aksijalnom i radijalnom smjeru. Jedna od mogućnosti je također razdioba na slojeve plašta iz istog razloga na način na koji je građena baterija. Zbog složenosti sustava i broja ćelija u cjelokupnom paketu ovaj model je izveden pokazno na jednoj ćeliji te nije primijenjen na cijelom bloku u prvoj fazi. Slika 18 prikazuje grafički prikaz cilindrične baterije koje je podijeljena na tri jednaka dijela. Svaki dio sadrži trećinu mase, dok je prostor između zanemaren te predstavlja otpor prijenosu topline.

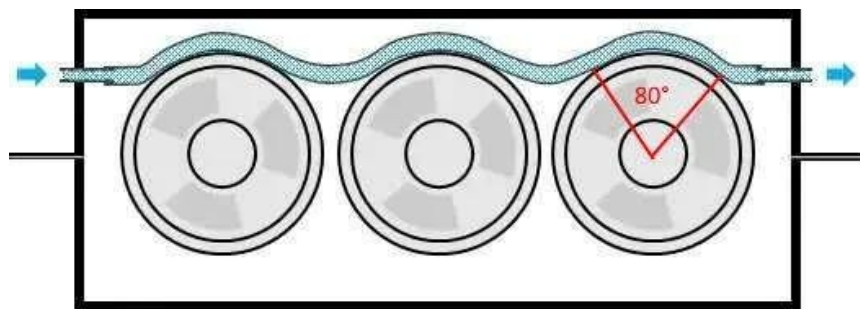


Slika 18 Detaljan model ćelije

Nakon što je baterija zagrijana slijedi odvođenje topline rashladnim krugom. U stvarnosti taj je proces istovremen budući da se istovremeno baterija puni/troši i zagrijava te ju je potrebno hladiti. Ipak postoje situacije u kojima je baterija nakon faze punjenja/trošenja ugašena te ju je i dalje potrebno hladiti. U ovom slučaju fokus je stavljen na takav proces hlađenja. Za postavljanje rashladnog kruga u sustav bitna je kontaktna površina između kanala i ćelije. Obično kanali ne zauzimaju cijelu visinu ćelije, pa je u ovom slučaju rađena simulacija s odvođenjem topline na središnjem dijelu, Slika 19. Također, osim rubnih ćelija koji imaju veći obuhvat kanalom, za ćelije u seriji uzima se obuhvatni luk od 80° kako je prikazano na Slika 20.



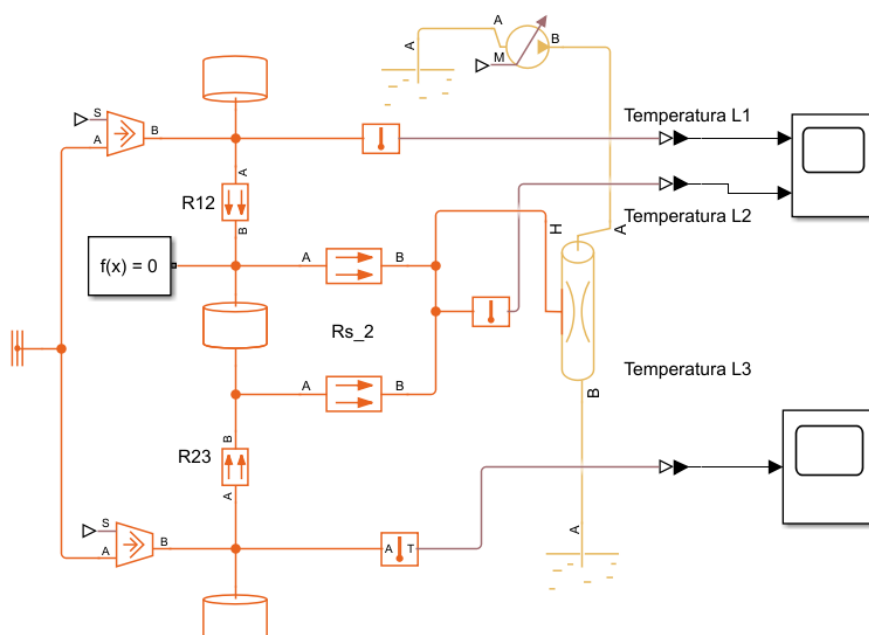
Slika 19 Prikaz visine kanala



Slika 20 Obuhvatni kut rashladnog kanala cilindrične ćelije [52]

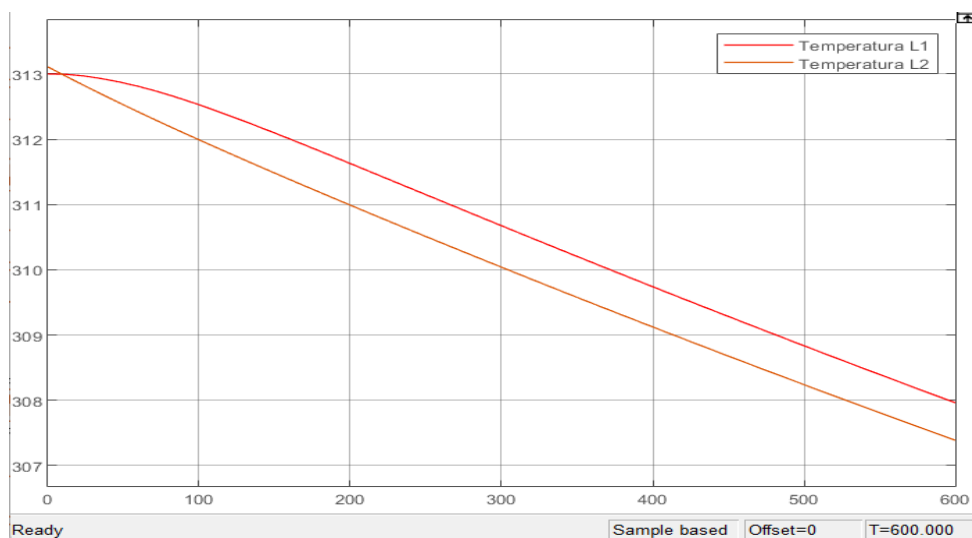
Simulacijski model ćelije ima za cilj pokazati ponašanje pojedinačne ćelije po presjeku u sredini serije. Slika 21 prikazuje simulacijski model pojedinačne ćelije s provodljivim komponentama koje diktiraju brzinu provođenja u aksijalnom i radijalnom smjeru. Aksijalno provođenje definirano je koeficijentom toplinske provodnosti od 20 W/mK . Radijalno provođenje s baterije na cijev iznosi 1 W/mK . Na srednji dio postavljena je kontaktna površina kanala te je radi

pojednostavljena uzet konstantan protok i temperature spremnika, dok je početna temperatura fluida u cijevi uzeta temperatura zagrijane baterije od 40°C.

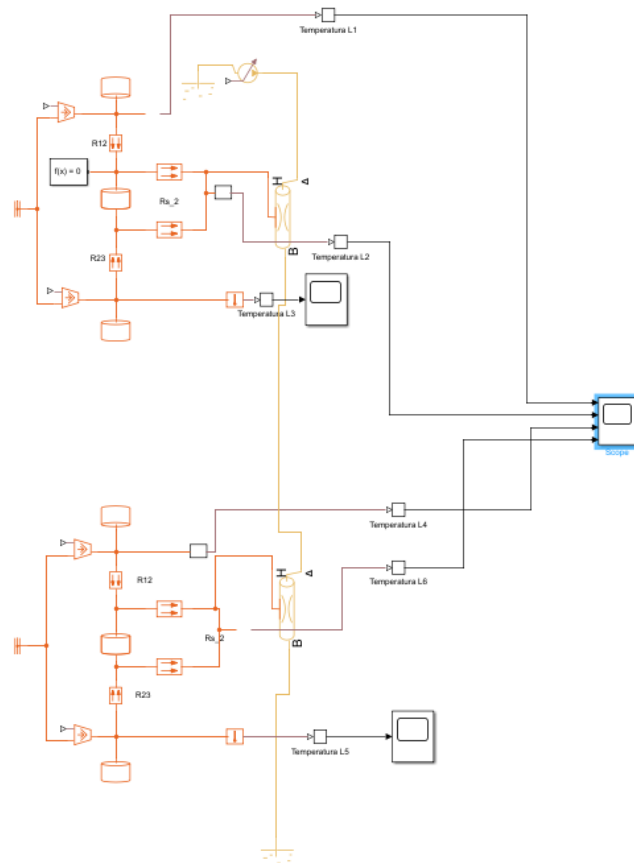


Slika 21 Simulink model ćelije

Simulacijskim modelom dobiven je profil promjene temperature pri hlađenju ćelije, Slika 22, koji pokazuje sporije hlađenje gornjeg i donjeg dijela baterije, dok se sredina baterije(kontaktirani dio) kontinuirano hladi, ali i grije buduću da preuzima toplinu susjednih ćelija.

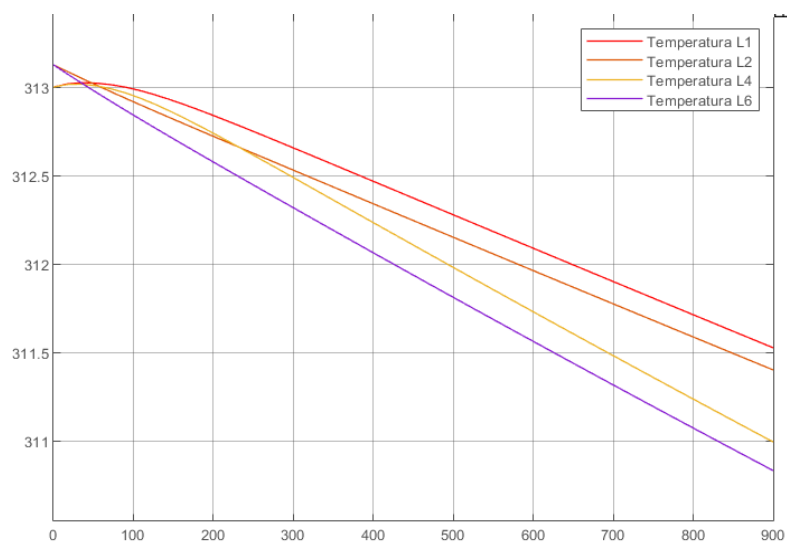


Slika 22 Temperaturni profil hlađenja više dijelova ćelije



Slika 23 Simulacijski model spoja dvije ćelije

Slika 23 prikazuje mogućnost daljnjeg spajanja ovakvih ćelija koji se nadalje mogu spojiti u podsustave te stvoriti module i paralele, a temperaturni profil hlađenja ove dvije ćelije u seriji prikazan je na Slika 24.



Slika 24 Temperaturni profil hlađenja dvije ćelije u seriji

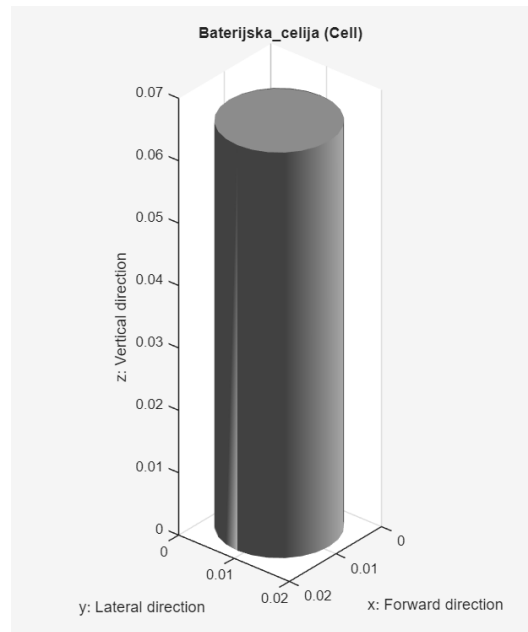
7.2 Model bloka baterije

Posebna nadogradnja unutar MATLAB softvera tzv. *Battery Builder App* [53] omogućuje modeliranje cijelog baterijskog paketa. Na taj način omogućuje se jednostavna konfiguracija različitih baterijskih paketa prema vrsti ćelije, broju paralelnih i serijskih spojeva, ali i napredne postavke za dodavanje termodinamičkih simulacija.

Prvi korak modeliranja bio je definiranje pojedinačne ćelije Slika 25 Panasonic baterije, s nominalnim kapacitetom, energijom i masom. Osnovni podaci o bateriji dani su u Tablica 3. Geometrija ćelije specificirana je prema dimenzijama cilindričnog formata 18650. Model obuhvaća električke karakteristike i parametre toplinskog otpora, što omogućuje simulaciju disipacije topline pri različitim radnim uvjetima.

Tablica 3 Osnovne specifikacije korištene baterije

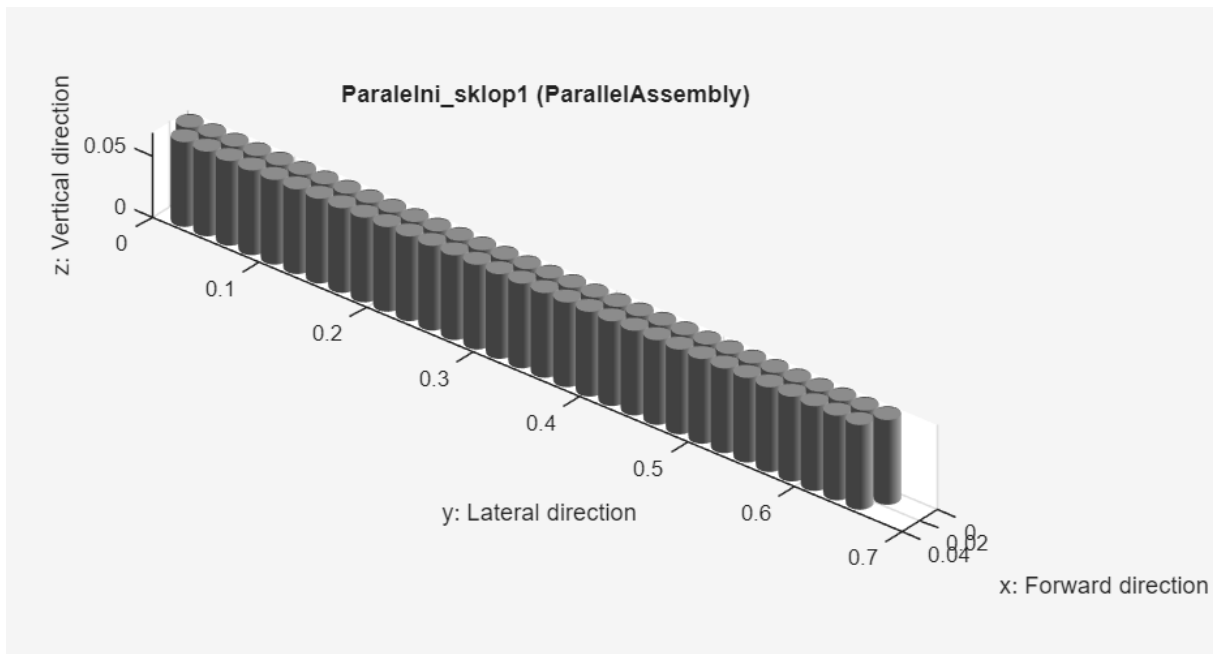
Tip ćelija	Panasonic NCR18650B (Li-ion NCA)
Konfiguracija ćelija	6 serija $\times$ 74 paralelno (6s74p)
Broj ćelija	$6 \times 74 = 444$ ćelije
Nazivni napon modula	22.8 V ($3.8 \text{ V} \times 6$)
Napon punjenja	25.2 V ($4.2 \text{ V} \times 6$)
Minimalni napon	18.0 V ($3.0 \text{ V} \times 6$)
Kapacitet modula	$\sim 5.3 \text{ kWh}$ (oko 232 Ah)
Masa ćelije	45 g
Tip hlađenja	Kapljevina kroz aluminijski kanal



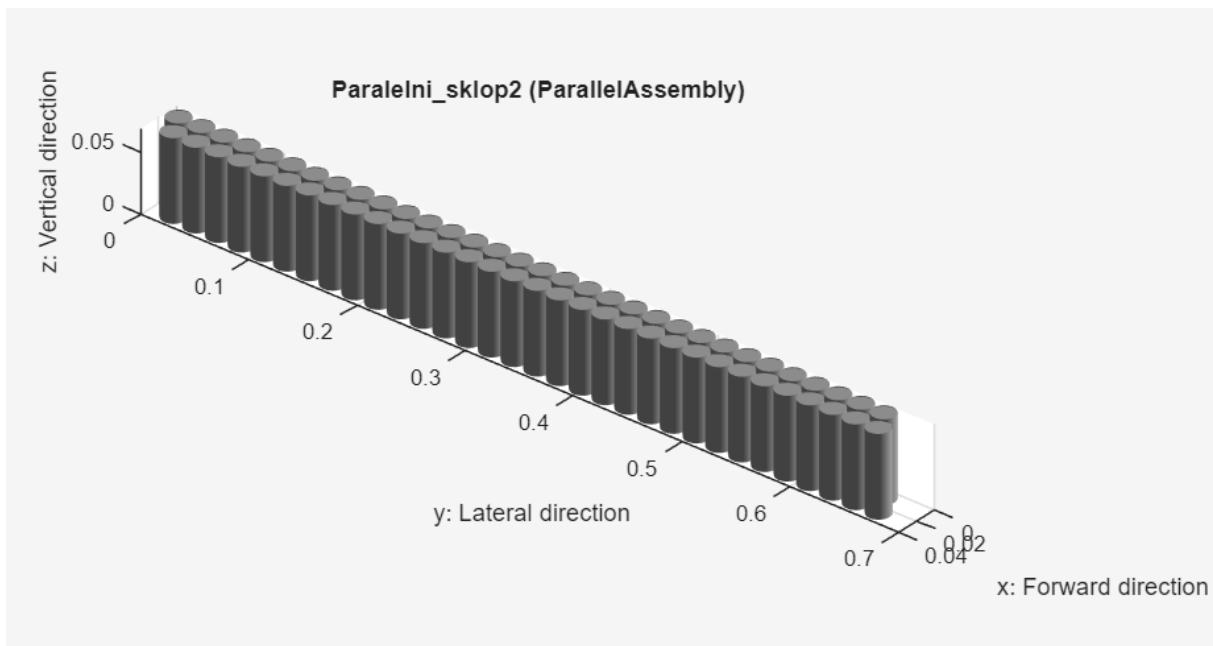
Slika 25 Model baterijske ćelije

Na temelju jedne ćelije izrađena su dva paralelna sklopa prvi (**Pogreška! Izvor reference nije pronađen.**) se sastoji od 63 ćelije, a drugi (Slika 27) od 64 ćelije oba sklopa su raspoređena u dvije heksagonalne matrice radi povećanja gustoće pakiranja i učinkovitijeg odvođenja topline

preko rashladnih kanala. Takva konfiguracija omogućuje prikaz električnog i toplinskog ponašanja skupa ćelija kao jedinstvenog paralelnog modula.

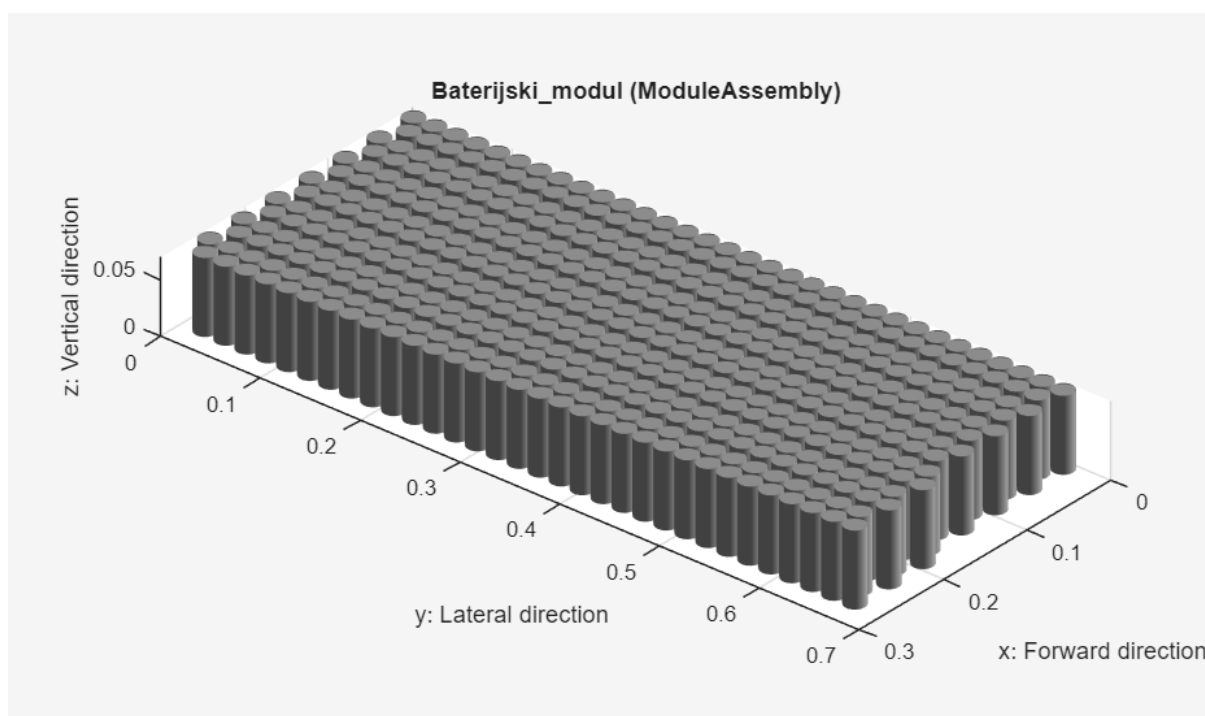


Slika 26 Model paralelnog sklopa 1.



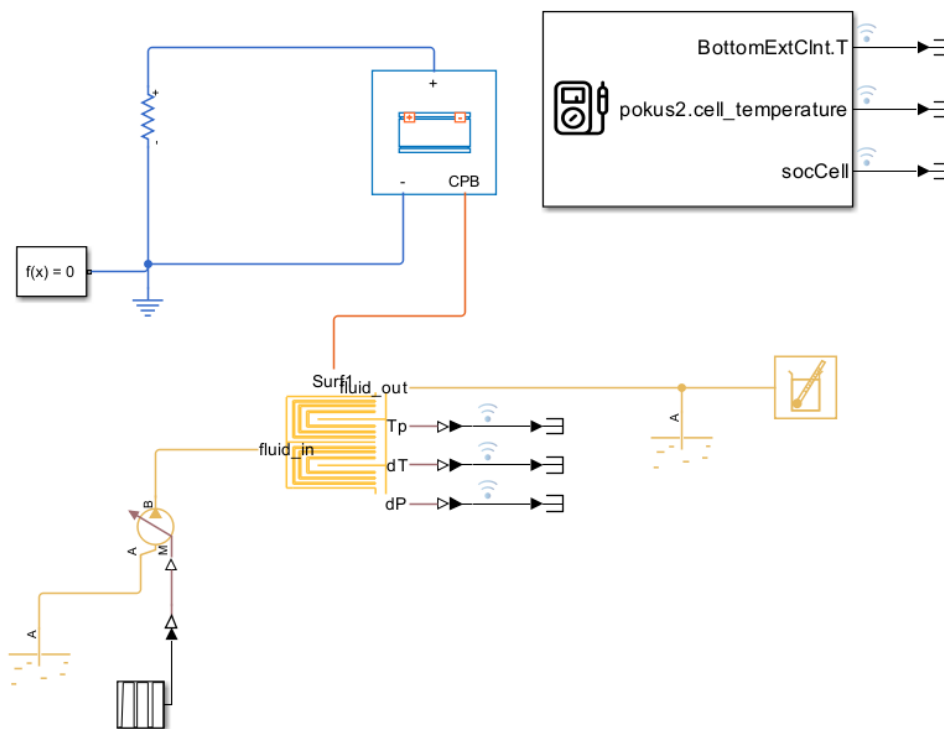
Slika 27 Model paralelnog sklopa 2.

Cjelokupan model baterijskog modula (Slika 28) prikazan je kao sedam serijski povezanih paralelnih grana, iako je stvarna električna konfiguracija paketa 74s6p (74 u seriji i 6 u paraleli). Grane su dimenzionirane tako da su četiri grane imaju po 63 ćelije, a tri grane po 64 ćelije. Posebna pažnja posvećena je modeliranju termodinamičkih uvjeta i 7 rashladnih kanala, s ciljem procjene učinkovitosti hlađenja i praćenja temperaturnih gradijenata koji nastaju tijekom opterećenja. Model omogućuje testiranje različitih strategija hlađenja i optimizaciju konstrukcije paketa u smislu sigurnosti i trajnosti.



Slika 28 Baterijski modul

Simulacijski model (Slika 29) obuhvaća cjelovitu integraciju električkog i termičkog ponašanja baterijskog paketa s pripadajućim sustavom hlađenja. Električni dio modela omogućuje zadavanje opterećenja kroz programibilan izvor, čime se definiraju uvjeti rada poput konstantne struje ili profila nominalne struje. Na baterijskom bloku postavljen je mjerni podsustav koji prati ključne parametre: temperaturu ćelija, temperaturu rashladnog medija te stanje napunjenosti baterije. Na ovaj način dobiva se detaljan uvid u ponašanje paketa tijekom opterećenja i u kojoj mjeri sustav hlađenja uspijeva održati termičku stabilnost.



Slika 29 Simulink simulacijski model cijelog modula

Rashladni sustav temelji se na aluminijskoj ploči unutar koje su oblikovani serpentinasti kanali kroz koje kontinuirano protječe rashladni medij smjesa etilen-glikola i vode u omjeru 20/80 %. Aluminijska ploča nalazi se u izravnom kontaktu s donjom površinom baterijskog modula, što omogućuje prijenos topline s ćelija preko visoko vodljive metalne strukture prema rashladnoj kapljevini.

Rashladni medij se pomoću pumpe kontinuirano provodi kroz kanale. Na izlazu ploče prate se temperatura medija, porast temperature duž kanala i hidraulički pad tlaka. Ovi parametri omogućuju ocjenu učinkovitosti prijenosa topline te energetskih zahtjeva pumpe.

Na taj način simulacija omogućuje usporedno praćenje električkih parametara poput napona i stanja napunjenosti s termičkim parametrima poput temperature ćelija i rashladnog medija. Posebno je važna razlika između temperature ćelija i temperature rashladnog medija, jer ona ukazuje na kvalitetu kontakta i učinkovitost prijenosa topline. Sustav je osmišljen tako da se na temelju simulacijskih rezultata može procijeniti raspodjela temperature unutar baterijskog modula, učinkovitost hlađenja i eventualna potreba za optimizacijom protoka fluida ili geometrije kanala.

7.2.1 Slučaj bez električnog opterećenja baterije

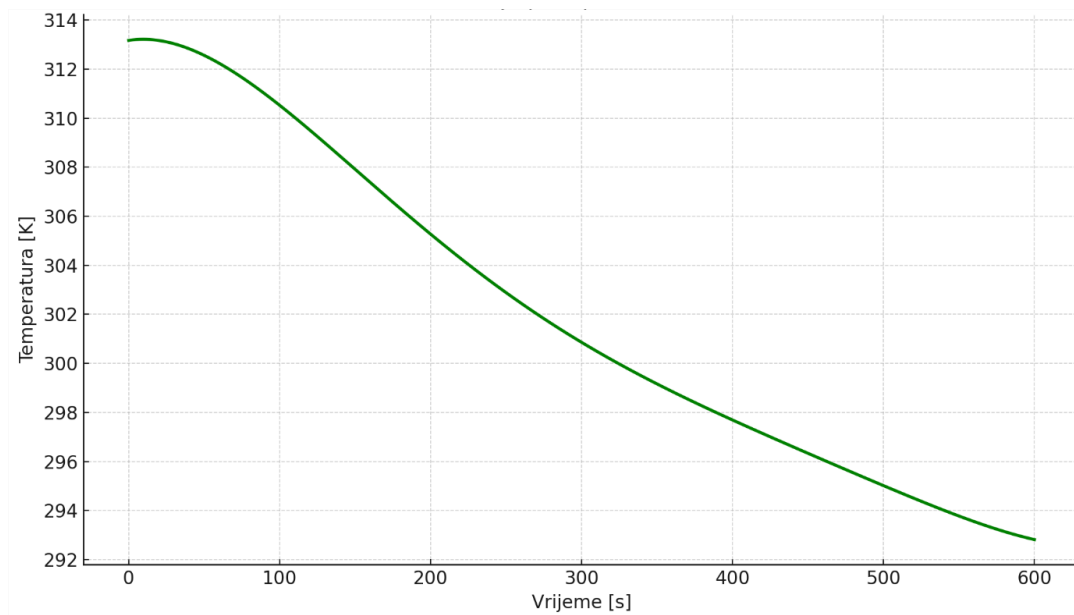
UVOD I PRETPOSTAVKE

U simulacijama promatramo neopterećen modul ($I = 0$ A), pa nema unutarnjeg grijanja, mijenja se samo toplina koju odvođi rashladni sustav. Baterija i rashladni medij u kanalu na početku su 40 °C ($313,15\text{ K}$). Hlađenje je serijsko kroz paralele, svaka od 7 paralela promatramo kao jednu cjelinu. Svaku paralelu i pripadni segment kanala opisujemo jednim “lumped” čvorom sa stalnim svojstvima, prijenos topline između baterije i kanala te uzduž kanala opisuje se konstantnim koeficijentima. Gubitci na okolinu i zračenje su zanemareni. Ulaz rashladnog medija je zadan kao stalna temperatura od $278,15\text{ K}$. Vrijeme je u sekundama od 0 do 600 s.

REZULTATI SIMULACIJE

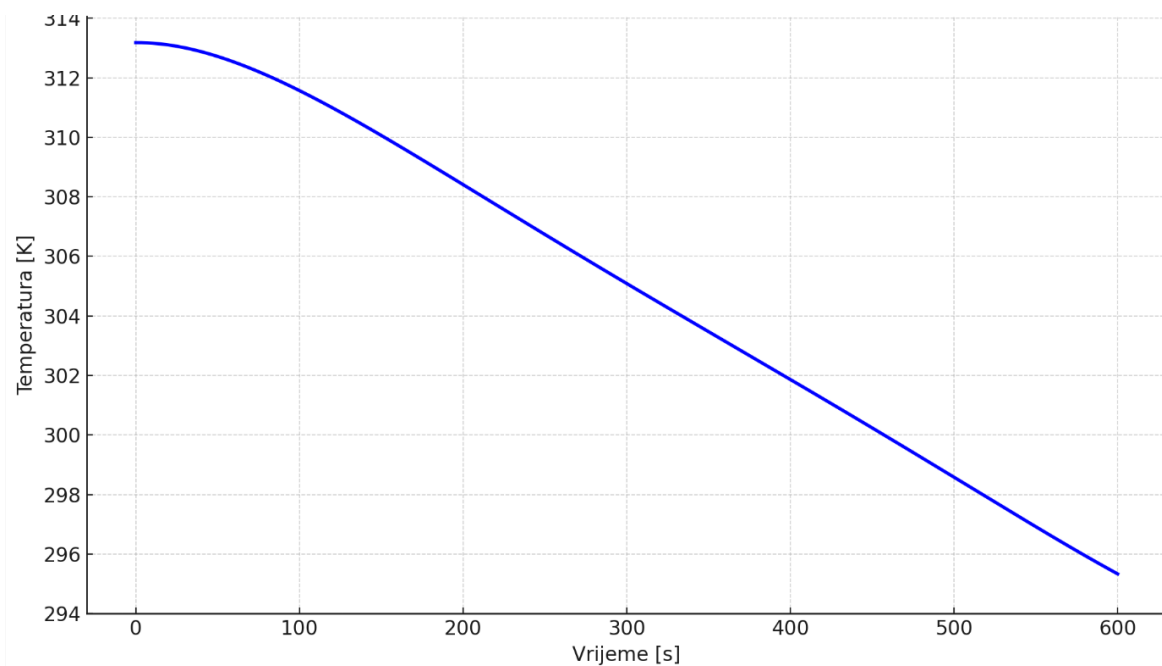
U ovom scenariju ispitan je neopterećeni baterijski sklop, električna struja je jednaka nuli pa nema unutarnje disipacije. Analizira se temperaturni odziv dviju krajnjih grana modula prve paralele (ulaz rashladnog sredstva) i posljednje sedme paralele (izlaz). Rashladni medij struji kroz serpentinasti kanal serijski, zbog čega se postupno zagrijava duž puta.

Temperatura prve paralele (Slika 30) monotono opada s $313,15\text{ K}$ (40 °C) na približno 293 K ($\approx 20\text{ °C}$) tijekom 10 min. Krivulja pokazuje brži početni pad i potom blaže opadanje kako se sustav približava kvazistacionarnom režimu. Takav oblik krivulje proizlazi iz toga što prva paralela prima najhladniji medij, a rashladni tok s malim toplinskim kapacitetom brzo preuzima toplinu i protokom je kontinuirano odnosi.



Slika 30 Temperaturni profil prve paralele

Zbog serijskog strujanja medija do pretposljednje (6. paralele) (Slika 31) dolazi topliji, pa se ona hladi sporije i završava na višoj temperaturi oko 298 K ($\approx 25^\circ\text{C}$) u 10 minuti. Razlika završnih vrijednosti prema prvoj paraleli iznosi oko 5 K što izražava termalni gradijent duž kanala.



Slika 31 Temperaturni profil pretposljednje paralele

7.2.2 Slučaj električnog opterećenja baterije

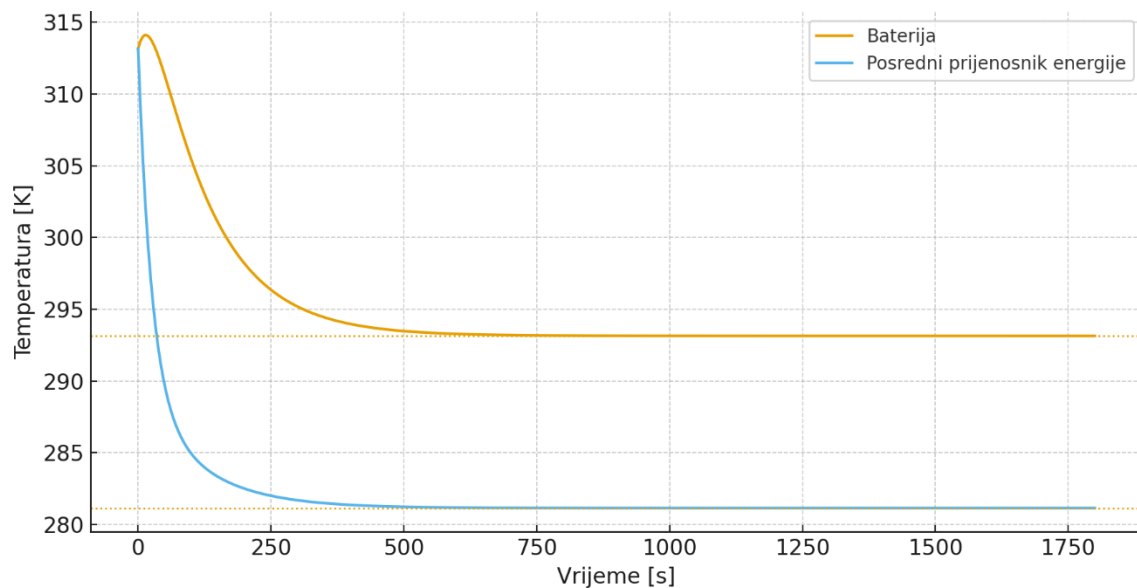
UVOD I PRETPOSTAVKE

U simulaciji električni dio paketa opterećen je stalnom strujom od 30 A, razvijanje topline određeno je Jouleovim gubicima pri tipičnom unutarnjem otporu ćelije oko $45\text{ m}\Omega$ uz male tolerancije među paralelama koje uzrokuju minimalne razlike u raspodjeli struje. Toplinski dio modela postavljen je “lumped” to jest svaka paralela i svaki segment kanala predstavljeni su jednim toplinskim čvorom sa stalnim svojstvima. Prijenos topline s baterija na kanal ima konačnu učinkovitost zbog toplinskog kontakta i geometrije, dok su svi izravni gubici na okolinu izvan rashladnog sustava zanemareni. Rashladni medij se dovodi kontinuiranim protokom na ulaznu temperaturu od 278.5 K. Na početku simulacije baterija i medij su temperature od 313.15 K. Ukupno trajanje simulacije je 1800 s. Na temelju ovih pretpostavki prikazani se rezultati u dva oblika: prosječne temperature baterije i rashladnog sredstva na razini cijelog sklopa te pojedinačne temperature svake od sedam paralela i pripadnih segmenata kanala.

REZULTATI SIMULACIJE

Rezultati simulacije prikazuju vremenski razvoj osrednjene temperature cijele baterije i osrednjene temperature rashladnog sredstva.

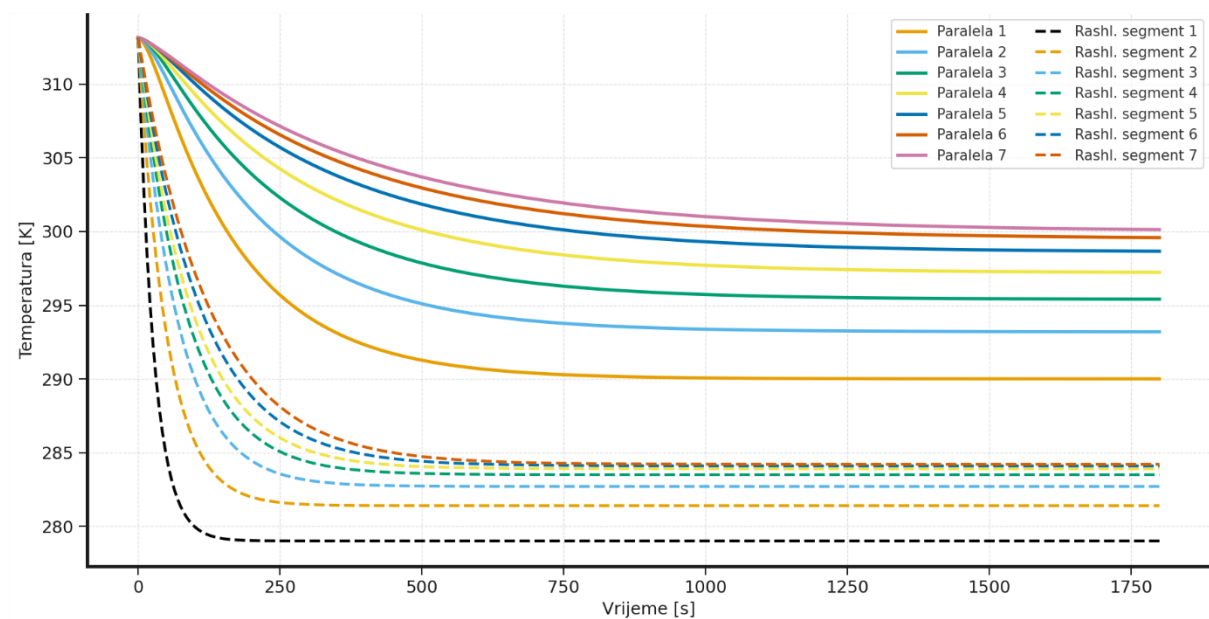
Slika 32 prikazuje vremenski razvoj osrednjene temperature cijele baterije i osrednjene temperature rashladnog sredstva. Simulacija započinje na 313.15 K za oba podsustava.



Slika 32 Prosječna temperatura baterije i posrednog prijenosnika energije

Plava krivulja rashladnog sredstva brzo se spušta prema ulaznoj vrijednosti i potom se stabilizira, što odražava mali toplinski kapacitet i kontinuirano odvođenje topline protokom. Narančasta krivulja baterije opada sporije jer ukupna masa i kapacitet baterijskog sklopa usporava hlađenje. U stacionarnom stanju održava se trajna razlika između prosječne temperature baterije i rashladnog sredstva. Rashladni medij ostaje hladniji dok baterija zaostaje nekoliko kelvina (≈ 11 K) zbog stalne disipacije topline pod opterećenjem i konačne učinkovitosti prijenosa topline prema kanalu.

Slika 33 prikazuje temperaturni odziv sedam paralelnih grana ćelija i sedam uzastopnih segmenata rashladnog kanala kroz koje medij teče serijski. Simulacija započinje s 313.15 K za bateriju i rashladni medij. Pune krivulje označavaju temperature pojedinih paralela baterije, a isprekidane krivulje temperature pripadnih segmenata rashladnog sredstva. Budući da medij najprije prolazi preko Paralele 1, ona se izlaže najnižoj temperaturi rashladnog sredstva i stoga se hladi najbrže te postiže najnižu stacionarnu temperaturu. Kako se rashladni medij uzduž kanala progresivno zagrijava, svaka sljedeća paralela (2–7) radi s toplijim medijem i završava na nešto višoj ravnotežnoj temperaturi. Tako nastaje stalan temperaturni gradijent od prve prema sedmoj paraleli.



Slika 33 Temperatura segmenata baterije i posrednog prijenosnika energije

Rashladni medij pokazuje brži prijelazni odziv reakciju od baterija (manji toplinski kapacitet) i brzo se poravnavaju u raspodijeljeni profil (najhladniji na ulazu, najtopliji pri izlazu).

Baterije se sporije približavaju svojim stacionarnim vrijednostima te se sustav stabilizira nakon duljeg prijelaznog razdoblja.

Interpretacija grafa naglašava da serijsko vođenje rashladnog sredstva posljedičnoj uzrokuje neujednačeno termičko opterećenje među paralelama

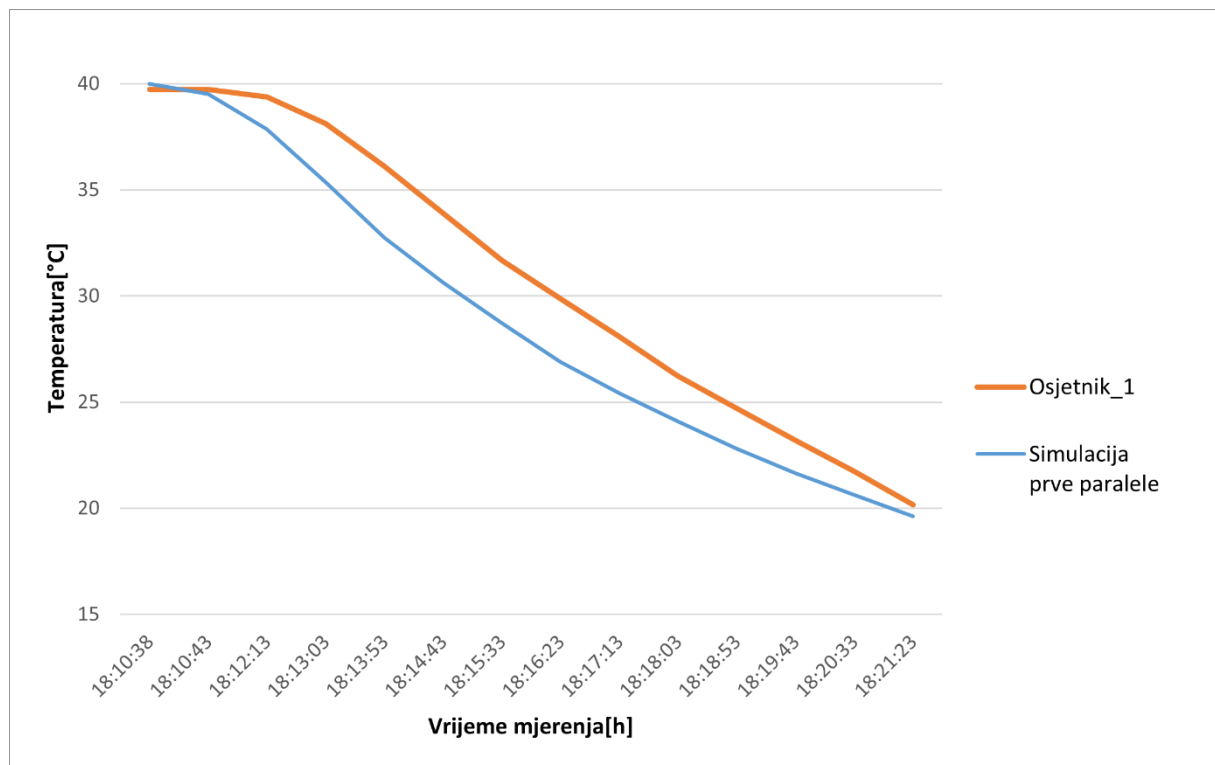
8. USPOREDBA REZULTATA I RASPRAVA

PREDNOSTI I NEDOSTACI U NAČINU MJERENJA, RAZLIKE U REZULTATIMA

Eksperimentalna mjerenja pružaju opipljiva i uglavnom vizualna mjerenja, u kojima se može pristupiti svakoj komponenti i njegovoj regulaciji direktno ili pomoću upravljačkih uređaja. Mjerenja se mogu provoditi kontaktno ili beskontaktno putem postavljenih senzora i sustava za akviziciju podataka čime se može dobiti velik raspon rezultata. Ipak postavljanje eksperimentalne linije iziskuje velike napore te je potrebno pravilno odabrati čitav niz komponenti da bi sustav pravilno radio. Ako samo jedna komponenta ne odgovara rasponu mjernog sustava (na primjer preslaba pumpa), sustav ili neće raditi uopće ili će raditi znatno lošije od očekivanog. Također često je u početku teško procijeniti opseg posla za postavljanje mjerne linije i njezinu širinu za moguća proširenja i daljnja mjerenja.

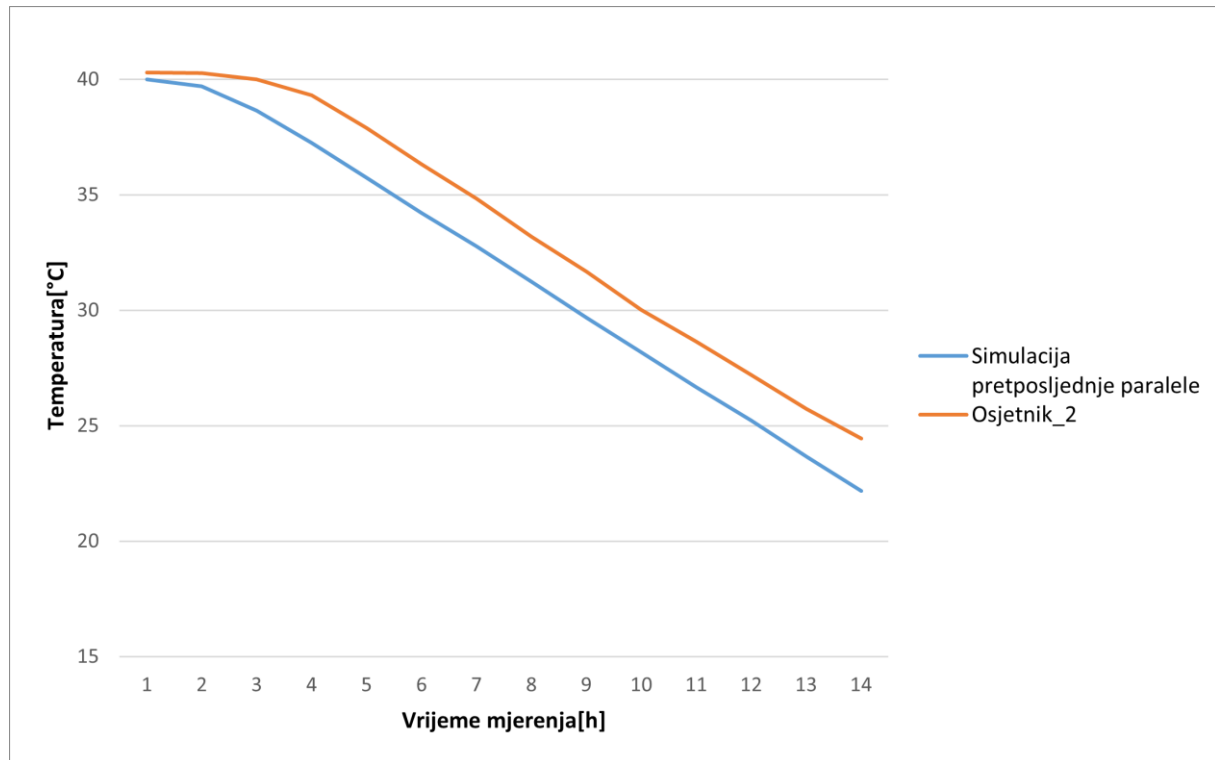
Ipak, eksperimentalna mjerenja nužna su za kalibriranje simulacijskih modela i njihovu provjeru. U velikom opsegu simulacijski modeli pružaju mogućnost brže promjene parametara komponenti ili dijelova sustava, čak i njegovu nadogradnju. S druge strane kad dođe do zastoja u postavljanju simulacijskog modela, često je potrebno preokrenuti cijeli model ili dio blokova da bi se dobili smisleni rezultati. Simulacijski modeli ovisno o složenosti modela zahtijevaju računala visokih performansa, što nije zanemarivo. Za određene simulacije potrebno je instalirati značajan broj nadogradnji pored osnovnog softverskog paketa npr. *Simscape* i *Battery Builder App*.

Rezultate simulacija često je teško procijeniti jer mogu izgledati dobro, no teško je zaključiti koliko su točni u stvarnosti. Zbog toga postavljanje jednostavnih linija koji uključuju slične sustave komponenti, kao što su krug hlađenja, hidraulički krug i baterija, omogućuju provjeru osnovnog simulacijskog modela. Jednom kad je takav model postavljen moguće je mijenjati komponente, parametre ili dijelove sustava i pretpostaviti ponašanje bez postavljanja svih dodataka na liniju. Primjer proširenja simulacijskog modela u odnosu na eksperimentalnu liniju je dodavanje više blokova baterija i sukladno tome povećanje kapaciteta sustava hlađenja, bez mijenjanja isparivača, kondenzatora, kompresora i pumpe u mjernoj liniji. Drugi primjer je promjena vrste baterije, nadogradnja sustava grijanja ili hlađenje pri punjenju i pražnjenju (električno opterećenje baterije).



Slika 34 Usporedba temperaturnog profila osjetnika 1 i simulacije prve paralele

Krivulje mjerenja osjetnikom 1 i simulacije prve paralele (Slika 34) pokazuju isti oblik brži početni pad, zatim sporije snižavanje kako se sustav približava kvazistacionarnom režimu. Obje kreću s $\approx 313,15$ K (40 °C) i padaju prema $\approx 292\text{--}294$ K (19–21 °C) u promatranom intervalu. Simulacija je niže temperature od mjerenja (1–3 K), osobito u srednjem dijelu. Takvo odstupanje je očekivano jer je u modelu kontakt baterija i kanala homogen, ulazna temperatura tekućine idealizirana, a inercija senzora i lokalna neujednačenost protoka nisu eksplicitno modelirane. U praksi ulazni krak i razdjelnik dodatno zagrijavaju medij neposredno prije prve paralele, pa mjerena krivulja ostaje nešto toplija.



Slika 35 Usporedba temperaturnog profila osjetnika 2 i simulacije 6. paralele

Usporedbom osjetnika 2 i simulacije pretposljednje paralele (6. paralela) (Slika 35 **Pogreška! Izvor reference nije pronaden.**) vidljiv je razmak između krivulja koji je izraženiji od prijašnje usporedbe (Slika 34). Krivulja mjerenja ostaje na višoj temperaturi za nekoliko Kelvina (2.5 K) prema kraju. Razlog je osjenjenje svih vrijednosti u posljednjoj paraleli dok je osjetnik 2 postavljen neposredno izlazu 6. paralele. Dodatno stvarni sustav ima gubitke na okolinu, savršeniji kontakt ćelija s pločom i moguć nesavršeni balans protoka po granama, što zadržava višu temperaturu mjerenja.

Simulacija i mjerenja dobro se slažu po obrascu ponašanja prve paralele. Prva paralela izložena najhladnijem mediju, hladi se najbrže i završava hladnija, dok posljednja ostaje toplija zbog serijskog zagrijavanja duž kanala. Uočene razlike proizlaze iz idealizacije ukupne toplinske provodnosti kontakta i raspodjele protoka u modelu, promatranja paralela od 74 baterija kao cjelina, pojednostavljenog profila ulazne temperature te utjecaja senzora i toplinskih priljeva u stvarnom sklopu. Za finije podudaranje napraviti detaljan model gdje se svaka ćelija ili njeni dijelovi simuliraju kao cjelina, koristiti mjerenu ulaznu temperaturu (promjenjiva), uključiti gubitke te modelirati neravnomjernu raspodjelu protoka.

9. ZAKLJUČAK

Električna vozila pokazuju značajan napredak u tehnologiji zadnjih nekoliko godina, a poseban fokus stavlja se na Li-ion baterije. Li-ion baterije predstavljaju ozbiljne izazove za priuštivost i sigurnost električnih vozila. Zbog specifičnih fizikalnih svojstva i ponašanja Li-ion baterije imaju uzak temperaturni raspon rada te svako odstupanje od istog dovodi do degradacije kapaciteta, ubrzanog starenja te potencijalno termalnog bijega baterije. Jedan od ključnih problema pravilnog upravljanja baterijskim paketima je upravljanje sustavom grijanja i hlađenja (BTMS eng. Battery Thermal Management System). Predstavljene su osnove baterijskih sustava te klasifikacija hlađenja baterijskih paketa električnih automobila. Iako svjetski trendovi pokazuju nove mogućnosti velikih cilindričnih ćelija, u ovom radu napravljen je eksperimentalni i simulacijski model s 444 komercijalno dostupne 18650 cilindrične baterijske ćelije, koji se može proširiti i na druge vrste baterijskih paketa različitih proizvođača i vrsta ćelija. Također, dana je literatura koja uključuje i nekoliko vrsta grijanja i električne postavke modeliranja koje mogu nadograditi simulacijski model.

Izvedeno je eksperimentalno mjerenje hlađenja baterijskog paketa indirektnim hlađenjem kapljevinom kroz mikrokanalni razvod baterijskog paketa. Opisane su komponente hidrauličkog kruga i kruga radne tvari te predstavljeni obrađeni podaci dobiveni mjerenjem. Iznesena je važnost i potencijal razvoja termodinamičkih i hidrauličkih simulacijskih modela te kompleksnost koju je potrebno uzeti u obzir pri hlađenju baterijskog bloka. Izvedena su dva simulacijska modela, od kojih jedan detaljan na razini ćelije i drugi objašnjen jednostavnom konfiguracijom cijelog baterijskog bloka. Oba simulacijska modela izrađena su u softveru MATLAB. Usporedbom rezultata pokazana su odstupanja u iznosu 1-3 K, što se najviše pripisuje osrednjavanju vrijednosti paralela simulacijskog modela u odnosu na točnu poziciju osjetnika na baterijskom paketu. Daljnjim razvojem eksperimentalne linije, termalnih i hidrauličkih simulacijskih modela moguće je pokazati termalno ponašanje različitih vrsta baterija u različitim uvjetima kao što je punjenje ili pražnjenje baterija.

10. ZAHVALA

Zahvaljujemo se mentoru prof.dr.sc. Vladimiru Soldu na ukazanoj prilici za rad na veoma zanimljivoj i aktualnoj temi te na svojoj pomoći tijekom pisanja ovoga rada. Vjerujemo da je ovom eksperimentalnom linijom otvoreno novo područje ispitivanja na našem Fakultetu te se nadamo da će razvoj mjerne linije i simulacijskog modela koristiti i mnogima nakon nas.

Također se zahvaljujemo Nikoli Vujnoviću, mag. ing. mech., iz tvrtke Rimac Technology d.o.o. koji je korisnim savjetima pomogao pri razvoju simulacijskog modela baterijskog modula.

SAŽETAK

Jelena Križaić, Iva Mraz

Ovim radom analizirana je dostupna literatura koja se bavi kemijskim, električnim i termodinamičkim potencijalom Li-ion baterija. Poseban naglasak stavljen je na vezu temperature s kapacitetom napunjenosti i starenjem baterije. Proučene su dostupne metode hlađenja baterijskih paketa te je odabrano indirektno hlađenje vodljivom kapljevnom kao temelj daljnjih analiza.

Izrađena je eksperimentalna linija te predstavljen odabir komponenti hidrauličkog kruga i kruga radne tvari. Za mjerenje je odabran modul s 444 komercijalno dostupne cilindrične 18650 baterijske ćelije. Provedeno je mjerenje dinamike aktivnog hlađenja električno neopterećene baterije nakon zagrijavanja iste na 40°C. Zabilježeni su mjerni podaci temperaturnih osjetnika, osjetnika tlaka i protokomjera koji su obrađeni te grafički prikazani za lakšu daljnju usporedbu.

Izrađena su dva simulacijska modela u softveru MATLAB koja oponašaju hlađenje baterije iz eksperimenta. Prvi model predstavlja detaljniju mogućnost analize te je zbog kompleksnosti prikazan na samo jednoj ćeliji. Drugi model pojednostavljuje termodinamički model na serije i paralele te tako formira konfiguraciju bloka. Osrednjuje temperature po paralelama što mu je nedostatak za usporedbu s osjetnicima na specifičnoj poziciji. Simulacijom su postignuti dobri prvi rezultati te se razlikuje 1-3 K od linije eksperimenta. Pretpostavka simulacije je također i savršen kontakt ćelije i rashladnog sredstva, što ubrzava proces hlađenja simulacije. Dodatno očitavanje temperature simulacije je direktno izračunato, dok eksperimentalno ovisi o kontaktu osjetnika i površine.

Predložene simulacije mogu poslužiti za daljnji razvoj detaljnog modela te se mogu primijeniti na druge vrste baterija. Također, ovim eksperimentom uzeto je hlađenje bez električnog opterećenja, dok je simulacijom pokazano i hlađenje s električnim opterećenjem. Za takvo mjerenje potrebni su posebni uređaji koji simuliraju punjenje i pražnjenje električne baterije, ali isto tako dodaju u simulaciju korištenje električnog kruga i varijaciju napona i struje.

Ključne riječi: BTMS, hlađenje Li-ion baterije, simulacijski model hlađenja, eksperimentalni postav

SUMMARY

Jelena Križaić, Iva Mraz

This work analyzes the available literature addressing the chemical, electrical, and thermodynamic potential of Li-ion batteries. Particular emphasis was placed on the relationship between temperature parameters, state of charge, and battery aging. Various battery pack cooling methods were examined, with indirect liquid cooling selected as the basis for further analyses.

An experimental setup was developed, including the selection of components for the hydraulic and working fluid circuits. A traditional cylindrical 18650 battery, widely used in practice, was chosen for measurement, along with a module consisting of 444 cells. Cooling was tested on a deactivated battery after preheating it to 40 °C. Measurement data from temperature sensors, pressure sensors, and a flow meter were collected, processed, and graphically presented for easier comparison.

Two simulation models replicating the experimental battery cooling process were developed in MATLAB. The first model enables more detailed analysis but, due to its complexity, was applied to a single cell. The second model simplifies the thermodynamic behavior into series and parallel connections, thus forming a block configuration. It averages temperatures across parallel strings, which is a limitation when comparing with sensor data from specific positions. Simulation results showed good initial agreement, with deviations of 1–3 K compared to the experimental data. A key assumption of the simulation is perfect contact between the cell and the coolant, which accelerates the simulated cooling process. Furthermore, temperature readings in the simulation are calculated directly, while in the experiment they depend on the surface contact.

The proposed simulations can serve as a foundation for further development of a detailed model and can be applied to other types of batteries. In addition, the experiment considered cooling without electrical load, while the simulations also demonstrated cooling under load. Such measurements require specialized devices to simulate battery charging and discharging, as well as incorporating the electrical circuit with varying voltage and current into simulation.

Keywords: BTMS, Li-ion battery cooling, cooling simulation model, experimental rig

POPIS LITERATURE

- [1] »<https://www.europarl.europa.eu/topics/hr/article/20190313STO31218/emisije-co2-u-prometu-eu-a-cinjenice-i-brojke>,« [Mrežno].
- [2] »<https://www.europarl.europa.eu/topics/hr/article/20180301STO98928/emisije-staklenickih-plinova-po-drzavama-i-sektorima-infografika>,« [Mrežno].
- [3] »<https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>,« [Mrežno].
- [4] »<https://www.poslovni.hr/trzista/koja-europska-drzava-ima-najveci-broj-automobila-na-tisucu-stanovnika-evo-kako-stoji-hrvatska-4425133>,« [Mrežno].
- [5] M.Bekavac, »Indirektne emisije ugljičnog dioksida iz električnih, Diplomski rad FKIT,« 2025..
- [6] V.Safavi, N. Bazmohammadi i e. al., »A battery degradation-aware energy management system for agricultural microgrids,« *Journal of Energy Storage*, December 2024.
- [7] E. Grunditz i T. Thiringer, »Performance analysis of current BEVs based on a comprehensive review of specifications,« *IEEE Trans. Transp. Electr.*, svez. 2, br. 270-289, 2016.
- [8] Z. Li, A. Khajepour i J. Song, »A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles,« *Energy*, svez. 182, br. 824–839, 2019..
- [9] »IEA, Global EV Outlook 2023,« [Mrežno].
- [10] »<https://www.energetika-net.com/odrzivi-promet/eu-zaostaje-za-ciljem-nedostaje-2-6-milijuna-punionica-za-elektricna-vozila-do-2030>,« [Mrežno].
- [11] »BloombergNEF (BNEF) — godišnje istraživanje cijena baterija: 2010.,« [Mrežno].
- [12] A. Tankou, »"Approaches to mitigate electric vehicle fire risks in enclosed spaces,»,« *Research Brief, IZEVA*, 2024..
- [13] S. M. e. al., »Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review,« *Elsevier B.V.*, 2018.

- [14] S. Ma i ostali, »Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review,« *Progress in Natural Science: Materials International*, 2018..
- [15] L. Zhu, F. Xiong, H. Chen, D. Wei i ostali, »Thermal analysis and optimization of an EV battery pack for real applications,« 2020..
- [16] Y.Yao, X. Peng, L. G. al i ostali, »Experimental and Simulation-Based Study on Thermal Runaway Characteristics of 18650 Lithium-Ion Batteries and Thermal Propagation Patterns in Battery,« *Batteries*, 2025..
- [17] M.Falcone, E. P. B. d. Volo i ostali, »Lithium-ion battery thermal management systems: A survey and new CFD results,« *Batteries*, 2021..
- [18] S. Ananth i M. D. S. Rajadurai, »Battery Thermal Management in Electrical Vehicle - Review Article,« *IJISSE*, 2019.
- [19] S. Mazyar i H. Moghaddam, »"Designing battery thermal management systems(BTMS) for cylindrical Lithium-ion battery modules using CFD",« 2019..
- [20] R. Mahamud i C. Park, »Spatial-resolution, lumped-capacitance thermal model for cylindrical Li-ion batteries under high Biot number conditions,« *Appl. Math Model.*, pp. 37, 2787–2801, 2013.
- [21] F. Maletić, »Estimacija varijabli stanja i podacima vođeno modeliranje starenja litij-ionske baterije električnoga vozila,« *Doktorski rad, FER*, 2023..
- [22] J. L. J. Larminie, *Electric Vehicle Technology Explained*, 2012..
- [23] K. K.W i ostali, »Battery Performance and Cost Modeling for Electric Vehicle Applications,« *Argonne National Laboratory*, 2022..
- [24] A. Pesaran, »An Approach for Designing Thermal Management Systems for EV/HEV Battery Packs,« *NREL Report*, 1999..
- [25] J. e. a. Jaguemont, »A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures,« *Applied Energy*, 2016..
- [26] »https://www.researchgate.net/publication/257984459_The_future_of_mobility_and_its_critical_raw_materials,« [Mrežno].
- [27] »<https://www.evlithium.com/Blog/4680-battery-power-innovation.html>,« [Mrežno].
- [28] T. Woehrle, »Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications,« *Springer*, 2018.

- [29] T. Bandhauer, S. Garimella i T. Fuller, »A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries,« *J. Electrochem. Soc.*, 2011.
- [30] T. M. Bandhauer, S. Garimella i T. F. Fuller, »"A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries,« *Sves. %1 od %2pp.R1-R25*, p. vol.158, 2011.
- [31] »<https://www.lhsmaterials.com/what-is-thermal-runaway/>,« [Mrežno].
- [32] X.Zhu i L. Wang, »"Advances in materials for all-climate sodium-ion batteries",« 2020..
- [33] »<https://www.batterydesign.net/thermal-runaway/>,« [Mrežno].
- [34] D. Burow, K. Sergeeva, S. Calles, K. Schorb, A. Börger, C. Roth i P. Heitjans, »Inhomogeneous degradation of graphite anodes in automotive lithium ion batteries under low-temperature pulse cycling conditions,« *J. Power Sources*, *Sves. %1 od %2806-814*, 2016.
- [35] J. Jaguemont i L. Boulon, »Low temperature aging tests for lithium-ion batteries,« *In Proceedings of the 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, Riode Janeiro, Brazil*, br. pp. 1284–1289, 2015..
- [36] X. Feng, C. Xu, X. He i Wang, »Mechanisms for the evolution of cell variations within a LiNi_xCoyMnzO₂/graphite lithium-ion battery pack caused by temperature non-uniformity,« *J Clean. Prod.*, pp. 205, 447–462, 2018..
- [37] S. Basu, K. Hariharan, S. Kolake, T. Song, D. Sohn i T. Yeo, »Coupled electrochemical thermal modelling of a novel Li-ion battery pack thermal management system,« *Appl. Energ.*, pp. 181, 1–13, 2016..
- [38] C. Forgez, D. Vinh Do, G. Friedrich, M. Morcrette i C. Delacourt, »Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery,« *J. Power Sources*, pp. 195, 2961–2968, 2010..
- [39] T. Deng, Y. Ran, Y. Yin i P. Liu, »Multi-objective optimization design of thermal management system for lithium-ion battery pack based on Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II,« *Appl. Therm. Eng.*, pp. 164, 114394, 2020..
- [40] S. Panchal, I. Dincer, M. Agelin-Chaab i ostali, »Thermal modeling and validation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at different discharge raets and varying boundary conditions,« *Appl. Therm. Eng.*, pp. 96, 190–199, 2016..
- [41] C. Menale, F. D’Annibale, B. Mazzarotta i R. Bubbico, »Thermal management of lithium-ion batteries:An experimental investigation,« *Energy*, pp. 182, 57–71, 2019..

- [42] A. Hofmann, N. Uhlmann i C. Ziebert, »Preventing Li-ion cell explosion during thermal runaway with reduced pressure,« *Appl. Therm. Eng.*, pp. 124, 539–544., 2017.
- [43] Q. Wang, B. Jiang, B. Li i Y. Yan, »A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles,« *Renew. Sustain. Energy Rev*, pp. 64, 106-128, 2016..
- [44] J. Jaguemont i J. Van Mierlo, »A comprehensive review of future thermal management systems for battery-electrified vehicles,« *J. Energy Storage*, pp. 31, 101551, 2020..
- [45] »<https://ft.energy/the-importance-of-battery-thermal-management-systems/>,« [Mrežno].
- [46] H. Sun i R. Dixon, »Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack,« *J. Power Sources*, pp. 272, 404–414, 2014..
- [47] L. Saw, A. Tay i L. Zhang, »Thermal management of lithium-ion battery pack with liquid cooling. In Proceedings of the 2015 31st Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM)San Jose, CA, USA, 15–19 March 2015,« p. pp. 298–302.
- [48] J. Chen, S. Kang, E. Jiaqiang, Z. Huang i e. al, »Effects of diffent phase change material thermal management strategies on the cooling performance of the power lithium ion batteries,« *A review. J. Power Sources*, pp. 442, 227228, 2019.
- [49] J. Liang, Y. Gan i Y. Li, »Investigation on the thermal performance of a battery thermal management system using heat pipe under different ambient temperatures,« *Energ. Convers. Manag.*, pp. 155, 1–9, 2018.
- [50] »<https://tlk-energy.de/en/phase-diagrams/pressure-enthalpy>,« [Mrežno].
- [51] »<https://ch.mathworks.com/products/simscape-battery.html>,« [Mrežno].
- [52] »<https://www.batterydesign.net/base-vs-side-cooling-cylindrical-cells/>,« [Mrežno].
- [53] »<https://ch.mathworks.com/help/simscape-battery/ref/batterybuilder-app.html>,« [Mrežno].
- [54] M. YILMAZ, »Effect of Low and High Frequency Positive Pulsed Charging Currents on Aging and Capacity Fades in Lithium-Ion Batteries,« p. 677–684, 2024..

- [55] F. Wu, »Enhancing Sodium-Ion Battery Performance: A Focus on Electrode Materials,« u *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2024.
- [56] J. L. J. Larminie, *ELECTRIC VEHICLE*.
- [57] A. König, L. Nicoletti, D. Schröder, S. Wolff, A. Waclaw i M. Lienkamp, *An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric*, 2021..
- [58] M. Song, L. Cheng, M. Du i C. Sun, »Charging station location problem for maximizing the space-time-electricity accessibility: A Lagrangian relaxation-based decomposition scheme,« *Expert Systems with Applications*, svez. 22, 2023.
- [59] N. Wang, H. Pan i W. Zheng, »Assessment of the incentives on electric vehicle promotion in China,« *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, svez. 101, br. 177-189, 2017..
- [60] S. Saharan, S. Bawa i N. Kumar, »Dynamic pricing techniques for Intelligent Transportation System in smart cities: A systematic review,« *Comput. Commun.*, svez. 150, br. 603-625, 2020.
- [61] S. He, Y.-H. Kuo i D. Wu, »Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the,« *Transp. Res. Part C Emerg. Technol*, svez. 67, br. 131–148, 2016.
- [62] »Global EV Outlook 2022—Analysis—IEA,« [Mrežno]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>. [Pokušaj pristupa 28. travanj 2025.].
- [63] G. Nagasubramanian, »Electrical characteristics of 18650 Li-ion cells at low temperatures,« *J. Appl. Electrochem.*, br. 31, 99–104, 2001.
- [64] M. Rajacifar, P. Ghadimi, M. Rauegi i ostali, »Challenges and recent developments in supply and value chains of electric vehicle batteries: A sustainability perspective,« *Resour. Conserv. Recycl.*, svez. 180, 2022.