

Desain sistem manajemen termal *energy storage system* pada stasiun pengisian kendaraan listrik umum

Firmansyah Putra¹, Abram Jonathan Sitorus¹, Farid Wajdy Sitorus¹, Eka Dodi Suryanto¹, Dian Putra Saragi¹

¹Program Studi Teknik Elektro/ Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Kota Medan

Penulis Korespondensi : Firmansyah Putra (firmansyah.5223530007@mhs.unimed.ac.id)

ABSTRAK

Penelitian ini membahas secara komprehensif perancangan sistem manajemen termal (*thermal management system*) pada *energy storage system* (ESS) berbasis baterai *lithium-ion* yang diaplikasikan pada Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU). Sistem ini dirancang untuk menjaga suhu operasional baterai tetap dalam kisaran yang aman melalui pendekatan pendinginan pasif menggunakan *Phase Change Material* (PCM) serta pelat pendingin berbahan aluminium. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental melalui simulasi numerik menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*, dengan dua skenario utama yaitu simulasi kondisi pengisian cepat (*fast charging*) dan simulasi pelepasan energi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga suhu BMS tidak melebihi 58°C, sementara suhu pelat pendingin utama dapat mencapai serendah 43°C pada saat pelepasan energi. Sistem pendingin yang dikembangkan menunjukkan kinerja yang optimal dalam menyebarkan panas secara merata, menjaga kestabilan suhu kerja baterai, dan meningkatkan efisiensi serta keselamatan operasional dari ESS pada SPKLU. Dengan demikian, desain sistem ini dapat menjadi solusi inovatif untuk mendukung keberlanjutan teknologi kendaraan listrik di masa mendatang.

KATA KUNCI: *energy storage system*; SPKLU; *thermal management*; *lithium-ion*; *phase change material*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan pesat teknologi kendaraan listrik (*electric vehicle*/EV) telah menjadi pendorong utama dalam upaya global menuju transportasi yang lebih berkelanjutan. Adopsi EV yang terus meningkat secara signifikan menuntut pengembangan infrastruktur pendukung yang andal dan efisien, salah satunya adalah Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU). Dalam ekosistem energi yang berkembang ini, *energy storage system* (ESS) memegang peranan yang sangat penting. ESS berfungsi sebagai penyimpan dan penyedia energi listrik yang efisien dan stabil, mendukung operasional SPKLU dengan memastikan pasokan daya yang konsisten dan kemampuan untuk menangani lonjakan permintaan.

Peningkatan adopsi EV secara global menciptakan tekanan substansial pada infrastruktur pengisian daya yang ada. Ini menjadikan ESS di SPKLU sebagai tulang punggung untuk menjaga stabilitas jaringan listrik dan meningkatkan efisiensi proses pengisian daya. Keandalan ESS sangat penting untuk mencapai tujuan transisi energi yang lebih luas, terutama dalam mengintegrasikan sumber energi terbarukan yang

intermiten. Kegagalan ESS yang disebabkan oleh masalah termal tidak hanya akan menghambat operasional SPKLU dan menyebabkan waktu henti yang mahal, tetapi juga dapat secara signifikan memperlambat laju transisi global menuju energi bersih. Oleh karena itu, pengembangan sistem manajemen termal yang kuat dan efektif merupakan prasyarat fundamental untuk memungkinkan keberlanjutan dan keberhasilan teknologi kendaraan listrik.

Teknologi baterai *lithium-ion* (Li-ion) telah menjadi pilihan dominan dalam ESS karena karakteristiknya yang unggul, seperti kepadatan energi yang tinggi, kepadatan daya yang baik, dan efisiensi konversi energi yang besar.[1] Namun, di balik keunggulannya, baterai Li-ion memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap fluktuasi suhu operasional.[1] Pengoperasian di luar rentang suhu optimal dapat memicu serangkaian masalah serius yang memengaruhi kinerja, keamanan, dan umur panjang baterai.

Suhu yang berlebihan pada baterai Li-ion dapat menyebabkan kerusakan permanen pada struktur internal sel, mempercepat degradasi kinerja seperti penurunan kapasitas dan hilangnya daya, serta

mengurangi efisiensi pengisian dan pengosongan.[1] Lebih jauh lagi, suhu tinggi adalah pemicu utama risiko keselamatan yang sangat serius, termasuk pelepasan gas, kebocoran elektrolit, dan bahkan *thermal runaway* yang dapat berujung pada kebakaran atau ledakan.[1]

Thermal runaway terjadi ketika peningkatan suhu memicu reaksi degradasi eksotermik di dalam komponen baterai, seperti dekomposisi anoda, konversi katoda, dekomposisi *Solid Electrolyte Interphase* (SEI), dan kerusakan elektrolit. Panas yang dihasilkan dalam kondisi ini dapat memulai reaksi berantai di mana sel-sel tetangga juga memasuki kondisi pemanasan diri, menyebabkan propagasi *thermal runaway* yang dapat memengaruhi seluruh modul atau paket baterai.

Sebaliknya, pengoperasian baterai pada suhu di bawah nol Celsius juga menimbulkan tantangan signifikan. Pada kondisi dingin, kinerja baterai akan sangat menurun karena proses elektrokimia di dalam sel melambat secara drastis. Hal ini mengakibatkan penurunan daya dan energi yang tersedia secara substansial, serta peningkatan waktu pengisian yang diperlukan untuk mencapai kapasitas penuh.[4]

Sensitivitas suhu yang inheren pada baterai Li-ion menciptakan dilema operasional yang kompleks. Suhu yang terlalu tinggi mempercepat mekanisme degradasi dan memicu bahaya keselamatan yang parah, sementara suhu yang terlalu rendah menghambat kinerja dan efisiensi. Kondisi ini menggarisbawahi perlunya pengembangan sistem manajemen termal yang sangat adaptif dan presisi. Sistem ini harus mampu menjaga baterai dalam jendela suhu operasional optimalnya, yang umumnya berkisar antara 15°C hingga 35°C[8], di berbagai kondisi operasional dan lingkungan. Kontrol suhu yang tepat ini sangat penting untuk memastikan kesehatan baterai jangka panjang, keamanan operasional, dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, sistem manajemen termal menjadi aspek yang sangat penting untuk menjamin keamanan, keandalan, efisiensi waktu pengisian, total konsumsi energi, dan umur panjang sistem ESS.[1]

Berbagai metode manajemen termal telah dikembangkan, seperti sistem pendinginan berbasis cairan, udara, dan material perubahan fasa (PCM). Metode PCM dipilih karena kemampuannya dalam menyerap panas secara laten tanpa konsumsi daya tambahan, membuatnya sangat efisien secara energi. Selain itu, PCM memiliki struktur yang sederhana dan dapat diintegrasikan dengan berbagai desain baterai tanpa banyak modifikasi [1][2].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pendinginan berbasis PCM dan pelat aluminium untuk ESS pada SPKLU, dengan pendekatan desain dan simulasi termal menggunakan perangkat lunak teknik. Fokus penelitian adalah untuk mengevaluasi efektivitas sistem dalam menjaga suhu komponen baterai, khususnya saat proses pengisian dan pengeluaran daya.

2. BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Negeri Medan selama periode Februari hingga Mei 2025. Proses dimulai dari tahap perancangan, pemilihan material, hingga simulasi

menggunakan perangkat lunak *SolidWorks* untuk mengetahui kinerja termal dari sistem yang dikembangkan.

1) Komponen sistem

Komponen utama yang digunakan antara lain:

- Baterai *Lithium-Ion* dengan spesifikasi 60V dan kapasitas 20Ah, terdiri dari 180 sel.
- *Phase Change Material* (PCM) berbasis parafin sebagai media penyerap panas laten.
- Aluminium A6061 digunakan untuk pelat pendingin karena konduktivitas termalnya yang tinggi.
- Sensor suhu digital DS18B20 untuk memantau suhu baterai secara *real-time*.
- Mikrokontroler Arduino Mega sebagai unit pengendali sistem monitoring.
- Komponen tambahan berupa LCD display, *buzzer* peringatan, dan *Battery Management System* (BMS).

2) Persamaan perpindahan panas

Analisis perpindahan panas menggunakan pendekatan termodinamika dasar, yaitu:

Konduksi:

$$Q_{konduksi} = -KA \frac{dT}{dx, y, z} \quad (1)$$

Konveksi:

$$Q_{konveksi} = hA(T_i - T_{lingkungan}) \quad (2)$$

Keseimbangan panas total:

$$q = I(U - V) - I \left(T \frac{\partial U}{\partial T} \right) \quad (2)$$

Persamaan ini memperhitungkan kehilangan panas akibat resistansi dalam dan efek entropik dari reaksi kimia di dalam sel baterai.

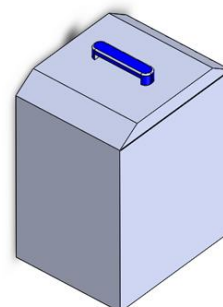
3) Model simulasi

Simulasi dilakukan untuk dua kondisi operasional yaitu pengisian cepat dan pengeluaran daya. Asumsi suhu maksimum sistem adalah 60°C berdasarkan batas kerja maksimum komponen elektronik, termasuk BMS. Distribusi panas dianggap seragam, berasal dari dua sumber utama yaitu sel baterai dan sistem BMS.

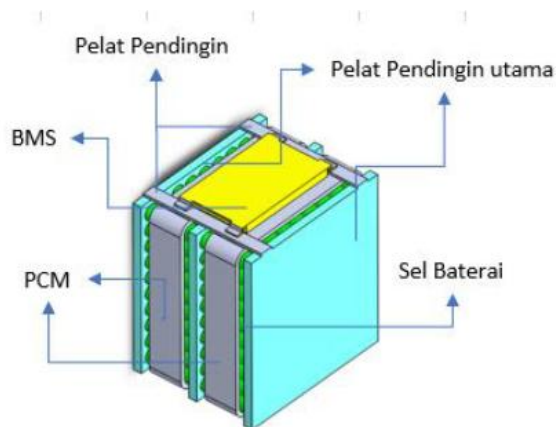
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Desain sistem

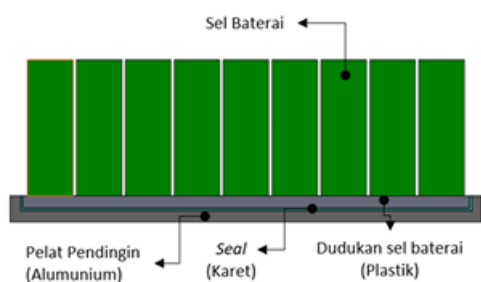
Desain awal modul baterai difokuskan pada integrasi pendinginan pasif berbasis PCM. Casing baterai dirancang menggunakan pelat aluminium yang tidak hanya memberikan kekuatan struktural tetapi juga berfungsi sebagai media transfer panas. Modul baterai dikelilingi oleh lapisan PCM dalam pembungkus fleksibel aluminium.



Gambar 1. Casing baterai



Gambar 2. Desain kemasan baterai tanpa casing



Gambar 3. Modul Baterai

3.2. Sifat material

Pemilihan material didasarkan pada karakteristik termal yang spesifik untuk mendukung efisiensi sistem:

Tabel 1. Spesifikasi Thermal Material

Material	Konduktivitas (W/mK)	Massa jenis (kg/m ³)	Kapasitas panas (J/kgK)
Aluminium A6061	170	2700	1300
PCM	0,256	1020	1386
Karet	0,13	801	2010

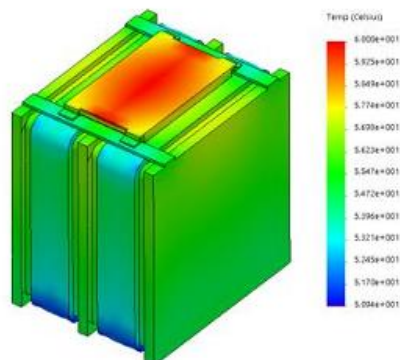
3.3. Simulasi pengisian

Pada simulasi kondisi pengisian cepat, distribusi panas menunjukkan suhu tertinggi pada BMS yaitu 57,6°C, dan suhu terendah pada pelat pendingin utama sebesar 53,4°C. Panas dari BMS dan sel baterai berhasil didistribusikan secara merata ke seluruh sistem.

Distribusi suhu yang relatif homogen ini menunjukkan bahwa desain casing baterai dan posisi penempatan *Phase Change Material* (PCM) sudah cukup efektif dalam menyerap dan mendistribusikan panas laten dari sumber panas utama, yakni sel baterai dan BMS. Penggunaan PCM berbasis parafin memungkinkan penyerapan energi panas melalui mekanisme perubahan fasa padat-cair tanpa memerlukan konsumsi daya tambahan, sehingga sangat cocok untuk sistem dengan keterbatasan energi seperti SPKLU.

Suhu BMS yang mencapai 57,6°C masih berada dalam batas toleransi operasional, namun mendekati ambang maksimum 60°C. Hal ini menunjukkan bahwa desain saat ini sudah cukup baik, namun masih memiliki

ruang untuk optimasi, misalnya melalui peningkatan volume PCM atau penggunaan bahan dengan konduktivitas termal lebih tinggi pada jalur panas kritis. Selain itu, pendekatan penyusunan sel baterai juga berkontribusi besar terhadap sebaran suhu: posisi sel di dekat sumber panas seperti BMS menghasilkan suhu lokal yang sedikit lebih tinggi dibanding bagian tepi.



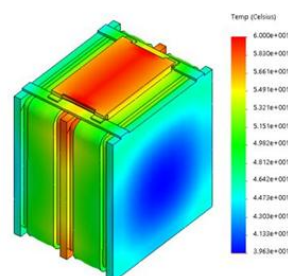
Gambar 4. Hasil Simulasi Termal Kemasan Baterai Pada Pengisian Baterai

3.4. Simulasi pengeluaran

Saat simulasi pelepasan energi, penggunaan kipas pendingin menyebabkan konveksi paksa yang menurunkan suhu secara signifikan. Suhu BMS mencapai 57,3°C, sementara suhu pelat pendingin utama turun menjadi 43,2°C.

Efek konveksi paksa yang dihasilkan oleh kipas sangat efektif dalam menurunkan suhu permukaan komponen pendingin utama. Perbedaan suhu hingga 14°C dibandingkan kondisi pengisian cepat menunjukkan bahwa adanya aliran udara aktif dapat mempercepat pelepasan energi panas dari sistem. Meskipun PCM masih berperan sebagai penstabil suhu, kipas memberikan kontribusi tambahan dalam menciptakan gradien suhu yang lebih baik antar komponen.

Kinerja sistem pada tahap pelepasan daya juga menegaskan bahwa sistem ini dapat beroperasi secara efisien dalam dua skenario yang berbeda yaitu pada pengisian dan pelepasan dengan hasil suhu kerja yang tetap berada dalam ambang aman. Selain itu, kemampuan sistem untuk menurunkan suhu hingga 43,2°C menjadi indikator bahwa pendekatan gabungan antara pendinginan pasif (PCM dan aluminium) dan pendinginan aktif (kipas) dapat diterapkan untuk desain sistem ESS yang lebih besar atau memiliki densitas daya lebih tinggi.



Gambar 5. Hasil Simulasi Termal Kemasan Baterai Pada Pengeluaran Baterai

Tabel 2. Temperatur rata-rata komponen

Komponen	Saat pengisian (°C)	Saat pengeluaran (°C)
BMS	57,6	57,3
PCM	54,5	51,7
Plate pendingin	53,9	48,2
Plate pendingin utama	53,4	43,2

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem manajemen termal berbasis *Phase Change Material* (PCM) dan pelat pendingin aluminium mampu menjaga suhu komponen pada *Energy Storage System* (ESS) di Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) tetap berada dalam batas operasional yang aman. Pada simulasi pengisian cepat, suhu tertinggi yang tercatat berada pada BMS sebesar 57,6°C, masih di bawah ambang batas 60°C. Sedangkan pada kondisi pelepasan daya, sistem pendingin menunjukkan kinerja yang lebih optimal, di mana suhu pelat pendingin utama dapat ditekan hingga 43,2°C. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi panas berlangsung merata dan efisien, yang berdampak positif terhadap kestabilan suhu baterai dan kinerja sistem secara keseluruhan.

Implementasi metode pendinginan pasif dengan PCM terbukti memberikan efisiensi energi yang tinggi karena tidak memerlukan konsumsi daya tambahan. Selain itu, penggunaan pelat aluminium A6061 sebagai media konduktor termal juga berhasil meningkatkan efektivitas transfer panas dari baterai ke lingkungan sekitar. Kombinasi dua pendekatan ini menawarkan solusi hemat energi dan ekonomis untuk pengembangan sistem pendingin baterai di masa mendatang.

Desain sistem ini sangat sesuai untuk diaplikasikan pada skenario pengisian cepat kendaraan listrik, terutama di wilayah dengan keterbatasan pendinginan aktif atau infrastruktur listrik yang terbatas. Sistem ini juga memiliki potensi untuk diintegrasikan ke dalam berbagai konfigurasi ESS lainnya dengan sedikit modifikasi struktural.

Untuk pengembangan lebih lanjut, penelitian dapat difokuskan pada optimasi dimensi dan volume PCM, variasi bentuk casing pendingin, serta penambahan elemen pendingin aktif seperti heat sink atau fan berbasis IoT yang dikendalikan secara adaptif. Validasi

eksperimental dalam bentuk prototipe fisik juga diperlukan agar desain dapat diuji secara langsung dalam kondisi operasional riil.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan atas fasilitas yang telah mendukung penelitian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Bapak Eka Dodi Suryanto, S.Pd., M.T. dan Bapak Dian Putra Saragi, S.T., M.T. selaku dosen pengampu..

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Henke dan G. Hailu, "Thermal management of stationary battery systems: A literature review," *Energies*, vol. 13, no. 4194, 2020.
- [2] S. Shelare, et al., "Recent progress, challenges and limitations of BTMS for EVs," *MATEC Web Conf.*, vol. 405, 02004, 2024.
- [3] C. Liu, et al., "Phase change materials in battery thermal management: A review," *Materials*, vol. 13, 4622, 2020.
- [4] M. Chen, "Thermal Safety of Lithium-Ion Batteries," *Batteries*, vol. 11, no. 3, p. 112, 2025.
- [5] S. Dasi, et al., "IoT-based intelligent energy management for EV stations," *IAENG IJCS*, vol. 51, no. 11, pp. 1853–1861, 2024.
- [6] Z. Fu, et al., "Thermal management for wireless EV charging with PCM," *E3S Web Conf.*, vol. 118, p. 02066, 2019.
- [7] H. M. Ali, "Thermal management for batteries in EVs: A review," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 5545–5564, 2023.
- [8] S. R. Das, et al., "Advancing IoT-based thermal management," *Discover Internet Things*, vol. 5, no. 1, p. 20, 2025.
- [9] J. Guo dan F. Jiang, "EV thermal management using refrigerant cooling," *Energy Conv. Mgmt.*, vol. 237, p. 114145, 2021.
- [10] M. Wang, et al., "Electro-thermal modeling of ESS," *Front. Energy Res.*, vol. 12, p. 1433797, 2024.