



# Sistem Manajemen Termal Baterai LiFePO<sub>4</sub> Menggunakan Pelat Pendingin *Mini Channel* untuk Aplikasi Kendaraan Listrik

Angga Ainul Yaqien<sup>1</sup>, Mohamad Yamin<sup>2\*</sup>, Cokorda Prapti Mahandari<sup>3</sup> 

<sup>1,2,3</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Gunadarma, Jakarta, Indonesia

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received March 03, 2023

Accepted October 13, 2023

Available online October 25, 2023

### Kata Kunci:

Mini Channel, LiFePO<sub>4</sub>, Pelat Pendingin Cair, Kendaraan Listrik

### Keywords:

Mini Channel, LiFePO<sub>4</sub>, Liquid Cooling Plate, Electric Vehicle, CFD



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2023 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

## ABSTRAK

Fungsi baterai *Lithium ion* adalah memberikan tenaga listrik yang cukup pada kendaraan listrik. Namun, baterai tersebut rentan terhadap suhu tinggi karena dapat menyebabkan *thermal run away* sehingga dibutuhkan *Baterai Thermal Management System* (BTMS). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sistem manajemen termal baterai (BMTS) dengan pendinginan aktif pada baterai LiFePO<sub>4</sub> untuk menurunkan temperatur kerja baterai dalam kondisi operasi yang optimal. Sistem BTMS dianalisis dengan pendekatan pemodelan tiga dimensi menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) untuk karakterisasi termal dengan *software* ANSYS Fluent 2023 R1. Model turbulensi standar *K- $\omega$*  digunakan pada sel baterai tunggal pada berbagai laju pelepasan untuk mengetahui kenaikan suhu baterai. Analisis juga dilakukan pada modul baterai dengan atau tanpa *mini channel*. Suhu modul baterai dalam kondisi pelepasan 5C tanpa sistem pendingin mencapai 354.63 K, kondisi ini dapat menyebabkan *thermal runaway*. Namun pengaruh sistem pendingin *mini channel* pada laju aliran massa  $1 \times 10^{-1}$  kg/s mampu mengurangi suhu maksimum modul baterai menjadi 12.14% pada debit 5C. Hasil penelitian ini dapat mengendalikan suhu pada baterai dalam kondisi operasi baterai yang optimal. Implikasinya sistem BTMS dengan *mini channel* ini dapat di terapkan pada kendaraan listrik dengan kondisi penggunaan daya yang tinggi.

## ABSTRACT

The function of the lithium-ion battery is to provide enough electric power in electric vehicles. However, batteries are very vulnerable to high temperatures because they can cause thermal runaway, so a Battery Thermal Management System (BTMS) is needed. In this paper, the BTMS system is analyzed using a three-dimensional modeling approach using Computational Fluid Dynamic (CFD) for thermal characterization with Ansys Fluent 2023 R1 software. The battery module consists of twelve cells with a capacity of 50 Ah and a nominal voltage of 3.3 V for each cell. A standard *K- $\omega$*  turbulence model was used on a single battery cell at various discharge rates to determine the temperature rise of the battery. Analysis was also carried out on battery modules with or without mini channels. The temperature of the battery module under discharge conditions of 5C without a cooling system reaches 354.63 K. This condition can cause thermal runaway. However, the influence of the mini channel cooling system at a mass flow rate of  $1 \times 10^{-1}$  kg/s was able to reduce the maximum temperature of the battery module to 12.14% at 5C discharge. The results of this study can control the temperature of the battery under optimal battery operating conditions. The implication is that the BTMS system with mini channels can be applied to electric vehicles with high power usage conditions.

## 1. PENDAHULUAN

Pada kendaraan konvensional proses pembakaran menghasilkan partikel tersuspensi padat, hidrokarbon, nitrogen oksida, dan oksida belerang yang mencemari lingkungan (Lu et al., 2020). Hal ini mendorong peneliti dunia untuk mengembangkan kendaraan listrik dengan baterai sebagai penyimpan sumber energi (Saw et al., 2016; Qian Wang et al., 2016). Solusi ini menjadikan kendaraan listrik yang ramah lingkungan. Namun, baterai sangat rentan terhadap suhu tinggi karena dapat memicu masalah keamanan seperti *thermal run away* (Qingsong Wang et al., 2012). Oleh karena itu kinerja baterai diupayakan dalam rentang suhu yang optimal agar dalam operasinya aman. Disamping itu dengan menjaga suhu operasi optimal, akan menjaga kinerja baterai dan menambah umur pakai baterai. Umumnya suhu operasi baterai lithium-ion adalah antara suhu 25 °C dan 40 °C (Akbarzadeh et al., 2021). Sistem BTMS biasanya menggunakan metode pendinginan untuk mencapai kisaran suhu yang sesuai, metode pendingin yang umum digunakan dalam baterai kendaraan listrik yaitu pendingin cair, pendingin udara, *Phase Change Material* (PCM) serta pendingin campuran (Hybrid) (Saw et al., 2018). Terdapat 2 metode sistem pendingin yaitu

\*Corresponding author.

E-mail addresses: [mohay@staff.gunadarma.ac.id](mailto:mohay@staff.gunadarma.ac.id) (Mohamad Yamin)

sistem pendingin aktif dan sistem pendingin pasif. Sistem pendingin aktif dapat menggunakan pendinginan zat cair ataupun gas (udara). Dibandingkan pendinginan aktif udara, pendinginan aktif cair merupakan metode manajemen termal yang paling efisien karena mampu mereduksi suhu lebih cepat dan lebih mampu mempertahankan suhu pada kondisi yang optimal (Chung & Kim, 2019; C. Wu et al., 2021). Sementara pendinginan aktif udara tidak efisien untuk menghilangkan panas baterai dalam skala besar (Verma et al., 2023; Q. Wang et al., 2014).

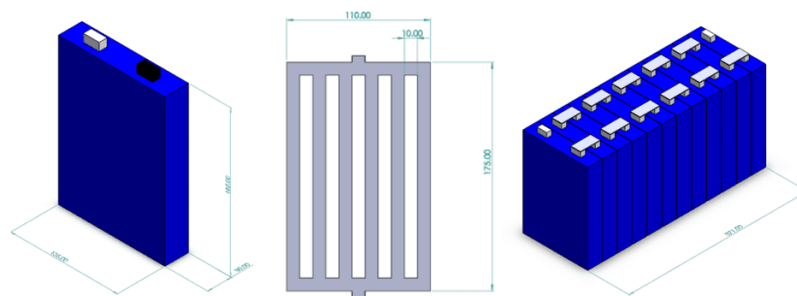
Pelat pendingin *mini channel* telah banyak digunakan dan dianalisis untuk baterai pada kendaraan listrik. Pelat pendingin *mini channel* merupakan sistem pendingin dengan pelat yang berisi saluran mini tempat fluida mengalir. Hal ini bertujuan untuk memindahkan panas dari sumber panas baterai melalui fluida secara konduksi. Untuk meningkatkan kinerja sistem pendingin *mini channel* bagian dalam dilakukan modifikasi untuk mencari desain *mini channel* yang paling optimal (Huang et al., 2019). Penelitian yang dilakukan oleh Wang dan timnya (J. Wang et al., 2021), merancang sistem pendingin baterai menggunakan pendingin cair berupa air. Pelat pendingin dibuat dengan saluran jaring laba-laba bionik, yang menunjukkan parameter struktural saluran dan lebar saluran memiliki pengaruh terbesar pada kinerja pelat pendingin. Penelitian serupa juga dilakukan pada tahun 2021, oleh Monika dan timnya (Monika et al., 2021), dengan merancang dan menganalisis pelat pendingin mini terdiri dari 5 saluran lurus mini dengan lebar 4 mm secara paralel. Dimana pelat pendingin mini diapit diantara dua baterai berbentuk prisma dan suhu maksimum modul baterai dipertahankan dalam jangkauan optimal. Selain merubah geometri atau memodifikasi saluran pada pelat *mini channel*, pengaruh laju aliran fluida pada pelat pendingin juga mempengaruhi reduksi temperatur baterai meskipun dalam beberapa kasus pengaruhnya tidak sebesar dengan pengaruh suhu masuk fluida pendingin (Lai et al., 2019).

Selain itu penggunaan pipa panas banyak diminati peneliti karena material pipa panas memiliki konduktivitas termal yang tinggi, struktur yang kompak, dan geometri fleksibel. Penelitian yang dilakukan oleh Feng dan timnya (Feng et al., 2018), menggunakan perangkat pendingin pipa panas (HPCD) dengan konveksi paksa yang digunakan untuk menekan suhu pada baterai. Hasil dari penelitian ini mengemukakan bahwa paket baterai dilengkapi dengan HPCD yang di konveksi paksa dapat mengurangi suhu maksimum sebesar 15°C pada tingkat 1 C proses pelepasan. Sistem HPCD banyak digunakan dengan menggabungkan pendinginan udara, karena pendingin udara memiliki biaya produksi yang murah, penggunaan energi yang lebih sedikit, sistem baterai lebih ringan dan memiliki tata letak yang lebih luas. Namun pendinginan jenis ini masih kurang optimal untuk mereduksi termal baterai sehingga dibutuhkan sistem manajemen termal dengan bahan perubahan fase PCM untuk mencapai pendinginan yang efisien dari sistem baterai di kondisi ekstrim (Behi et al., 2017; Park, 2013). Temuan penelitian sebelumnya menyatakan menggunakan pendingin hybrid berupa pipa panas dan PCM, dilakukan dengan rentang waktu operasi yang lebih lama dan suhu yang lebih sesuai (W. Wu et al., 2017). Hasilnya menunjukkan suhu tertinggi bisa dikendalikan di bawah 50°C pada tingkat debit 5 C. Penelitian berikutnya oleh Sun dan timnya, merancang struktur sirip baru yang terdiri dari sirip memanjang dan cincin silinder pada sistem pendingin PCM untuk meningkatkan perpindahan panas (Sun et al., 2019). Sistem PCM-Fin memiliki kinerja yang unggul dibandingkan sistem PCM murni, karena struktur sirip mampu meningkatkan area perpindahan panas dan dapat mengontrol kenaikan suhu baterai (Putra et al., 2020).

Sistem pendingin hybrid yaitu pipa panas dan PCM tujuannya mengidentifikasi PCM (beeswax dan Rubitherm RT 44 HC). Hasilnya menunjukkan penggunaan PCM mampu meningkatkan kinerja pendingin. Selain itu PCM jenis RT 44 HC menyerap lebih banyak panas baterai dari pada jenis beeswax. Dalam kasus lain pipa panas bisa dikombinasikan dengan sistem pendingin cair, seperti yang dilakukan Behi dan timnya (Behi et al., 2020). Kapasitas pendinginan dari sistem pendingin cair dan sistem pendingin cairan pipa panas tertanam (LCHP) di analisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pipa panas tunggal mampu mereduksi termal sebesar 29,1% pada tingkat pemakaian 8C. selain itu pada sistem pendingin cair LCHP menunjukkan kinerja yang lebih baik mampu mereduksi termal. Ini menunjukkan bahwa kombinasi pendinginan cair/udara dan pipa panas atau kombinasi pendinginan cair/udara dan PCM dapat meningkatkan efisiensi pendinginan dan keseragaman suhu pada baterai kendaraan listrik (Fathabadi, 2014; Yang et al., 2020). Penelitian tentang pendinginan pada BTMS telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya untuk menurunkan suhu baterai (Jin et al., 2021; Kong et al., 2021). Penelitian ini dilakukan dengan modifikasi geometri sistem pendingin *mini channel* 6 saluran lurus dan memvariasikan laju aliran massa untuk mereduksi thermal pada modul baterai LiFePO<sub>4</sub>. Sistem ini terdiri dari dua belas baterai prisma yang disusun secara seri, diterapkan diberbagai kondisi pelepasan (*discharging*). Kemudian model numerik tiga dimensi dikembangkan untuk meneliti aliran fluida dan perpindahan panas pada pelat pendingin cair *mini channel*. Efek dari laju aliran massa dipertimbangkan untuk mempelajari perilaku termal dari sistem pendingin yang dirancang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sistem manajemen termal baterai (BTMS) dengan pendinginan aktif pada baterai LiFePO<sub>4</sub> untuk menurunkan temperatur kerja baterai dalam kondisi operasi yang optimal.

## 2. METODE

Penelitian ini dilakukan secara numerik menggunakan *software* Ansys 2023 R1 (*academic licence*) dengan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Modul baterai prismaik berisi dua belas sel baterai diimplementasikan pada pelat pendingin cair. Pelat pendingin cair tersebut terjepit di antara baterai yang berdekatan, dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja perpindahan panas. Gambar 1 menunjukkan dimensi batrai LiFePO4 dan juga pelat dingin *mini channel*. Baterai sel memiliki panjang 135 mm, lebar 30 mm, tinggi 185 mm. Sel-sel dihubungkan melalui busbar, dan jarak antar sel adalah 3 mm. ukuran saluran pada *mini channel* yaitu 10 mm dengan menggunakan material aluminium yang terdapat pada ansys 2023 R1.



**Gambar 1.** Skema Pelat Pendingin Cair untuk Modul Baterai LiFePO4

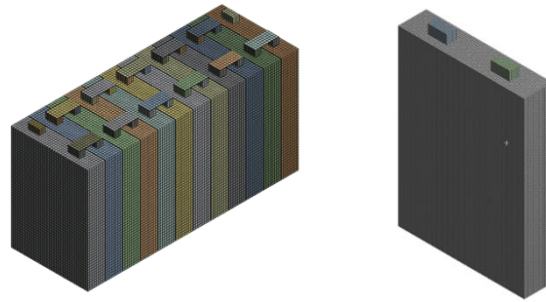
Pelat *mini channel* dengan pendingin air memiliki peran penting dalam mengontrol termal pada baterai. Panas yang dihasilkan didalam sel diserap melalui pelat pendingin cair dan dilepaskan melalui aliran fluida. Dalam penelitian ini, analisis sel baterai tunggal dan pengoperasian modul baterai tanpa sistem pendingin dan dengan sistem pendingin diimplementasikan. Bahan komposisi dan parameter yang terkait dengan termoelektrik diperlihatkan dalam [Tabel 1](#).

**Tabel 1.** Spesifikasi Sel Baterai LiFePO4 50 Ah

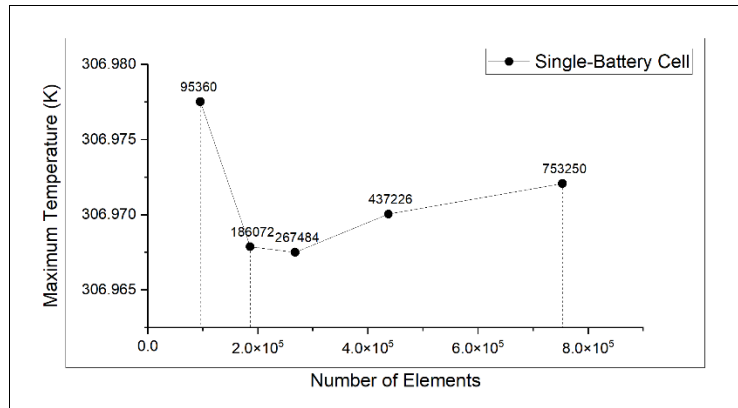
Specification	Value	Unit
Material for Electrolyte	Carbonate based	-
Voltage (Nominal)	3,3	V
Capacity of the Cell (Nominal)	50	Ah
Discharge Power	3367	W
Energy (Nominal)	160	Wh
Specific Energy	114	Wh/kg
Energy Density	247	Wh/L
Operating Temperature	-30 to 55	°C
Specific Power	2400	W/kg
Number of Cycles	Min. 300, approx. 2000	Cycle
Maximum Charge	500	A

Simulasi dilakukan dengan tiga tahap sel baterai tunggal, modul baterai tanpa sistem pendingin cair, dan modul baterai dengan sistem pendingin cair. Suhu awal untuk semua zona dikondisikan menjadi 298.15 K. Kondisi batas saluran masuk diatur menjadi *pressure inlet*, sedangkan untuk kondisi saluran keluar menjadi *outflow*. Model turbulensi yang dipilih adalah *K- $\omega$*  standar. Permukaan luar dari domain fluida didefinisikan sebagai konveksi bebas dengan koefisien perpindahan panas sebesar 5 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>. Kapasitas nominal sel baterai adalah 50 Ah dan dilakukan pelepasan untuk kondisi debit 1C, 2C, 3C, 4C, dan 5C. Dengan *time step* dikondisikan pada 30 dan maksimum *iteration step* dikondisikan pada 30, waktu yang didapat masing-masing pelepasan adalah 3510s, 1770s, 1200s, 810s, 630s.

Metode *meshing* yang digunakan yaitu model grid dengan menggunakan *multiple block mesh* dengan elemen *hexahedral* seperti terlihat pada [Gambar 2](#). Ukuran *mesh* divariasikan untuk melihat suhu maksimum dalam sel baterai tunggal dalam pelepasan 1C, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 3](#). Suhu maksimum baterai tunggal menurun dari 306,977 K pada 95.360 elemen menjadi 306,967 K pada 267.484 elemen. Oleh karena itu, jumlah grid ditetapkan pada 267.484 elemen untuk simulasi sel baterai tunggal. Setelah uji independensi grid, dilakukan simulasi dengan memvariasikan laju aliran massa, untuk mengetahui efek laju aliran massa dalam penurunan temperatur pada modul baterai dan divariasikan dengan laju aliran massa 1x10<sup>-3</sup> kg/s, 1x10<sup>-2</sup> kg/s, 1x10<sup>-1</sup> kg/s, dan 1 kg/s ([Zhou et al., 2019](#)).



**Gambar 2.** Model *Grid*: Sel Baterai Tunggal dan Modul Baterai dengan *Mini Channel*



**Gambar 3.** Uji *Grid* dengan Berbagai Nomor *Mesh*

Simulasi penelitian yang akan dilakukan terdiri dari tiga tahapan yang berbeda. Pertama, sel baterai tunggal dianalisis pada kondisi pelepasan 1C, 2C, 3C, 4C, dan 5C untuk mengetahui suhu maksimum pada masing-masing baterai tunggal (R. Liu et al., 2014). Pada tahap kedua, modul baterai dianalisis pada kondisi pelepasan 5C, dengan membandingkan modul baterai tanpa sistem pendingin *mini channel* dengan modul baterai dengan sistem pendingin *mini channel*. Pada tahap ketiga, pengaruh laju aliran massa terhadap penurunan temperatur modul baterai pada kondisi pelepasan 5C. Dalam penelitian ini diasumsikan bahwa fluida tidak dapat dimampatkan serta untuk parameter fisiknya konstan (H. ling Liu et al., 2019). Panas yang dihasilkan baterai berasal dari reaksi kimia eksotermis, dimana terjadi ketika proses pengisian atau pemakaian secara terus menerus. Untuk mencari *heat generation* baterai menggunakan persamaan *reaction heat*,  $\dot{Q}_r$  (4) dan *joule heat*,  $\dot{Q}_j$ . Sehingga panas yang dihasilkan baterai dapat dinyatakan dalam persamaan *Heat generation*,  $\dot{Q}_{gen}$  (6). Dalam simulasi panas yang dihasilkan dari baterai aktif dianggap homogen. Sifat termodinamika bahan yang digunakan dalam simulasi disajikan pada Tabel 2.

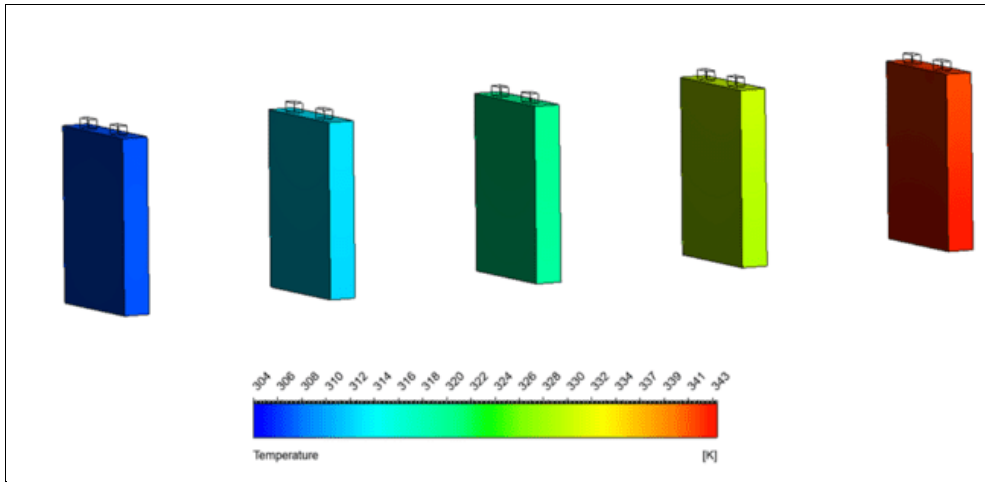
**Tabel 2.** Sifat Termodinamika Bahan yang digunakan dalam Simulasi

Material	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat (J/kgK)	Thermal Conductivity (W/Mk)
Coolant (Water)	998,2	4182	0,6
Cold Plate (Al)	2719	871	202
Battery	2500	1000	3

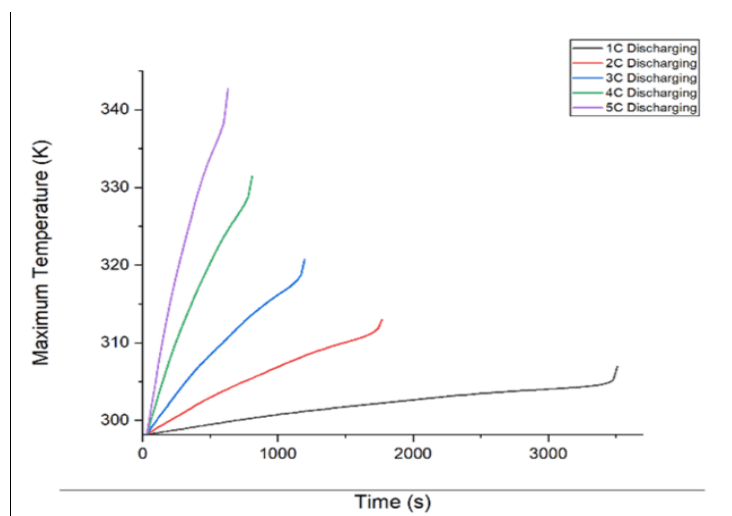
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Hasil

Simulasi baterai tunggal 50 Ah dilakukan untuk melihat distribusi suhu maksimum pada setiap pelepasan 1C, 2C, 3C, 4C, dan 5C. Hasil menunjukkan bahwa suhu meningkat ketika kondisi pelepasan meningkat. Kurva suhu maksimum dari waktu ke waktu pada analisis baterai tunggal disajikan pada Gambar 4, dan Gambar 5.

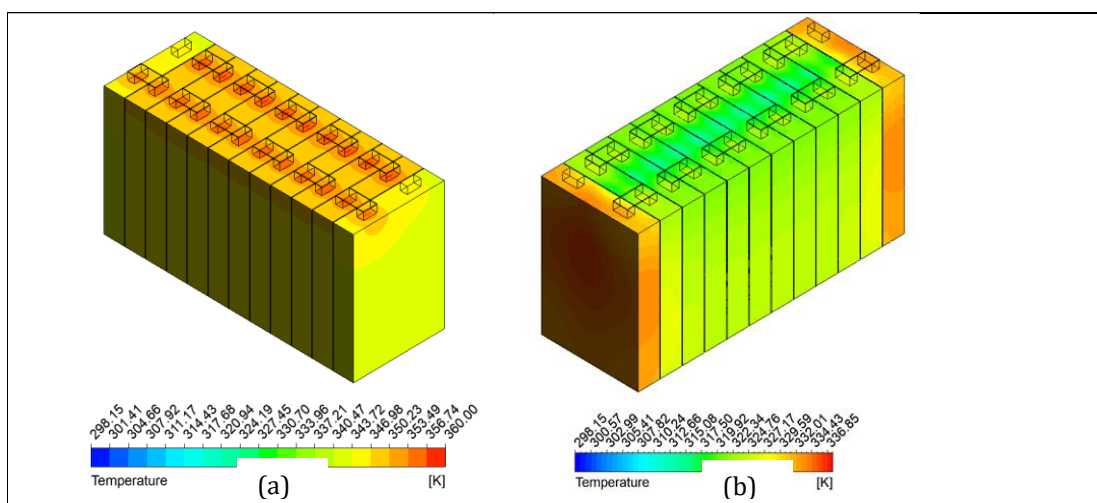


Gambar 4. Distribusi Suhu Baterai Tunggal setelah Pelepasan: (a) 1C, (b) 2C, (c) 3C, (d) 4C, dan (e) 5C



Gambar 5. Kurva Suhu Maksimum di Berbagai C-rate pada Baterai Tunggal dalam Simulasi

Modul baterai dua belas sel disusun seri dianalisis pada kondisi pelepasan 5C. Pertama, simulasi dilakukan pada modul baterai tanpa sistem pendingin cair *mini channel* untuk menyelidiki suhu yang dihasilkan. Suhu maksimal pada modul baterai mencapai 354.63 K disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Distribusi Suhu Modul Baterai, (a) Tanpa *Mini Channel*, (b) dengan *Mini Channel* Setelah Pelepasan 5C

Pada modul baterai dengan sistem pendingin cair *mini channel* suhu maksimum baterai ketika ditambahkan sistem pendingin cair *mini channel* turun menjadi 335.91 K dengan laju aliran massa  $1 \times 10^{-3}$  kg/s dan menggunakan jenis fluida berupa air seperti pada Gambar 6 (b). Suhu maksimal modul baterai dapat dilihat pada Tabel 3.

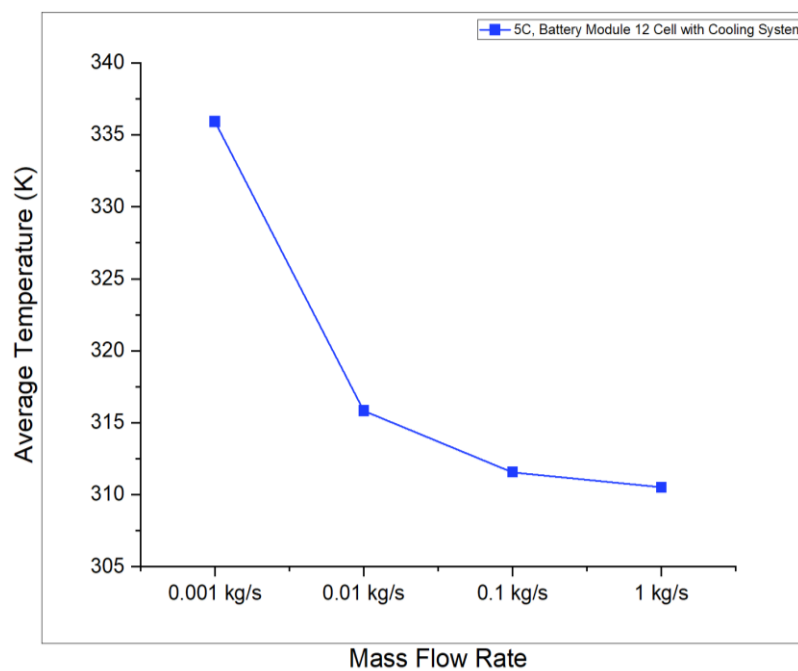
**Tabel 3.** Perbandingan Hasil Simulasi Antara Modul Baterai dengan dan Tanpa Mini Channel

Modul Baterai	Discharged C-rate	Mass Flow Rate (kg/s)	Simulated Temperature (K)
With Mini Channel	5C	$1 \times 10^{-3}$	335,91
Without Mini Channel	5C	$1 \times 10^{-3}$	354,63

Laju aliran massa memiliki pengaruh penting terhadap penurunan suhu pada baterai dan menjaga suhu baterai tetap berada pada suhu yang optimal. Variasi laju aliran massa dilakukan untuk mencari laju aliran massa yang cocok untuk menjaga suhu baterai pada penggunaan pelepasan 5C. Modul baterai dengan pelepasan 5C dianalisis dengan memvariasikan laju aliran massa air  $1 \times 10^{-3}$  kg/s,  $1 \times 10^{-2}$  kg/s,  $1 \times 10^{-1}$  kg/s, dan 1 kg/s. Hasil suhu maksimum dapat dilihat pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Hasil Simulasi Pengaruh Laju Aliran Massa

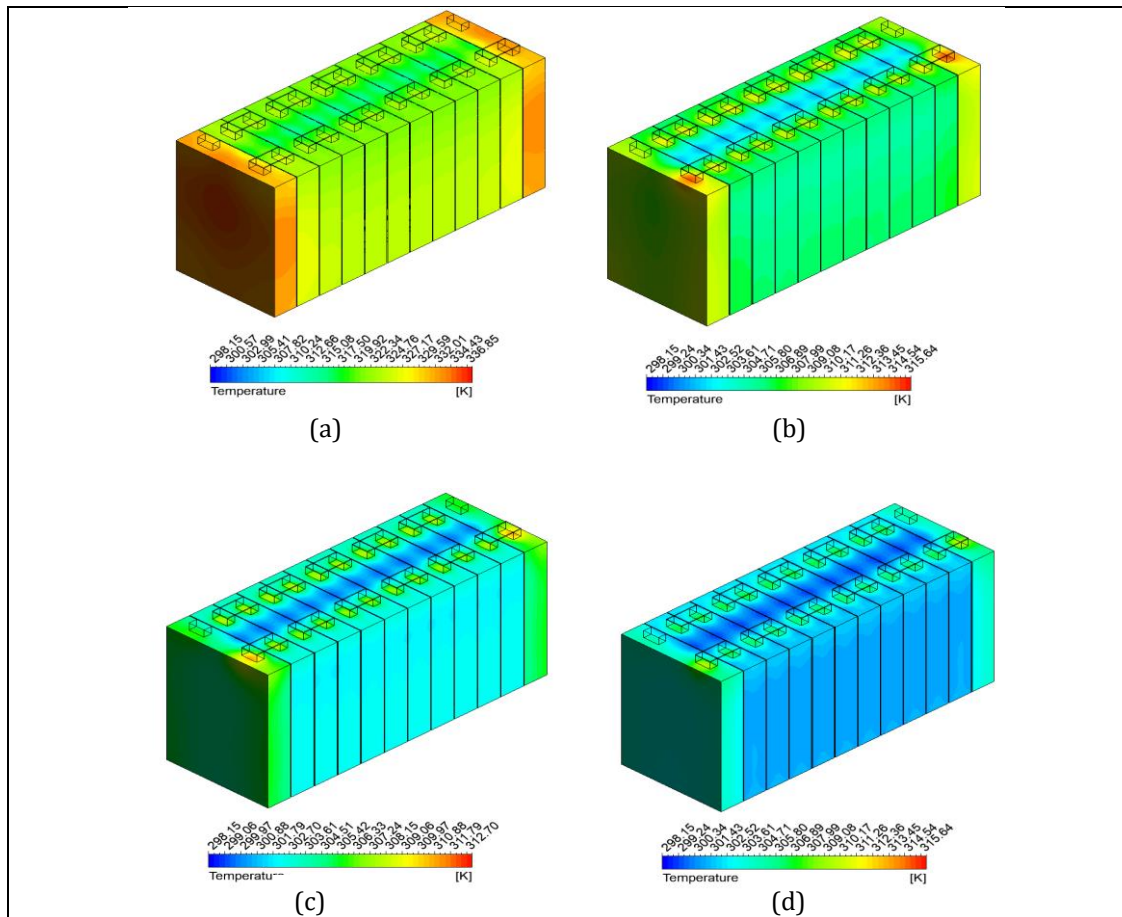
Mass Flow Rate (kg/s)	Discharged C-rate	Simulated Temperature (K)
$1 \times 10^{-3}$	5C	335,91
$1 \times 10^{-2}$	5C	315,83
$1 \times 10^{-1}$	5C	311,56
1	5C	310,51



**Gambar 7.** Pengaruh Laju Aliran Massa pada Suhu Modul Baterai

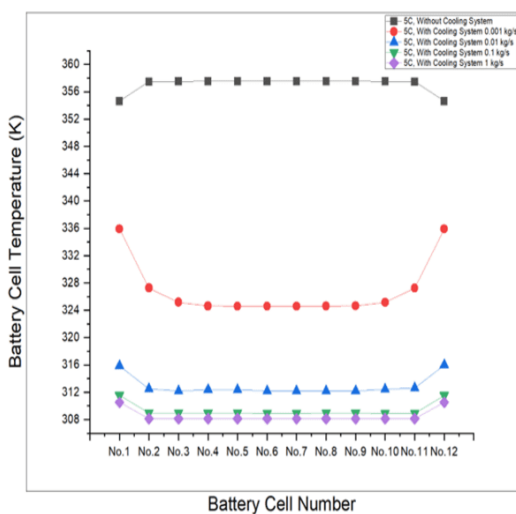
Distribusi suhu maksimum modul baterai dua belas sel telah disimulasikan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Terjadi penurunan pada modul baterai disetiap laju aliran massa. *Contour* hasil simulasi pada setiap laju aliran massa disajikan pada Gambar 8.



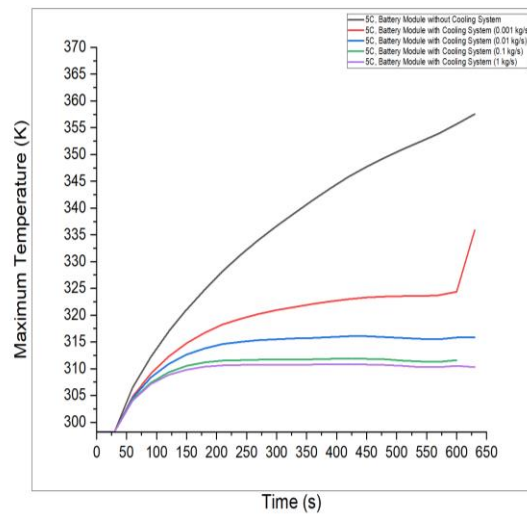


**Gambar 8.** Distribusi Suhu Maksimum Modul Baterai pada Laju Aliran Massa (a)  $1 \times 10^{-3}$  kg/s, (b)  $1 \times 10^{-2}$  kg/s, (c)  $1 \times 10^{-1}$  kg/s, and (d) 1 kg/s

Perbandingan distribusi suhu maksimum pada setiap sel ditunjukkan pada Gambar 9. Dimana sel baterai terdapat perubahan suhu maksimum yang hampir tidak terlihat pada setiap sel lainnya, hal ini terlihat pada sel No.2 sampai No.11 pada laju aliran massa  $1 \times 10^{-2}$  kg/s,  $1 \times 10^{-1}$  kg/s, dan 1 kg/s dimana masing-masing berada pada suhu yang hampir konstan yaitu 312.5 K, 308.9 K, 308.1 K. Kurva suhu maksimum berdasarkan waktu pada analisis modul baterai sebesar 630s seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.

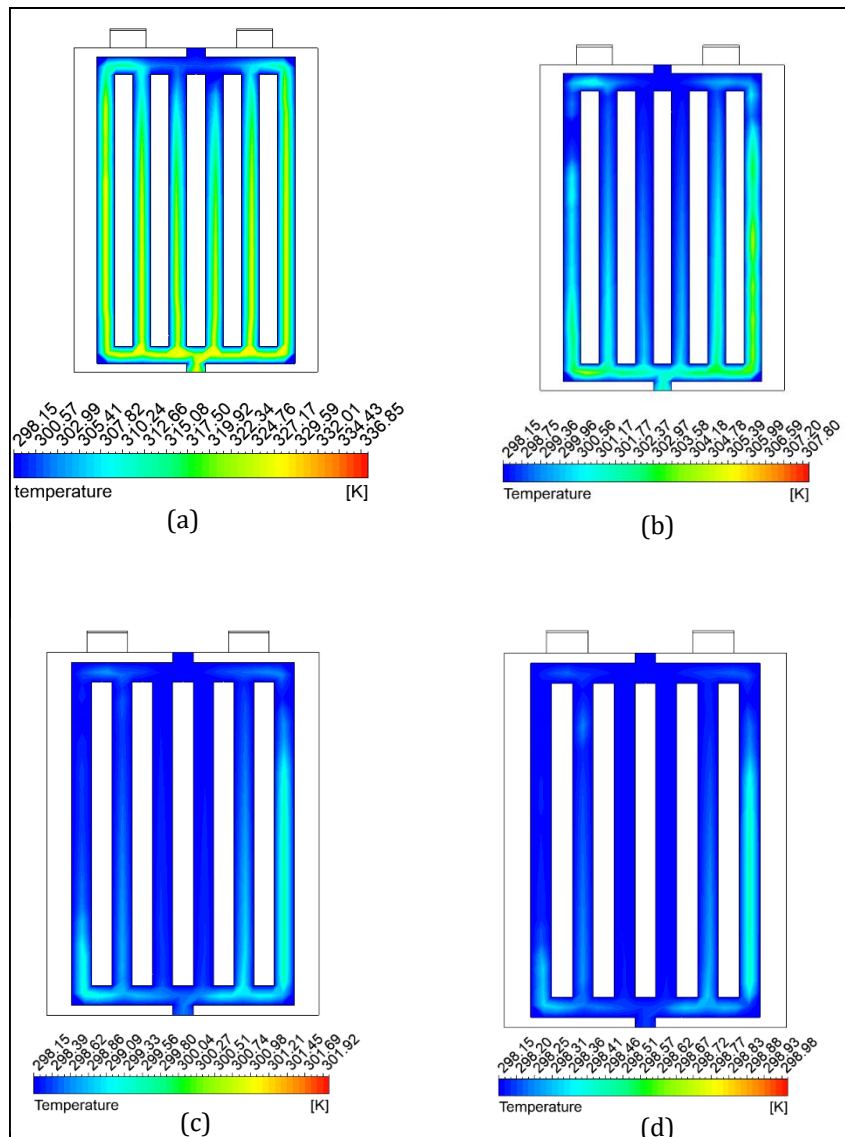


**Gambar 9.** Suhu Maksimum Modul Baterai dengan Variasi Laju Aliran Massa



**Gambar 10.** Kurva Suhu Maksimum pada Berbagai C-rate Modul Baterai dalam Simulasi

Hasil simulasi pada pelat pendingin cair *mini channel* dengan memvariasikan laju aliran massa dapat dilihat pada Gambar 11. Dimana terlihat bahwa temperatur fluida pada laju aliran massa  $1 \times 10^{-3}$  kg/s lebih tinggi dibandingkan yang lainnya. Pada penelitian ini kondisi suhu inlet yang digunakan yaitu 298.15 K, dapat dilihat pada Tabel 5.



Gambar 11. Suhu Cairan didalam Pelat Dingin pada Laju Aliran Massa (a)  $1 \times 10^{-3}$  kg/s, (b)  $1 \times 10^{-2}$  kg/s, (c)  $1 \times 10^{-1}$  kg/s, and (d) 1 kg/s

Tabel 5. Suhu Outlet Pelat Pendingin Cair *Mini Channel*

Mass Flow Rate (kg/s)	Temperature Inlet (K)	Discharged C-rate	Temperature Outlet (K)
$1 \times 10^{-3}$	298,15	5C	328,02
$1 \times 10^{-2}$	298,15	5C	301,58
$1 \times 10^{-1}$	298,15	5C	298,54
1	298,15	5C	298,19

### Pembahasan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan menggunakan metode simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD), didapatkan hasil penelitian bahwa suhu maksimum baterai tunggal setelah pelepasan pada tingkat 1C, 2C, 3C, 4C, dan 5C masing-masing adalah 306.96 K, 312.93 K, 320.77 K, 331.44 K, dan 342.72 K. Suhu maksimum baterai berada di luar rentang suhu yang ditentukan antara 243,15 K - 328,15 K ketika berada di bawah kondisi pelepasan 4C dan 5C. Van-Thanh, 2020 yang menunjukkan bahwa semakin tinggi pelepasan daya maka suhu yang dihasilkan baterai lebih tinggi dan waktu pengoperasian semakin



pendek (Maulana et al., 2019; Van-Thanh, 2020). Modul baterai dengan pelepasan 5C diuji dengan dan tanpa *mini channel* untuk menyelidiki suhu maksimum yang dihasilkan. Dimana suhu maksimum modul baterai tanpa sistem pendingin mencapai 354.63 K dalam hal ini suhu melebihi suhu optimal. Sedangkan suhu maksimum modul baterai dengan sistem pendingin *mini channel* mampu mereduksi suhu mencapai 335.91 K dengan laju aliran massa  $1 \times 10^{-3}$  kg/s dan menggunakan jenis fluida berupa air. Hasil penelitian pernah dilakukan oleh Xu et al, 2019 dengan menggunakan laju aliran massa air  $1 \times 10^{-3}$  kg/s dengan pelepasan daya baterai 1C (Wibowo, 2016; Xu et al., 2019). Namun untuk penggunaan pelepasan 5C masih kurang cocok untuk laju aliran massa  $1 \times 10^{-3}$  kg/s, suhu baterai masih berada diatas suhu optimal yang ditentukan.

Berdasarkan hasil simulasi perbandingan modul baterai dengan dan tanpa *mini channel*, bahwa pelat pendingin cair *mini channel* terbukti dapat menurunkan temperatur modul baterai pada kondisi pelepasan 5C. Namun temperatur yang dihasilkan belum memenuhi kriteria yang optimal sehingga dilakukan simulasi dengan memvariasikan laju aliran massa. Pada laju aliran massa  $1 \times 10^{-2}$  kg/s temperatur baterai telah berada pada kondisi yang optimal, namun pada laju aliran massa  $1 \times 10^{-1}$  kg/s temperatur baterai masih dapat diturunkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada laju aliran massa  $1 \times 10^{-1}$  kg/s dengan laju aliran massa 1 kg/s memiliki perbedaan suhu yang sangat kecil yaitu berbeda 1.05%. Penelitian dengan memvariasikan laju aliran massa pernah dilakukan juga oleh Monika et al, 2021 menggunakan baterai LiFePO<sub>4</sub> 7Ah dengan pelepasan 5C, namun untuk jenis baterai dengan nominal kapasitas 50 Ah dengan pelepasan 5C lebih cocok menggunakan laju aliran massa  $1 \times 10^{-1}$  kg/s (Monika et al., 2021). Pada Gambar 8. Menunjukkan bahwa temperatur pada sel baterai No.1 dan No. 12 memiliki suhu maksimum yang lebih tinggi dari pada sel baterai lainnya dan terjadi disetiap laju aliran massa. Temuan ini diperkuat dengan temuan penelitian sebelumnya menyatakan bahwa semakin tinggi inlet laju aliran massa maka semakin tinggi penurunan temperatur baterainya yang berarti proses pendinginan yang terjadi lebih optimal (Li et al., 2021). Penelitian yang telah dilakukan pada modul baterai dengan memvariasikan laju aliran massa diperlukan untuk mengoperasikan modul baterai tetap pada kisaran suhu yang optimal, sehingga didapat hasil bahwa laju aliran massa  $1 \times 10^{-1}$  kg/s sangat cocok untuk digunakan pada modul baterai 50 Ah pada kondisi pelepasan 5C.

#### 4. SIMPULAN

Model numerik tiga dimensi dianalisis pada sel baterai tunggal, modul baterai dengan atau tanpa sistem pendingin cair *mini channel*, dan variasi laju aliran massa. Hasil menunjukkan bahwa semakin besar pelepasan daya baterai maka semakin besar juga suhu yang dihasilkan. Sehingga penyelidikan tentang sistem pendingin baterai dilakukan untuk mengontrol suhu baterai tetap pada kisaran yang optimum. Hasil menunjukkan bahwa sistem pendingin *mini channel* 6 saluran lurus dengan memvariasikan laju aliran massa mampu menurunkan suhu pada modul baterai dengan pelepasan 5C.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Akbarzadeh, M., Jaguemont, J., Kalogiannis, T., Karimi, D., He, J., Jin, L., Xie, P., Van Mierlo, J., & Bercibar, M. (2021). A novel liquid cooling plate concept for thermal management of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 231, 113862. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113862>.
- Behi, H., Ghanbarpour, M., & Behi, M. (2017). Investigation of PCM-assisted heat pipe for electronic cooling. *Applied Thermal Engineering*, 127, 1132–1142. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.109>.
- Behi, H., Karimi, D., Behi, M., Jaguemont, J., Ghanbarpour, M., Behnia, M., Bercibar, M., & Van Mierlo, J. (2020). Thermal management analysis using heat pipe in the high current discharging of lithium-ion battery in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 32, 101893. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101893>.
- Chung, Y., & Kim, M. S. (2019). Thermal analysis and pack level design of battery thermal management system with liquid cooling for electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 196, 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.083>.
- Fathabadi, H. (2014). High thermal performance lithium-ion battery pack including hybrid active-passive thermal management system for using in hybrid/electric vehicles. *Energy*, 70, 529–538. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.046>.
- Feng, L., Zhou, S., Li, Y., Wang, Y., Zhao, Q., Luo, C., Wang, G., & Yan, K. (2018). Experimental investigation of thermal and strain management for lithium-ion battery pack in heat pipe cooling. *Journal of Energy Storage*, 16, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.01.001>.
- Huang, Y., Mei, P., Lu, Y., Huang, R., Yu, X., Chen, Z., & Roskilly, A. P. (2019). A Novel Approach For Lithium-

- Ion Battery Thermal Management With Streamline Shape Mini Channel Cooling Plates. *Applied Thermal Engineering*, 157, 113623. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.033>.
- Jin, L., Tian, J., Gao, S., Xie, P., Akbarzadeh, M., Kalogiannis, T., Berecibar, M., Lan, Y., Hu, D., Ding, Y., & Qiao, G. (2021). A novel hybrid thermal management approach towards high-voltage battery pack for electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 247, 114676. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114676>.
- Kong, W., Zhu, K., Lu, X., Jin, J., & Ni, M. (2021). Enhancement of lithium-ion battery thermal management with the divergent-shaped channel cold plate. *Journal of Energy Storage*, 42, 103027. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103027>.
- Lai, Y., Wu, W., Chen, K., Wang, S., & Xin, C. (2019). A compact and lightweight liquid-cooled thermal management solution for cylindrical lithium-ion power battery pack. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 144, 118581. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118581>.
- Li, Y., Guo, H., Qi, F., Guo, Z., Li, M., & Bertling Tjernberg, L. (2021). Investigation on liquid cold plate thermal management system with heat pipes for LiFePO<sub>4</sub> battery pack in electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116382. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116382>.
- Liu, H. ling, Shi, H. bo, Shen, H., & Xie, G. (2019). The performance management of a Li-ion battery by using tree-like mini-channel heat sinks: Experimental and numerical optimization. *Energy*, 189, 116150. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116150>.
- Liu, R., Chen, J., Xun, J., Jiao, K., & Du, Q. (2014). Numerical investigation of thermal behaviors in lithium-ion battery stack discharge. *Applied Energy*, 132, 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.024>.
- Lu, M., Zhang, X., Ji, J., Xu, X., & Zhang, Y. (2020). Research progress on power battery cooling technology for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 27, 101155. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101155>.
- Maulana, I., Aripin, & Chobir, A. (2019). Studi Elektrokimia Baterai Aluminium-. *Journal of Energy and Electrical Engineering (JEEE)*, 01(01), 25–28. <https://doi.org/10.37058/jeee.v1i1.1193>.
- Monika, K., Chakraborty, C., Roy, S., Dinda, S., Singh, S. A., & Datta, S. P. (2021). An improved mini-channel based liquid cooling strategy of prismatic LiFePO<sub>4</sub> batteries for electric or hybrid vehicles. *Journal of Energy Storage*, 35, 102301. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102301>.
- Park, H. (2013). A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 239, 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.102>.
- Putra, N., Sandi, A. F., Ariantara, B., Abdullah, N., & Indra Mahlia, T. M. (2020). Performance of beeswax phase change material (PCM) and heat pipe as passive battery cooling system for electric vehicles. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100655. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100655>.
- Saw, L. H., Poon, H. M., Thiam, H. S., Cai, Z., Chong, W. T., Pambudi, N. A., & King, Y. J. (2018). Novel thermal management system using mist cooling for lithium-ion battery packs. *Applied Energy*, 223, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.042>.
- Saw, L. H., Ye, Y., Tay, A. A. O., Chong, W. T., Kuan, S. H., & Yew, M. C. (2016). Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling. *Applied Energy*, 177, 783–792. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.122>.
- Sun, Z., Fan, R., Yan, F., Zhou, T., & Zheng, N. (2019). Thermal management of the lithium-ion battery by the composite PCM-Fin structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 145, 118739. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118739>.
- Van-Thanh, H. (2020). Transient Thermal Analysis of a Li-Ion Van-Thanh, Ho; Khoungsik, Chang; Sang Wook, Lee; Sung Han, Kim. 2020. "Transient Thermal Analysis of a Li-Ion Battery." *Battery. Energies*, 13, 2387. <https://doi.org/10.3390/en13092387>.
- Verma, A., Saikia, T., Saikia, P., Rakshit, D., & Ugalde-Loo, C. E. (2023). Thermal performance analysis and experimental verification of lithium-ion batteries for electric vehicle applications through optimized inclined mini-channels. *Applied Energy*, 335, 120743. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120743>.
- Wang, J., Liu, X., Liu, F., Liu, Y., Wang, F., & Yang, N. (2021). Numerical optimization of the cooling effect of the bionic spider-web channel cold plate on a pouch lithium-ion battery. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101124. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101124>.
- Wang, Q., Jiang, B., Xue, Q. F., Sun, H. L., Li, B., Zou, H. M., & Yan, Y. Y. (2014). Experimental investigation on EV battery cooling and heating by heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 88, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.083>.
- Wang, Qian, Jiang, B., Li, B., & Yan, Y. (2016). A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 106–128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.033>.

- Wang, Qingsong, Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., & Chen, C. (2012). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 208, 210–224. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038>.
- Wibowo, N. (2016). Upaya Peningkatan Keaktifan Siswa Melalui Pembelajaran Berdasarkan Gaya Belajar Di Smk Negeri 1 Saptosari. *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, 1(2), 128–139. <https://doi.org/10.21831/elinvo.v1i2.10621>.
- Wu, C., Wang, Z., Bao, Y., Zhao, J., & Rao, Z. (2021). Investigation on the performance enhancement of baffled cold plate based battery thermal management system. *Journal of Energy Storage*, 41, 102882. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102882>.
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Chen, K., & Wang, S. (2017). Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system. *Energy Conversion and Management*, 138, 486–492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.022>.
- Xu, X., Li, W., Xu, B., & Qin, J. (2019). Numerical study on a water cooling system for prismatic LiFePO4 batteries at abused operating conditions. *Applied Energy*, 250, 404–412. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.180>.
- Yang, W., Zhou, F., Zhou, H., Wang, Q., & Kong, J. (2020). Thermal performance of cylindrical lithium-ion battery thermal management system integrated with mini-channel liquid cooling and air cooling. *Applied Thermal Engineering*, 175, 115331. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115331>.
- Zhou, H., Zhou, F., Zhang, Q., Wang, Q., & Song, Z. (2019). Thermal management of cylindrical lithium-ion battery based on a liquid cooling method with half-helical duct. *Applied Thermal Engineering*, 162, 114257. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114257>.