

***Immersion Cooling* Untuk Manajemen Termal Baterai Lithium-Ion: Tinjauan Kritis Terhadap Pemilihan *Coolant*, Performa Termal, Keselamatan, dan Arah Riset Masa Depan**

Dhanang Sulistio Aji^{1*}, Rokhy Markhiyano², Jidan Dewa Saksana³, Litania Kusumaningrum⁴

^{1,2}Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Proklamasi 45, Sleman, Indonesia

³Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Proklamasi 45, Sleman, Indonesia

⁴Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas AKPRIND, Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding author: dhanangsulistioaji@up45.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan penggunaan baterai lithium-ion pada kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi menuntut sistem manajemen termal yang lebih efektif. Artikel kajian ini bertujuan meninjau potensi *immersion cooling* sebagai alternatif pendinginan baterai melalui analisis literatur terkait fluida dielektrik, performa termal, keselamatan, dan tantangan implementasi. Kajian dilakukan dengan menelaah artikel ilmiah tentang *battery thermal management system*, *single-phase* dan *two-phase immersion cooling*, pemilihan *coolant*, serta risiko *thermal runaway*. Hasil kajian menunjukkan bahwa *immersion cooling* berpotensi menurunkan temperatur maksimum dan meningkatkan keseragaman temperatur karena kontak langsung antara baterai dan fluida pendingin. Namun, penerapannya masih dibatasi oleh biaya *coolant*, viskositas, *pressure drop*, kompatibilitas material, kestabilan jangka panjang, dampak lingkungan, dan validasi pada level *battery pack*. Penelitian masa depan perlu diarahkan pada *coolant* ramah lingkungan, optimasi desain aliran, pengujian *thermal runaway*, serta analisis *techno-economic* dan *life cycle assessment*.

Kata kunci: *immersion cooling*; baterai lithium-ion; fluida dielektrik; *thermal runaway*

A. PENDAHULUAN

Baterai lithium-ion banyak digunakan pada kendaraan listrik, perangkat elektronik, dan sistem penyimpanan energi karena memiliki densitas energi tinggi, efisiensi baik, serta umur siklus yang relatif panjang. Meskipun demikian, performa dan keselamatan baterai sangat dipengaruhi oleh temperatur operasi. Temperatur yang terlalu tinggi dapat mempercepat degradasi, meningkatkan resistansi internal, menurunkan kapasitas, dan memperbesar risiko *thermal runaway*. Sebaliknya, temperatur yang terlalu rendah dapat menurunkan kemampuan daya dan memperlambat proses elektrokimia. Oleh sebab itu, *battery thermal management system* (BTMS) menjadi komponen penting dalam desain baterai modern (Bernardi et al., 1985; Bandhauer et al., 2011).

Pendinginan udara masih banyak digunakan karena sederhana dan murah, tetapi kemampuan perpindahan panasnya terbatas pada kondisi *fast charging*, *high C-rate discharge*, dan *battery pack* dengan densitas energi tinggi. Pendinginan cairan tidak langsung seperti *cold plate* atau *microchannel* mampu meningkatkan perpindahan panas, namun masih memiliki hambatan berupa resistansi termal kontak antara sel, material antarmuka, dan saluran pendingin (Wu et al., 2019). Keterbatasan tersebut mendorong pengembangan teknologi pendinginan yang dapat memberikan kontak termal lebih langsung.

Immersion cooling merupakan metode pendinginan dengan mencelupkan sel atau modul baterai ke dalam fluida dielektrik. Karena fluida berkontak langsung dengan permukaan baterai, resistansi termal dapat dikurangi dan distribusi temperatur antarsel berpotensi menjadi lebih seragam. Roe et al. (2022) menegaskan bahwa *immersion cooling* untuk baterai

lithium-ion dapat dikaji berdasarkan mekanisme kontak fluida, pola aliran, serta keberadaan perubahan fase. Patil et al. (2021) juga menunjukkan bahwa *dielectric fluid immersion cooling* merupakan pendekatan potensial untuk meningkatkan manajemen termal baterai.

Tujuan artikel kajian ini adalah menyusun sintesis kritis mengenai *immersion cooling* untuk manajemen termal baterai lithium-ion. Fokus pembahasan meliputi klasifikasi *single-phase* dan *two-phase immersion cooling*, pemilihan *coolant* dielektrik, parameter evaluasi performa termal, aspek keselamatan, tantangan implementasi, serta arah riset masa depan. Artikel ini disusun sebagai hasil kajian literatur sehingga tidak melaporkan eksperimen baru, melainkan merangkum dan menafsirkan temuan utama dari penelitian terdahulu.

B. PEMBAHASAN

1. Klasifikasi *immersion cooling*

Immersion cooling secara umum dapat dibagi menjadi *single-phase immersion cooling* dan *two-phase immersion cooling*. Pada *single-phase immersion cooling*, fluida tetap berada pada fase cair selama operasi. Perpindahan panas terjadi melalui konveksi alami atau konveksi paksa. Konfigurasi ini relatif sederhana, tekanan operasi rendah, dan lebih mudah dikendalikan. Jithin dan Rajesh (2022) menunjukkan bahwa pemilihan *dielectric fluid* memengaruhi distribusi temperatur baterai pada sistem *single-phase immersion cooling*. Liu et al. (2022) juga menunjukkan kelayakan sistem *oil-immersed cooling* melalui pendekatan eksperimen dan analisis teoretis.

Two-phase immersion cooling memanfaatkan perubahan fase cair-uap untuk menyerap panas dari permukaan baterai. Mekanisme ini dapat meningkatkan kapasitas pembuangan panas karena melibatkan panas laten penguapan. Wang et al. (2023) melaporkan bahwa *two-phase immersion liquid cooling* efektif untuk manajemen termal baterai Li-ion. Namun, sistem ini memiliki kompleksitas lebih tinggi karena memerlukan pengendalian tekanan, *boiling point*, kondensasi uap, dan pemilihan fluida yang aman. Wu et al. (2023) menunjukkan bahwa perbandingan *single-phase* dan *two-phase cooling* harus mempertimbangkan performa termal sekaligus kompleksitas sistem.

Dengan demikian, *single-phase immersion cooling* lebih sesuai untuk desain yang menekankan kestabilan, kesederhanaan, dan reliabilitas, sedangkan *two-phase immersion cooling* lebih sesuai untuk kondisi *heat generation* tinggi seperti *fast charging*. Pemilihan keduanya harus mempertimbangkan performa termal, kompleksitas sistem, biaya fluida, serta strategi keselamatan.

Tabel 1. Perbandingan *Single-phase* dan *Two-phase Immersion Cooling*

Aspek	<i>Single-phase immersion cooling</i>	<i>Two-phase immersion cooling</i>
Mekanisme dominan	Konveksi cairan tanpa perubahan fase	Pendidihan/penguapan dan kondensasi melalui panas laten
Kompleksitas sistem	Relatif sederhana; tidak memerlukan kondensor khusus pada sistem dasar	Lebih kompleks karena memerlukan kontrol uap, tekanan, dan kondensasi
Kapasitas pembuangan panas	Baik, tetapi bergantung pada <i>flow rate</i> dan sifat <i>coolant</i>	Sangat baik pada <i>heat flux</i> tinggi karena panas laten
Kebutuhan kontrol	Lebih mudah; cocok untuk aplikasi statis	Lebih sulit; risiko ketidakstabilan <i>boiling</i> perlu dikendalikan
Biaya dan keberlanjutan	Bergantung pada fluida; mineral/ <i>silicon oil</i> relatif lebih mudah diperoleh	Sering menggunakan fluida khusus yang lebih mahal dan dapat memiliki isu lingkungan

Aspek	<i>Single-phase immersion cooling</i>	<i>Two-phase immersion cooling</i>
Aplikasi potensial	<i>Battery pack EV, ESS, modul standar, dan konfigurasi dengan heat generation sedang-tinggi</i>	<i>Fast charging, high C-rate, dan sistem dengan heat generation sangat tinggi</i>

Tabel 1 menunjukkan bahwa perbedaan utama kedua metode terletak pada mekanisme perpindahan panas dan kompleksitas sistem. *Single-phase* lebih mudah diterapkan karena tidak membutuhkan pengendalian uap dan kondensor, sehingga sesuai untuk desain *battery pack* yang mengutamakan reliabilitas. Sebaliknya, *two-phase* lebih unggul pada beban panas tinggi karena memanfaatkan panas laten, tetapi biaya, kontrol tekanan, dan pemilihan *coolant* menjadi lebih kritis.

2. Pemilihan *coolant* dielektrik

Coolant merupakan komponen paling kritis karena fluida berkontak langsung dengan baterai dan komponen listrik. Sifat yang harus dipertimbangkan meliputi *dielectric strength*, resistivitas listrik, konduktivitas termal, kapasitas panas spesifik, viskositas, *boiling point*, *flash point*, stabilitas kimia, kompatibilitas material, biaya, toksisitas, dan dampak lingkungan. Fluida dengan konduktivitas termal dan kapasitas panas tinggi umumnya menguntungkan, tetapi viskositas tinggi dapat meningkatkan *pressure drop* dan konsumsi energi pompa.

Mineral oil dan *silicone oil* relatif mudah diperoleh dan memiliki sifat dielektrik, tetapi performa perpindahan panasnya perlu dioptimalkan melalui desain aliran. *Hydrofluoroether* dan *fluorinated fluids* banyak digunakan dalam penelitian karena sifat dielektrik dan titik didihnya mendukung *immersion cooling*, terutama pada sistem dua fase. Namun, biaya tinggi dan potensi dampak lingkungan menjadi kendala implementasi luas (Roe et al., 2022). Febriyanto et al. (2024) menggunakan HFE-7100 pada sistem *serpentine channel immersion cooling* untuk *battery pack* LFP 18650 dan menunjukkan bahwa *flow rate* serta *C-rate* berperan penting terhadap temperatur operasi.

Tabel 2. Kriteria *Coolant* Sebagai Implikasi Desain

Kriteria <i>coolant</i>	Makna teknis	Implikasi desain
<i>Dielectric strength/resistivity</i>	Kemampuan mencegah arus bocor dan <i>short circuit</i>	Harus memenuhi persyaratan keselamatan listrik pada <i>pack</i>
<i>Thermal conductivity</i>	Kemampuan menghantarkan panas secara konduksi	Semakin tinggi biasanya semakin baik untuk distribusi panas
<i>Specific heat capacity</i>	Kemampuan menyerap energi panas per satuan massa	Memengaruhi kenaikan temperatur <i>coolant</i> selama operasi
<i>Viscosity</i>	Hambatan aliran fluida	Viskositas tinggi meningkatkan <i>pressure drop</i> dan daya pompa
<i>Boiling point</i>	Temperatur awal perubahan fase	Kritis untuk <i>two-phase immersion cooling</i>
<i>Flash point/flammability</i>	Keamanan terhadap penyalaaan	Berhubungan langsung dengan risiko kebakaran dan <i>thermal runaway</i>
<i>Material compatibility</i>	Interaksi dengan seal, <i>casing</i> , isolator, dan konektor	Perlu uji <i>aging</i> dan <i>swelling material</i>
<i>Environmental impact</i>	Toksisitas, GWP, potensi daur ulang	Penting untuk implementasi komersial berkelanjutan
<i>Cost and availability</i>	Harga dan kemudahan pasokan	Menentukan kelayakan <i>techno-economic</i>

Tabel 2 menegaskan bahwa *coolant* tidak dapat dipilih hanya berdasarkan kemampuan

menyerap panas. Fluida yang baik harus aman secara listrik, tidak mudah terbakar, stabil terhadap material baterai, memiliki *pressure drop* rendah, dan layak secara biaya. Oleh karena itu, kriteria termal, keselamatan, ekonomi, dan lingkungan perlu dipertimbangkan bersamaan agar sistem *immersion cooling* realistis untuk kendaraan listrik atau *energy storage system*.

3. Parameter performa termal dan desain aliran

Evaluasi performa *immersion cooling* umumnya menggunakan temperatur maksimum, temperatur rata-rata, selisih temperatur antarsel, *heat transfer coefficient*, *flow rate*, *pressure drop*, daya pompa, dan kestabilan temperatur selama *charge-discharge*. Temperatur maksimum menunjukkan batas keselamatan operasi, sedangkan keseragaman temperatur menentukan keseimbangan degradasi antarsel dalam satu pack. Pada level modul, sel yang mengalami temperatur tertinggi dapat membatasi performa keseluruhan sistem.

Flow rate memiliki pengaruh ganda. Peningkatan *flow rate* dapat memperkuat konveksi dan menurunkan temperatur baterai, tetapi juga meningkatkan *pressure drop* dan daya pompa. Oleh karena itu, desain yang baik tidak hanya mengejar temperatur serendah mungkin, tetapi juga mempertimbangkan efisiensi energi dan keandalan sistem. Zhu et al. (2024) menunjukkan bahwa struktur *channel* pada *immersion cooling* memengaruhi distribusi aliran dan performa termal. Hussain et al. (2024) juga menekankan pentingnya desain *channeled dielectric fluid immersion cooling* pada baterai lithium *titanate oxide* berenergi tinggi.

4. Sintesis Studi Terdahulu

Tabel 3. Penelitian Terdahulu

Referensi	Objek/konfigurasi	Jenis pendinginan	Coolant/fluida	Kontribusi utama
Roe et al. (2022)	Review LIB dan BTMS	Berbagai <i>immersion cooling</i>	Berbagai <i>dielectric fluids</i>	Menyusun klasifikasi dan isu utama <i>immersion cooling LIB</i>
Patil et al. (2023)	Li-ion battery	<i>Dielectric fluid immersion</i>	<i>Dielectric fluid</i>	Mengusulkan teknologi <i>immersion cooling</i> berbasis fluida dielektrik
Jithin and Rajes (2022)	Li-ion battery numerik	<i>Single-phase immersion</i>	Beberapa <i>dielectric fluids</i>	Membandingkan pengaruh fluida terhadap performa termal
Liu et al. (2022)	Sistem <i>oil-immersed</i>	<i>Single-phase oil immersion</i>	<i>Oil coolant</i>	Menilai kelayakan sistem <i>oil-immersed</i> melalui eksperimen dan teori
Li et al. (2022)	18650 LIB	<i>Liquid immersion/two phase tendency</i>	<i>SF33 fluorinated liquid</i>	Membandingkan <i>immersion cooling</i> dan <i>forced air cooling</i> pada beberapa <i>discharge conditions</i>
Han et al. (2022)	LIB module	<i>Dielectric fluid immersion</i>	<i>Dielectric fluid</i>	Menunjukkan potensi <i>immersion cooling</i> untuk kontrol temperatur
Liu et al. (2023)	<i>Cylindrical LIB module</i>	<i>Static single-phase immersion</i>	<i>Dielectric liquid</i>	Membandingkan <i>static immersion</i> dengan <i>forced air cooling</i>

Referensi	Objek/konfigurasi	Jenis pendinginan	Coolant/fluida	Kontribusi utama
Choi et al. (2023)	<i>Fast-charging battery</i>	<i>Hybrid single-phase immersion</i>	<i>Dielectric fluid</i>	Mengkaji struktur <i>hybrid</i> untuk kondisi <i>fast charging</i>
Wu et al. (2023)	BTMS komparatif	<i>Single-phase vs two phase liquid cooling</i>	<i>Liquid coolants</i>	Membandingkan performa <i>single-phase</i> dan <i>two-phase cooling</i>
Wang et al. (2023)	Li-ion battery	<i>Two-phase immersion</i>	<i>Two-phase coolant</i>	Mengevaluasi sistem <i>two-phase immersion</i> untuk BTMS
Zhu et al. (2024)	Lithium-ion battery module	<i>Channel immersion cooling</i>	<i>Dielectric fluid</i>	Mengoptimasi struktur <i>channel</i> untuk <i>immersion cooling</i>
Hussain et al. (2024)	Lithium titanate oxide battery	<i>Channeled dielectric immersion</i>	<i>Dielectric fluid</i>	Mengembangkan desain <i>channeled immersion</i> untuk baterai energi tinggi
Febriyanto et al. (2024)	LFP 18650 pack	<i>Serpentine channel immersion</i>	HFE-7100	Menilai efek <i>C-rate</i> dan <i>flow rate</i> pada <i>serpentine immersion cooling</i>

5. Keselamatan dan *thermal runaway*

Thermal runaway merupakan kegagalan kritis yang terjadi ketika kenaikan temperatur memicu reaksi eksotermik berantai. Pada level *battery pack*, kegagalan satu sel dapat merambat ke sel lain melalui konduksi, konveksi, radiasi, dan pelepasan gas panas. *Immersion cooling* berpotensi menekan *overheating* karena fluida berkontak langsung dengan sel. Namun, klaim bahwa *immersion cooling* mampu mencegah *thermal runaway* harus disampaikan hati-hati, sebab penurunan temperatur pada kondisi operasi normal belum tentu menjamin keselamatan pada *abuse condition*.

Aspek keselamatan perlu dievaluasi melalui pengujian *overcharge*, *external heating*, *short circuit*, *nail penetration*, dan *propagation test*. Selain itu, sifat *coolant* seperti *flash point*, *flammability*, stabilitas termal, interaksi dengan elektrolit, serta perilaku terhadap gas panas harus dianalisis. Pada sistem dua fase, kenaikan tekanan dan pembentukan uap juga harus dipertimbangkan dalam desain keselamatan. Dengan demikian, *immersion cooling* lebih tepat dipandang sebagai teknologi yang berpotensi mengurangi risiko *overheating* dan memperlambat propagasi panas apabila desain fluida, konfigurasi *pack*, dan sistem monitoring memadai.

6. Tantangan Implementasi

Tantangan pertama adalah biaya dan ketersediaan *coolant*. Fluida khusus seperti *hydrofluoroether* dan *fluorinated fluids* dapat memberikan performa menarik, tetapi biaya tinggi membatasi implementasi massal. Di sisi lain, mineral *oil* atau *synthetic hydrocarbon* mungkin lebih murah, tetapi perlu optimasi viskositas, kompatibilitas material, dan keselamatan.

Tantangan kedua adalah stabilitas jangka panjang. Banyak penelitian dilakukan dalam durasi pendek, sedangkan aplikasi kendaraan listrik dan *energy storage system* memerlukan operasi bertahun-tahun. Perubahan viskositas, oksidasi, kontaminasi, degradasi sifat

dielektrik, interaksi dengan seal, dan potensi *swelling material* perlu diuji melalui *aging test*.

Tantangan ketiga adalah integrasi sistem. *Immersion cooling* tidak hanya membutuhkan tangki atau *housing* yang kedap, tetapi juga pompa, *heat exchanger*, sensor, filter, saluran aliran, sistem kontrol, dan prosedur *maintenance*. Penambahan massa, volume, dan kompleksitas harus dibandingkan dengan keuntungan termal yang diperoleh.

Tantangan keempat adalah keberlanjutan lingkungan. Beberapa fluida dengan performa tinggi dapat memiliki *global warming potential* atau isu regulasi. Oleh karena itu, pengembangan *coolant* ramah lingkungan dan analisis *life cycle assessment* menjadi penting untuk penerapan jangka panjang.

7. Research gap dan arah pengembangan

Beberapa *research gap* masih perlu diselesaikan sebelum *immersion cooling* dapat diterapkan secara luas. Pertama, studi jangka panjang mengenai perubahan sifat *coolant* masih terbatas, padahal aplikasi kendaraan listrik dan *energy storage system* membutuhkan operasi bertahun-tahun. Kedua, belum ada standar universal untuk memilih *coolant* berdasarkan kombinasi performa termal, keselamatan listrik, biaya, dan dampak lingkungan. Ketiga, validasi pada level *battery pack* masih lebih sedikit dibandingkan studi pada sel tunggal atau modul kecil.

Secara ringkas, gap utama pada bidang ini meliputi stabilitas *coolant* jangka panjang, validasi *pack-level*, pengujian *thermal runaway propagation*, kelayakan biaya, dampak lingkungan, dan optimasi desain aliran. Gap tersebut berdampak langsung pada reliabilitas dan kesiapan komersial sistem. Karena itu, riset berikutnya perlu menggabungkan *aging test*, uji kompatibilitas material, *propagation test*, *techno-economic analysis*, *life cycle assessment*, serta optimasi multi-objektif yang mempertimbangkan temperatur maksimum, keseragaman temperatur, *pressure drop*, daya pompa, massa sistem, dan biaya.

Arah pengembangan yang paling penting adalah pengembangan *coolant* ramah lingkungan dengan *dielectric strength* tinggi, viskositas rendah, stabilitas kimia baik, dan biaya terjangkau. Selain itu, desain *immersion cooling* perlu diarahkan pada optimasi multi-objektif yang mencakup temperatur maksimum, keseragaman temperatur, *pressure drop*, daya pompa, massa sistem, biaya, dan aspek keselamatan. Integrasi sensor temperatur, *pressure monitoring*, *gas detection*, *battery management system*, serta model *predictive control* juga diperlukan agar sistem mampu merespons perubahan beban secara adaptif.

Tabel 4. *Research Gap* dan Arah Riset Masa Depan

No.	Research gap	Dampak terhadap pengembangan sistem	Arah riset yang disarankan
1	Studi jangka panjang <i>coolant</i> masih terbatas	Reliabilitas sistem belum dapat dipastikan untuk operasi bertahun-tahun	<i>Aging test</i> , uji perubahan sifat dielektrik, viskositas, dan kompatibilitas material
2	Belum ada kriteria universal pemilihan <i>coolant</i>	Perbandingan antar studi sulit dilakukan	<i>Multi-criteria decision analysis</i> berbasis performa termal, <i>safety</i> , biaya, dan lingkungan
3	Validasi <i>pack-level</i> masih terbatas	Hasil sel tunggal belum tentu berlaku pada <i>battery pack</i>	Eksperimen <i>battery module</i> dan <i>pack</i> dengan kondisi realistis EV/ESS

No.	Research gap	Dampak terhadap pengembangan sistem	Arah riset yang disarankan
4	<i>Thermal runaway propagation</i> belum banyak diuji	Keselamatan sistem belum terjamin pada <i>abuse conditions</i>	<i>Propagation test, gas monitoring, pressure monitoring, dan model thermal abuse</i>
5	Optimasi <i>flow rate</i> sering hanya fokus pada temperatur	Daya pompa dan <i>pressure drop</i> dapat mengurangi efisiensi sistem	Optimasi multi-objektif <i>Tmax, delta T, pressure drop, pump power, massa, dan biaya</i>
6	<i>Techno-economic analysis</i> masih kurang	Sulit menentukan kelayakan komersial	Analisis CAPEX, OPEX, biaya <i>coolant, maintenance, dan payback</i>
7	Dampak lingkungan <i>coolant</i> belum dikaji memadai	Risiko regulasi dan keberlanjutan	<i>Life cycle assessment</i> dan pengembangan <i>biodegradable/low-GWP dielectric fluids</i>
8	Integrasi kontrol cerdas masih minim	Sistem belum adaptif terhadap perubahan beban	<i>Machine learning, model predictive control, dan digital twin</i> untuk BTMS

8. Implikasi untuk Desain *Battery Pack*

Untuk desain *battery pack* kendaraan listrik, *immersion cooling* harus dipandang sebagai sistem terintegrasi, bukan sekadar penggantian fluida pendingin. Desainer perlu menentukan konfigurasi mekanik *pack*, volume *coolant*, jalur aliran, lokasi *inlet-outlet*, kapasitas *heat exchanger*, pemilihan pompa, sensor, material *seal*, dan strategi kontrol. Selain itu, desain harus mempertimbangkan *serviceability* agar *coolant* dapat diperiksa, disaring, atau diganti tanpa membahayakan keselamatan sistem.

Pada aplikasi *fast charging*, desain *immersion cooling* perlu memastikan bahwa sel yang berada pada lokasi paling kritis tetap berada dalam rentang temperatur aman. Keceragaman temperatur harus diprioritaskan karena sel paling panas akan menentukan batas operasi *pack*. Pada aplikasi *energy storage system*, stabilitas jangka panjang dan biaya operasi menjadi faktor lebih dominan dibandingkan kebutuhan *transient cooling* ekstrem.

Berdasarkan literatur, pendekatan yang paling menjanjikan adalah *hybridization*, yaitu menggabungkan *immersion cooling* dengan desain *channel, fin, heat pipe, cold plate* sekunder, atau *heat exchanger* yang teroptimasi. *Hybrid single-phase immersion cooling* seperti yang dikaji Choi et al. (2023) menunjukkan bahwa konfigurasi struktur dapat diarahkan untuk kondisi *fast charging*. Konsep *channel immersion cooling* seperti Zhu et al. (2024), Hussain et al. (2024), dan Febriyanto et al. (2024) juga menunjukkan bahwa desain geometri aliran merupakan faktor penting dalam meningkatkan performa.

C. SIMPULAN

Immersion cooling merupakan teknologi manajemen termal yang menjanjikan untuk baterai lithium-ion karena menyediakan kontak langsung antara fluida dielektrik dan permukaan baterai. Pendekatan ini berpotensi menurunkan temperatur maksimum,

meningkatkan keseragaman temperatur, serta mengurangi resistansi termal dibandingkan pendinginan udara dan sebagian konfigurasi pendinginan cairan tidak langsung. *Single-phase immersion cooling* menawarkan desain yang sederhana dan stabil, sedangkan *two-phase immersion cooling* memberikan kapasitas pembuangan panas lebih tinggi melalui panas laten, tetapi membutuhkan kontrol sistem yang lebih kompleks.

Tantangan utama penerapan *immersion cooling* meliputi pemilihan *coolant*, biaya, viskositas, *pressure drop*, konsumsi energi pompa, kompatibilitas material, stabilitas jangka panjang, *thermal runaway propagation*, dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, penelitian berikutnya disarankan berfokus pada pengembangan *coolant* ramah lingkungan, validasi *level battery pack*, pengujian *abuse condition*, optimasi desain aliran, *techno-economic analysis*, *life cycle assessment*, serta integrasi sistem kontrol cerdas. Dengan pengembangan tersebut, *immersion cooling* dapat menjadi solusi penting untuk meningkatkan keselamatan dan durabilitas baterai pada kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bandhauer, T. M., Garimella, S., & Fuller, T. F. (2011). A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, 158(3), R1-R25. doi:10.1149/1.3515880
- Bernardi, D., Pawlikowski, E., & Newman, J. (1985). A general energy balance for battery systems. *Journal of the Electrochemical Society*, 132(1), 5-12. doi:10.1149/1.2113792
- Choi, H., Lee, H., Kim, J., & Lee, H. (2023). Hybrid single-phase immersion cooling structure for battery thermal management under fast-charging conditions. *Energy Conversion and Management*, 287, 117053. doi:10.1016/j.enconman.2023.117053
- Febriyanto, R., Ariyadi, H. M., Pranoto, I., & Rahman, M. A. (2024). Experimental study of serpentine channels immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using single-phase dielectric fluid. *Journal of Energy Storage*, 97, 112799. doi:10.1016/j.est.2024.112799
- Goodarzi, M., et al. (2023). Experimental study of Li-ion battery thermal management based on the liquid-vapor phase change in direct contact with the cells. *Journal of Energy Storage*, 62, 106834. doi:10.1016/j.est.2023.106834
- Han, J. W., Garud, K. S., & Lee, M. Y. (2022). Experimental study on dielectric fluid immersion cooling for thermal management of lithium-ion battery. *Symmetry*, 14(10), 2126. doi:10.3390/sym14102126
- Hussain, M., Khan, M. K., & Pathak, M. (2024). Thermal management of high-energy lithium titanate oxide batteries using an effective channeled dielectric fluid immersion cooling system. *Energy Conversion and Management*, 313, 118644. doi:10.1016/j.enconman.2024.118644
- Jithin, K. V., & Rajesh, P. K. (2022). Numerical analysis of single-phase liquid immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using different dielectric fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 188, 122608. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122608

- Li, Y., Zhou, Z., Hu, L., Bai, M., Gao, L., Li, Y., Liu, X., Li, Y., & Song, Y. (2022). Experimental studies of liquid immersion cooling for 18650 lithium-ion battery under different discharging conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 34, 102034. doi:10.1016/j.csite.2022.102034
- Liu, J., Fan, Y., & Xie, Q. (2022). Feasibility study of a novel oil-immersed battery cooling system: Experiments and theoretical analysis. *Applied Thermal Engineering*, 208, 118251. doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.118251
- Liu, Y., Aldan, G., Huang, X., & Hao, M. (2023). Single-phase static immersion cooling for cylindrical lithium-ion battery module. *Applied Thermal Engineering*, 233, 121184. doi:10.1016/j.applthermaleng.2023.121184
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. doi:10.1136/bmj.n71
- Patil, M. S., Seo, J. H., & Lee, M. Y. (2021). A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 229, 113715. doi:10.1016/j.enconman.2020.113715
- Roe, C., Feng, X., White, G., Li, R., Wang, H., Rui, X., Li, C., Zhang, F., Null, V., Parkes, M., Patel, Y., Wang, Y., Wang, H., Ouyang, M., Offer, G., & Wu, B. (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries - A review. *Journal of Power Sources*, 525, 231094. doi:10.1016/j.jpowsour.2022.231094
- Satyanarayana, G., Ruben Sudhakar, D., Muthya Goud, V., et al. (2023). Experimental investigation and comparative analysis of immersion cooling of lithium-ion batteries using mineral and Therminol oil. *Applied Thermal Engineering*, 225, 120187. doi:10.1016/j.applthermaleng.2023.120187
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538. doi:10.1007/s11192-009-0146-3
- Wang, Y., Li, C., Wen, X., Cai, W., Jiang, Y., Wen, C., Wang, Y., Hu, L., Yu, H., Zhu, H., Guo, H., & Liu, D. (2023). Experimental studies on two-phase immersion liquid cooling for Li-ion battery thermal management. *Journal of Energy Storage*, 72, 108748. doi:10.1016/j.est.2023.108748
- Wu, N., Chen, Y., Lin, B., Li, J., & Zhou, X. (2023). Experimental assessment and comparison of single-phase versus two-phase liquid cooling battery thermal management systems. *Journal of Energy Storage*, 72, 108727. doi:10.1016/j.est.2023.108727
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., & Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 182, 262-281. doi:10.1016/j.enconman.2018.12.051
- Zhang, J., et al. (2022). Advanced thermal management system driven by phase change materials for power lithium-ion batteries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112207. doi:10.1016/j.rser.2022.112207
- Zhu, H., Ma, Y., E, J., & Wei, S. (2024). Channel structure design and optimization for immersion cooling system of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 77, 109930. doi:10.1016/j.est.2023.109930

Zuo, X., et al. (2025). Water-immersion cooling for lithium-ion battery thermal management: A systematic experimental and numerical study. *Batteries*, 11, 416. doi:10.3390/batteries11110416