

Analisis Pengaruh Variasi Beban Penumpang Terhadap Kenaikan Temperatur Baterai LifePO₄ 72 V 100 Ah Pada Satu Rute Operasional Shuttle Bus Listrik UNP

Muhammad Rifat¹, Dwi Sudarno Putra^{1*} Wagino¹, Toto Sugiarto¹,
M. Sadly Firmansyah¹, Dicky Rohid Fikra²

¹Departemen Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
Jln. Prof. Dr. Hamka Air Tawar, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

²Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
Jln. Prof. Dr. Hamka Air Tawar, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

*e-mail: dwisudarnoputra@ft.unp.ac.id

(Diajukan: 16 Juli 2025, direvisi: 30 Juli 2025, disetujui: 25 Oktober 2025, dipublikasikan: 15 November 2025)

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi beban penumpang terhadap kenaikan temperatur baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) 72V 100Ah pada shuttle bus listrik Universitas Negeri Padang (UNP). Pengujian dilakukan menggunakan metode eksperimen lapangan dengan pemantauan temperatur melalui Battery Management System (BMS) pada rute sejauh 3,19 km dengan temperatur lingkungan awal 32°C. Variasi beban terdiri atas 3, 6, dan 11 penumpang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan temperatur baterai bertambah seiring meningkatnya beban, yaitu sebesar 1°C, 2°C, dan 4°C, dengan temperatur maksimum mencapai 36°C. Temperatur tersebut masih berada dalam rentang operasi optimal baterai LiFePO₄ (20–45°C), sehingga baterai memiliki performa termal yang di rekomendasikan untuk mendukung operasional shuttle bus listrik di lingkungan kampus.

Kata Kunci: Baterai LiFePO₄, Temperatur Baterai, Shuttle Bus Listrik, Battery Management System (BMS), Beban Penumpang.

Abstract

This study aims to analyze the effect of varying passenger loads on the temperature increase of This study aims to analyze the effect of passenger load variation on the temperature increase of a 72V 100Ah Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) battery in the UNP electric shuttle bus. The testing was conducted using a field experiment method with temperature monitoring through the Battery Management System (BMS) on a 3.19 km route, starting with an ambient temperature of 32°C. The load variations included 3, 6, and 11 passengers. The results showed that the battery temperature increased as the load increased, by 1°C, 2°C, and 4°C, with a maximum temperature reaching 36°C. This temperature is still within the optimal operating range for LiFePO₄ batteries (20–45°C), so the battery has the recommended thermal performance to support the operation of the electric shuttle bus on campus

Keywords: LiFePO₄ Battery, Battery Temperature, Electric Shuttle Bus, Battery Management System (BMS), Passenger Load

PENDAHULUAN

Perkembangan kendaraan listrik (*Electric Vehicle/EV*) menjadi salah satu strategi utama dalam mendukung transisi menuju sistem transportasi yang lebih bersih, efisien, dan berkelanjutan. Penggunaan kendaraan listrik diharapkan mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, meningkatkan efisiensi energi, serta menekan emisi gas rumah kaca dari sektor transportasi. Sejalan dengan tren tersebut, Pemerintah Indonesia terus mempercepat pengembangan ekosistem kendaraan listrik melalui berbagai kebijakan sebagai bagian dari upaya mewujudkan ketahanan energi nasional dan mendukung pencapaian target pembangunan berkelanjutan [1]. Implementasi kendaraan listrik tidak hanya berkembang pada sektor industri dan transportasi publik, tetapi juga mulai diterapkan di lingkungan perguruan tinggi melalui konsep *green campus*. Salah satu implementasi tersebut dilakukan oleh Universitas Negeri Padang dengan mengoperasikan *shuttle bus* listrik sebagai sarana transportasi internal untuk meningkatkan mobilitas sivitas akademika sekaligus mendukung pengurangan emisi karbon di lingkungan kampus [2]. Keberhasilan implementasi kendaraan listrik tersebut sangat dipengaruhi oleh keandalan sistem penyimpanan energi, sehingga karakteristik dan performa baterai menjadi salah satu aspek yang penting untuk dievaluasi.

Baterai lithium-ion merupakan teknologi penyimpanan energi yang paling banyak digunakan pada kendaraan listrik karena memiliki kepadatan energi yang tinggi, efisiensi konversi energi yang baik, serta kemampuan *charge-discharge* yang tinggi. Di antara berbagai jenis baterai lithium-ion, Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) menjadi salah satu kimia baterai yang banyak digunakan karena menawarkan tingkat keamanan yang tinggi, stabilitas termal yang baik, umur siklus yang panjang, dan biaya yang relatif lebih rendah dibandingkan beberapa jenis baterai lithium-ion lainnya [3], [4]. Berbagai penelitian juga terus dilakukan untuk meningkatkan performa baterai LiFePO_4 melalui pengembangan material katoda, seperti penggunaan aditif berbasis karbon dan nanopartikel, guna meningkatkan konduktivitas listrik serta karakteristik elektrokimia baterai [5]. Meskipun memiliki berbagai keunggulan tersebut, performa baterai LiFePO_4 selama pengoperasian tetap dipengaruhi oleh kondisi termal yang terjadi selama proses *charging* maupun *discharging*, sehingga karakteristik temperatur menjadi salah satu parameter penting dalam mengevaluasi keandalan baterai pada kendaraan listrik.

Selama proses pengisian dan pengosongan energi, baterai menghasilkan panas akibat resistansi internal dan reaksi elektrokimia yang berlangsung di dalam sel baterai [6], [7]. Besarnya panas yang dihasilkan dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain arus *discharge*, temperatur lingkungan, kondisi operasi kendaraan, serta karakteristik pembebanan yang diterima kendaraan [8]–[10]. Peningkatan temperatur yang tidak terkendali dapat mempercepat degradasi material aktif, menurunkan kapasitas dan efisiensi baterai, mengurangi umur pakai, bahkan meningkatkan risiko *thermal runaway* pada kondisi operasi tertentu [6], [11]. Sebaliknya, temperatur yang terlalu rendah dapat meningkatkan resistansi internal sehingga kemampuan baterai dalam menghasilkan daya juga menurun [9]. Oleh karena itu, pengendalian temperatur menjadi salah satu aspek penting dalam menjaga performa, keandalan, dan keselamatan sistem penyimpanan energi pada kendaraan listrik.

Untuk menjaga temperatur baterai tetap berada pada rentang operasi yang direkomendasikan, kendaraan listrik dilengkapi dengan Battery Management System (BMS) yang berfungsi memantau parameter penting baterai, seperti tegangan, arus, temperatur, *State of Charge* (SOC), dan *State of Health* (SOH) secara *real-time* [12]. Informasi tersebut menjadi dasar dalam penerapan Battery Thermal Management System (BTMS) untuk mengendalikan distribusi temperatur baterai melalui berbagai metode pendinginan, seperti pendinginan udara, cairan, maupun *Phase Change Material* (PCM) [13]–[16]. Pengelolaan temperatur yang efektif tidak hanya berperan dalam meningkatkan efisiensi dan umur pakai baterai, tetapi juga menjaga keselamatan operasi kendaraan listrik pada berbagai kondisi penggunaan. Oleh karena itu, evaluasi karakteristik temperatur baterai berdasarkan kondisi operasional aktual menjadi penting untuk memperoleh pemahaman yang lebih representatif mengenai perilaku termal baterai selama kendaraan beroperasi.

Karakteristik temperatur baterai pada kendaraan listrik tidak hanya dipengaruhi oleh sifat material baterai dan sistem manajemen termal, tetapi juga oleh kondisi operasional kendaraan. Variasi beban kendaraan, pola berkendara, kondisi jalan, serta perubahan kebutuhan daya selama operasi menyebabkan arus *discharge* baterai berfluktuasi sehingga memengaruhi pembangkitan panas di dalam sel baterai [8]–[10]. Peningkatan jumlah penumpang akan menambah massa kendaraan yang harus digerakkan, sehingga motor listrik memerlukan gaya traksi dan daya yang lebih besar. Kondisi tersebut menyebabkan baterai menyuplai arus yang lebih tinggi dan meningkatkan panas yang dihasilkan selama proses *discharge* [9], [10]. Selain itu, pola operasi *shuttle bus* di lingkungan kampus yang didominasi oleh kondisi *stop-and-go*, percepatan dan perlambatan berulang, serta pemberhentian pada beberapa titik layanan menghasilkan karakteristik pembebanan yang berbeda dibandingkan kendaraan listrik yang beroperasi pada kecepatan relatif konstan. Oleh karena itu, analisis temperatur baterai berdasarkan variasi beban dan kondisi operasi aktual menjadi penting untuk memperoleh gambaran yang lebih representatif mengenai perilaku termal baterai selama kendaraan beroperasi [17], [18].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk memahami karakteristik termal baterai lithium-ion pada kendaraan listrik. Penelitian terdahulu banyak berfokus pada mekanisme pembangkitan panas, pemodelan distribusi temperatur, pengembangan *Battery Thermal Management System* (BTMS), serta estimasi parameter baterai seperti *State of Charge* (SOC) dan *State of Health* (SOH) guna meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem penyimpanan energi [10]–[12], [14]–[16]. Penelitian eksperimental juga menunjukkan bahwa kenaikan temperatur baterai dipengaruhi oleh besarnya arus *discharge*, pola berkendara, dan kondisi operasi kendaraan, sehingga pemantauan temperatur secara *real-time* menjadi aspek penting dalam evaluasi performa baterai [18]–[20]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih dilakukan melalui simulasi numerik, pengujian laboratorium, atau pengujian pada skala modul maupun paket baterai, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan karakteristik temperatur baterai pada kendaraan listrik yang beroperasi dalam kondisi pelayanan nyata.

Penelitian yang secara khusus mengkaji hubungan antara variasi jumlah penumpang sebagai representasi perubahan beban kendaraan terhadap karakteristik temperatur baterai LiFePO_4 pada *shuttle bus* listrik berbasis data *Battery Management System* (BMS) masih

relatif terbatas. Selain itu, kajian yang memanfaatkan data temperatur hasil pemantauan *real-time* selama kendaraan beroperasi pada lintasan kampus dengan karakteristik *stop-and-go* juga belum banyak dilaporkan. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian (*research gap*) mengenai pengaruh variasi beban operasional terhadap perilaku termal baterai pada kondisi penggunaan aktual, padahal informasi tersebut penting sebagai dasar dalam mengevaluasi keamanan operasi, efektivitas sistem manajemen termal, serta strategi pengelolaan energi pada kendaraan listrik.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi jumlah penumpang terhadap karakteristik kenaikan temperatur baterai LiFePO₄ 72 V 100 Ah pada *shuttle bus* listrik Universitas Negeri Padang menggunakan data hasil pemantauan *Battery Management System* (BMS). Pengujian dilakukan pada lintasan operasional kampus sepanjang 3,19 km dengan tiga variasi pembebanan, yaitu 3 penumpang, 6 penumpang, dan 11 penumpang, sehingga dapat menggambarkan kondisi operasional kendaraan yang sebenarnya. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada analisis empiris karakteristik temperatur baterai berdasarkan variasi beban penumpang menggunakan data *real-time* dari BMS pada *shuttle bus* listrik yang beroperasi dalam kondisi pelayanan aktual. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai perilaku termal baterai LiFePO₄ pada kondisi operasi nyata, menjadi dasar dalam evaluasi keamanan dan keandalan sistem penyimpanan energi, serta mendukung pengembangan sistem transportasi kampus yang lebih efisien dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen lapangan (*field experiment*) dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh variasi beban penumpang terhadap karakteristik kenaikan temperatur baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) pada *shuttle bus* listrik Universitas Negeri Padang (UNP). Pendekatan eksperimen lapangan dipilih agar karakteristik termal baterai dapat diamati secara langsung pada kondisi operasional aktual kendaraan, sehingga mampu memberikan gambaran yang lebih representatif dibandingkan pengujian berbasis simulasi atau laboratorium [18], [20].

Objek penelitian adalah *shuttle bus* listrik UNP yang menggunakan baterai LiFePO₄ berkapasitas 72 V 100 Ah sebagai sumber energi utama sistem penggerak kendaraan. Paket baterai tersusun atas 24 sel (24S) dengan tegangan nominal masing-masing sel sebesar 3,2 V, sehingga memiliki tegangan nominal total 76,8 V. Dalam aplikasi kendaraan listrik, konfigurasi tersebut secara umum dikategorikan sebagai sistem baterai 72 V. Sistem baterai dilengkapi dengan *Battery Management System* (BMS) yang berfungsi memantau parameter operasi baterai, seperti tegangan, arus, temperatur, serta kondisi proteksi selama kendaraan beroperasi [12]. Spesifikasi baterai yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Pengujian dilaksanakan selama 36 hari, pada lintasan operasional *shuttle bus* sepanjang 3,19 km di lingkungan Universitas Negeri Padang. Seluruh pengujian dilakukan pada kondisi operasional yang relatif seragam, yaitu pada rentang waktu 10.00–17.00 WIB, dengan temperatur lingkungan awal sekitar 31 °C. Sebelum setiap pengujian dimulai, kondisi awal baterai diseragamkan dengan State of Charge (SOC) sebesar 98%

dan temperatur awal sekitar 32 °C untuk meminimalkan pengaruh kondisi awal terhadap kenaikan temperatur selama pengujian.

Tabel 1. Spesifikasi baterai

No	Uraian Spesifikasi	Parameter Teknis	Keterangan
1	Jenis sel baterai	Lithium Iron Phosphate (LiFePO ₄)	Sumber energi utama sistem
2	Jumlah sel	24 sel	Konfigurasi seri (24S)
3	Tegangan nominal per sel	3,2 V	Tegangan standar sel LiFePO ₄
4	Kapasitas nominal sistem	100 Ah	Kapasitas total paket baterai
5	Tegangan nominal total	76,8 V	Hasil perhitungan 24 X 3,2 V
6	Kategori sistem	Sistem 72 V	Klasifikasi umum kendaraan listrik
7	Konfigurasi rangkaian	Seri penuh (24S)	Positif ke negatif hingga sel ke-24
8	Balancing awal	Penyetaraan tegangan sel	Menjaga stabilitas dan umur pakai
9	Rangka penyusun	Rangka berisolasi	Mencegah hubungan arus pendek
10	Media penghubung	Busbar konduktif	Menghubungkan antar kutub sel
11	Sistem manajemen baterai	BMS tipe 24S	Disesuaikan dengan jumlah sel
12	Monitoring sel	Pemantauan tiap sel	Monitoring individual cell
13	Balancing oleh BMS	Balancing otomatis	Menjaga keseragaman tegangan
14	Proteksi overcharge	Tersedia	Mencegah tegangan berlebih
15	Proteksi overdischarge	Tersedia	Mencegah tegangan terlalu rendah
16	Proteksi arus berlebih	Tersedia	Overcurrent protection
17	Proteksi temperatur	Tersedia	Overtemperature protection

Variasi beban kendaraan ditentukan berdasarkan jumlah penumpang, yaitu 3 penumpang (beban ringan), 6 penumpang (beban sedang), dan 11 penumpang (beban berat). Setiap variasi beban diuji sebanyak tiga kali pengulangan pada lintasan yang sama sehingga diperoleh data yang lebih konsisten. Kendaraan dioperasikan mengikuti rute pelayanan aktual *shuttle bus* dengan karakteristik jalan datar, tanjakan, turunan, tikungan, serta 19 titik pemberhentian, sehingga pola operasi kendaraan merepresentasikan kondisi *stop-and-go* yang umum dijumpai pada layanan transportasi kampus [20]. Rata-rata waktu tempuh untuk variasi beban 3, 6, dan 11 penumpang berturut-turut adalah 17 menit 56 detik, 14 menit 28 detik, dan 15 menit 58 detik, dengan kecepatan rata-rata masing-masing sebesar 10,80 km/jam, 13,26 km/jam, dan 12,13 km/jam.

Temperatur baterai dipantau menggunakan Battery Management System (BMS) selama kendaraan menyelesaikan satu siklus perjalanan. Sistem BMS merekam data temperatur baterai secara *real-time* sehingga perubahan temperatur selama kendaraan beroperasi dapat diamati secara kontinu [12], [18]. Parameter yang dianalisis meliputi temperatur awal, temperatur maksimum, dan temperatur akhir baterai pada setiap pengujian. Selain temperatur, data pendukung berupa tegangan baterai juga digunakan untuk memastikan kondisi operasi sistem selama proses pengambilan data berlangsung.

Sebelum pengambilan data, dilakukan pemeriksaan terhadap kondisi kendaraan, baterai, sistem BMS, instrumen pengukuran, serta lintasan pengujian untuk memastikan seluruh komponen berada pada kondisi yang sama pada setiap pengulangan. Setelah kondisi awal baterai memenuhi kriteria pengujian, kendaraan dioperasikan sesuai variasi jumlah penumpang yang telah ditentukan. Selama perjalanan, temperatur baterai dipantau dan direkam secara kontinu menggunakan BMS hingga kendaraan menyelesaikan satu putaran lintasan. Selanjutnya, seluruh data hasil pengukuran diverifikasi dan diolah untuk mengevaluasi pengaruh variasi beban terhadap karakteristik temperatur baterai.

Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif menggunakan nilai hasil pengukuran pada setiap variasi beban. Kenaikan temperatur baterai dihitung berdasarkan selisih antara temperatur akhir dan temperatur awal menggunakan Persamaan (1).

$$\Delta T = T_{akhir} - T_{awal} \quad (1)$$

Dengan:

ΔT = kenaikan temperatur baterai (°C);

T_{akhir} = temperatur baterai setelah pengujian (°C);

T_{awal} = temperatur baterai sebelum pengujian (°C).

Hasil perhitungan selanjutnya dibandingkan dengan rentang temperatur operasi optimal baterai LiFePO₄, yaitu 20–45°C, untuk mengevaluasi keamanan dan performa termal baterai selama shuttle bus beroperasi. Hasil analisis kemudian disajikan dalam bentuk tabel, grafik, dan pembahasan yang menghubungkan pengaruh variasi beban penumpang terhadap perubahan temperatur baterai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengukuran Temperatur Baterai pada Variasi Beban Penumpang

Pengujian dilakukan pada *shuttle bus* listrik Universitas Negeri Padang yang menggunakan baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) berkapasitas 72 V 100 Ah. Pengambilan data dilakukan pada lintasan operasional sepanjang 3,19 km dengan temperatur awal baterai sebesar 32 °C. Variasi beban terdiri atas 3 penumpang (192 kg), 6 penumpang (384 kg), dan 11 penumpang (678 kg). Temperatur baterai dipantau menggunakan Battery Management System (BMS) sejak kendaraan mulai beroperasi hingga menyelesaikan satu siklus perjalanan. Hasil pengukuran temperatur baterai untuk seluruh pengujian disajikan pada [Tabel 2](#), sementara gambaran umum hasil pengujian, nilai rata-rata temperatur baterai pada setiap variasi beban disajikan pada [Tabel 3](#).

Tabel 2. Hasil pengujian pengukuran temperatur baterai

No	Uji	Jarak (km)	Variasi Beban (kg)	Jumlah Orang	Waktu (S)	Kecepatan (km/jam)	T Awal (°C)	T Akhir (°C)	T Max (°C)	Kenaikan Temperatur (ΔT)
1	1	3.19	192	3	16:48	11,4	32	33	33	1
	2	3.19	192	3	18:20	10,4	32	33	33	1
	3	3.19	192	3	18:02	10,6	32	33	33	1
2	1	3.19	384	6	15:15	12,6	32	34	34	2
	2	3.19	384	6	13:59	13,7	32	34	34	2
	3	3.19	384	6	14:10	13,5	32	34	34	2
3	1	3.19	678	11	16:17	11,7	32	36	36	4
	2	3.19	678	11	18:20	10,4	32	36	36	4
	3	3.19	678	11	12:38	14,3	32	36	36	4

Tabel 3. Hasil rata rata Pengukuran Temperatur Baterai

No	Variasi Beban	T Awal (°C)	T Akhir (°C)	T Max (°C)	Kenaikan Temperatur Δt (°C)
1	3 Penumpang (192 kg)	32	33	33	1
2	6 Penumpang (384 kg)	32	34	34	2
3	11 Penumpang (678 kg)	32	36	36	4

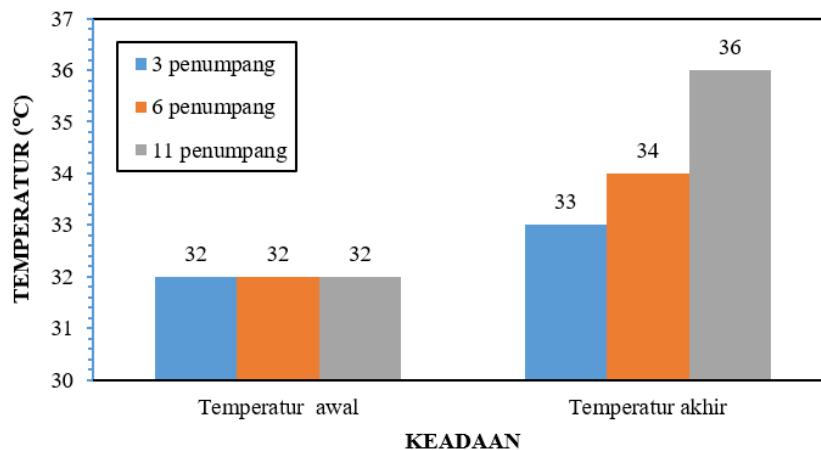
Berdasarkan Tabel 2, temperatur baterai mengalami peningkatan pada seluruh variasi beban. Pada beban 3 penumpang, temperatur meningkat dari 32 °C menjadi 33 °C, sedangkan pada beban 6 penumpang meningkat menjadi 34 °C. Temperatur tertinggi diperoleh pada kondisi 11 penumpang, yaitu 36 °C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kenaikan temperatur baterai cenderung meningkat seiring bertambahnya beban kendaraan. Berdasarkan Tabel 3, rata-rata kenaikan temperatur (ΔT) berturut-turut sebesar 1 °C, 2 °C, dan 4 °C untuk variasi beban 3, 6, dan 11 penumpang. Seluruh temperatur maksimum yang diperoleh masih berada pada rentang 33–36 °C.

Karakteristik Kenaikan Temperatur Baterai

Karakteristik kenaikan temperatur baterai pada setiap variasi beban penumpang disajikan secara kuantitatif melalui statistik hasil pengukuran dan divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk memperlihatkan kecenderungan perubahan temperatur selama pengujian, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 1.

Tabel 4. Statistik Kenaikan Temperatur Baterai

No	Variasi Beban	n	ΔT Rata-Rata (°C)	ΔT Minimum (°C)	ΔT Maksimum (°C)	SD (°C)
1	3 Penumpang (192 kg)	3	1,0	1	1	0
2	6 Penumpang (384 kg)	3	2,0	2	2	0
3	11 Penumpang (678 kg)	3	4,0	4	4	0



Gambar 1. Keadaan temperatur awal dan akhir baterai

Berdasarkan Tabel 4 dan Gambar 1, seluruh pengulangan menghasilkan nilai kenaikan temperatur yang sama pada setiap variasi beban, sehingga simpangan baku (SD) sebesar 0 °C diperoleh untuk seluruh kondisi pengujian. Temperatur baterai meningkat dari 32 °C menjadi 33 °C pada beban 3 penumpang, 34 °C pada beban 6 penumpang, dan 36 °C pada beban 11 penumpang, dengan kenaikan temperatur berturut-turut sebesar 1 °C, 2 °C, dan 4 °C. Pola tersebut menunjukkan kecenderungan peningkatan temperatur seiring bertambahnya beban kendaraan. Nilai SD sebesar 0 °C mengindikasikan bahwa hasil pengukuran konsisten pada setiap pengulangan, meskipun kondisi ini juga dapat dipengaruhi oleh resolusi pembacaan temperatur pada Battery Management System (BMS) yang hanya menampilkan perubahan temperatur dalam satuan 1 °C.

Hasil Pelepasan Energi Baterai

Selain temperatur, perubahan kondisi baterai selama pengujian juga diamati melalui parameter tegangan dan State of Charge (SOC). Hasil pengukuran pada setiap variasi beban ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Pelepasan energi

No	Uji	Beban	Tegangan (Volt)			Arus (A)			Soc (%)			Waktu
			Awal	Akhir	Total	Awal	Akhir	Total	Awal	Akhir	Total	
1	1	3 Org (192 kg)	79.9	79.8	0.1	98.8	95	3.8	98.8	95	3.8	16:48
2	2	3 Org (192 kg)	79.8	79.7	0.1	95	91.5	3.5	95	91.5	3.5	18:20
3	3	3 Org (192 kg)	79.7	79.6	0.1	91.5	88.6	2.9	91.5	88.6	2.9	18:02
4	1	6 Org (384 kg)	79.6	79.5	0.1	88.6	83.9	4.7	88.6	83.9	4.7	15:15
5	2	6 Org (384 kg)	79.5	79.4	0.1	83.9	80.3	3.6	83.9	80.3	3.6	13:59
6	3	6 Org (384 kg)	79.4	79.3	0.1	80.3	76.9	3.4	80.3	76.9	3.4	14:10
7	1	11 Org (678 kg)	79.8	79.7	0.1	93.9	91.3	2.6	93.9	91.3	2.6	16:17
8	2	11 Org (678 kg)	79.7	79.6	0.1	91.3	87.5	3.8	91.3	87.5	3.8	18:20
9	3	11 Org (678 kg)	79.6	79.5	0.1	87.5	83.9	3.6	87.5	83.9	3.6	12:38

Berdasarkan Tabel 5, penurunan tegangan baterai relatif seragam pada seluruh pengujian, yaitu sekitar 0,1 V untuk setiap siklus perjalanan. Sebaliknya, nilai SOC mengalami penurunan pada setiap variasi beban dengan kisaran 2,9–3,8 % pada beban 3 penumpang, 3,4–4,7 % pada beban 6 penumpang, dan 2,6–3,8 % pada beban 11 penumpang. Waktu tempuh kendaraan berada pada rentang 12 menit 38 detik hingga 18 menit 20 detik. Secara umum, hasil tersebut menunjukkan bahwa baterai mampu mempertahankan kestabilan tegangan selama pengoperasian, sementara pelepasan energi yang ditunjukkan oleh penurunan SOC terjadi pada seluruh variasi beban.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban penumpang berpengaruh terhadap kenaikan temperatur baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) 72 V 100 Ah pada *shuttle bus* listrik Universitas Negeri Padang. Berdasarkan Tabel 3, temperatur baterai meningkat dari 32 °C menjadi 33 °C pada beban 3 penumpang, 34 °C pada beban 6 penumpang, dan 36 °C pada beban 11 penumpang, sehingga diperoleh kenaikan temperatur (ΔT) masing-masing sebesar 1 °C, 2 °C, dan 4 °C. Meskipun terjadi peningkatan temperatur seiring bertambahnya beban kendaraan, temperatur maksimum yang dicapai masih berada dalam rentang temperatur operasi yang direkomendasikan untuk baterai LiFePO₄, yaitu sekitar 20–45 °C [3], [6]. Temuan ini menunjukkan bahwa baterai tetap bekerja pada kondisi termal yang aman selama pengujian meskipun mengalami peningkatan kebutuhan daya akibat bertambahnya beban kendaraan.

Fenomena tersebut dapat dijelaskan berdasarkan mekanisme pembangkitan panas pada baterai lithium-ion. Selama proses *discharge*, sebagian energi listrik diubah menjadi energi panas akibat adanya hambatan internal (*internal resistance*) dan reaksi elektrokimia yang berlangsung di dalam sel baterai. Ketika beban kendaraan meningkat, motor listrik memerlukan torsi yang lebih besar sehingga baterai harus menyuplai arus *discharge* yang lebih tinggi. Kondisi ini meningkatkan rugi-rugi resistif (I^2R losses) sehingga panas yang dihasilkan di dalam baterai juga meningkat [7]–[10]. Dengan demikian, kenaikan temperatur yang diamati pada penelitian ini merupakan konsekuensi langsung dari

meningkatnya kebutuhan energi untuk menggerakkan kendaraan dengan beban yang lebih besar.

Selain variasi beban, karakteristik operasi *shuttle bus* juga berkontribusi terhadap perubahan temperatur baterai. Pengujian dilakukan pada lintasan sepanjang 3,19 km dengan 19 titik pemberhentian, tanjakan, turunan, dan tikungan sehingga kendaraan beroperasi dalam pola *stop-and-go*. Kondisi ini menyebabkan motor listrik mengalami siklus akselerasi dan deselerasi secara berulang, yang menghasilkan fluktuasi arus *discharge* selama perjalanan. Berbeda dengan pengujian pada kecepatan konstan, kondisi operasi nyata seperti ini menghasilkan karakteristik termal yang lebih dinamis karena pembangkitan panas tidak berlangsung secara seragam sepanjang waktu [9], [18], [20]. Oleh sebab itu, hasil penelitian ini memberikan gambaran yang lebih representatif mengenai perilaku termal baterai pada kondisi operasional aktual.

Data pelepasan energi pada Tabel 5 memperlihatkan bahwa tegangan baterai relatif stabil dengan penurunan sekitar 0,1 V pada seluruh pengujian, sedangkan nilai State of Charge (SOC) mengalami penurunan pada setiap siklus perjalanan. Meskipun besarnya penurunan SOC tidak menunjukkan hubungan yang sepenuhnya linier terhadap peningkatan beban, seluruh pengujian mengindikasikan bahwa energi baterai terus digunakan selama kendaraan beroperasi. Perbedaan penurunan SOC antar pengujian kemungkinan dipengaruhi oleh kombinasi waktu tempuh, kecepatan rata-rata, pola akselerasi, serta kondisi lintasan yang menyebabkan kebutuhan daya berubah sepanjang perjalanan. Oleh karena itu, pada penelitian ini temperatur baterai merupakan indikator yang lebih representatif dalam mengevaluasi pengaruh variasi beban dibandingkan perubahan SOC, karena respons temperatur menunjukkan kecenderungan yang lebih konsisten terhadap peningkatan beban kendaraan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa peningkatan arus *discharge* akibat perubahan kondisi operasional akan meningkatkan temperatur baterai lithium-ion [8], [9]. Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa efektivitas Battery Thermal Management System (BTMS) dan pemantauan menggunakan Battery Management System (BMS) berperan penting dalam menjaga temperatur baterai tetap berada pada rentang operasi yang aman [12]–[16]. Namun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya dilakukan melalui simulasi numerik, pengujian laboratorium, atau pengujian pada tingkat sel maupun modul baterai. Penelitian ini melengkapi kajian tersebut melalui pengujian langsung pada *shuttle bus* listrik yang beroperasi dalam kondisi pelayanan aktual, sehingga mampu memberikan bukti empiris mengenai karakteristik temperatur baterai LiFePO₄ pada lingkungan operasi sebenarnya.

Meskipun temperatur baterai meningkat hingga 36 °C pada kondisi beban maksimum, nilai tersebut masih berada di bawah batas temperatur operasi yang direkomendasikan untuk baterai LiFePO₄ [3], [11]. Hal ini menunjukkan bahwa baterai LiFePO₄ 72 V 100 Ah yang digunakan pada *shuttle bus* listrik Universitas Negeri Padang memiliki stabilitas termal yang baik selama satu siklus perjalanan pada variasi beban yang diuji. Temuan ini memberikan implikasi bahwa sistem baterai dan Battery Management System (BMS) yang digunakan mampu mempertahankan kondisi operasi baterai dalam batas yang aman pada rute operasional kampus. Meskipun demikian, penelitian ini masih

terbatas pada satu rute pengujian, satu kondisi temperatur lingkungan, dan satu siklus perjalanan sehingga penelitian lanjutan perlu dilakukan pada variasi kondisi lingkungan, jarak tempuh yang lebih panjang, serta pola operasi yang lebih beragam untuk memperoleh gambaran karakteristik termal baterai yang lebih komprehensif.

Meskipun penelitian ini berhasil menunjukkan pengaruh variasi beban penumpang terhadap karakteristik temperatur baterai LiFePO₄ pada kondisi operasional nyata, ruang pengembangan masih terbuka untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai perilaku termal baterai kendaraan listrik. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengevaluasi karakteristik termal baterai LiFePO₄ pada berbagai kondisi temperatur lingkungan, variasi rute dan gradien jalan, siklus perjalanan yang lebih panjang, serta variasi kecepatan dan pola berkendara. Selain itu, analisis hubungan antara temperatur baterai dengan arus *discharge*, konsumsi energi, dan parameter *State of Health* (SOH) perlu dilakukan untuk memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai performa, keandalan, dan umur pakai baterai pada kondisi operasional nyata.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menganalisis pengaruh variasi beban penumpang terhadap karakteristik kenaikan temperatur baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) 72 V 100 Ah pada *shuttle bus* listrik Universitas Negeri Padang menggunakan data hasil pemantauan Battery Management System (BMS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban penumpang menyebabkan kenaikan temperatur baterai yang semakin besar. Pada variasi beban 3 penumpang (192 kg), temperatur baterai meningkat dari 32 °C menjadi 33 °C ($\Delta T = 1$ °C); pada 6 penumpang (384 kg) meningkat menjadi 34 °C ($\Delta T = 2$ °C); dan pada 11 penumpang (678 kg) mencapai 36 °C ($\Delta T = 4$ °C). Meskipun terjadi peningkatan temperatur seiring bertambahnya beban kendaraan, temperatur maksimum yang dicapai masih berada dalam rentang operasi yang direkomendasikan untuk baterai LiFePO₄, sehingga menunjukkan bahwa sistem baterai tetap bekerja pada kondisi termal yang aman selama pengujian.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa variasi beban penumpang merupakan salah satu faktor yang memengaruhi karakteristik termal baterai pada kondisi operasional nyata. Pengujian yang dilakukan pada lintasan kampus dengan karakteristik *stop-and-go* memberikan gambaran empiris mengenai respons temperatur baterai selama kendaraan beroperasi dalam pelayanan transportasi internal. Temuan ini memberikan kontribusi sebagai data eksperimental yang dapat dimanfaatkan untuk mendukung evaluasi performa termal baterai, pengelolaan energi, serta pengembangan sistem manajemen baterai pada kendaraan listrik yang beroperasi dalam kondisi nyata.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] A. P. Adittyta, *Kebijakan Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB) dalam Transisi Energi di Indonesia*.
- [2] R. H. Rachmadian, S. Sumarmi, H. Masruroh, S. Utaya, and Y. Suharto, "Membentuk Kesadaran dan Keterlibatan Mahasiswa sebagai Aktor Penggunaan Transportasi dan Energi Berkelanjutan di Perguruan Tinggi," *Journal of Education Action Research*, vol. 8, no. 1, pp. 169–178, 2024, doi: 10.23887/jear.v8i1.76919.
- [3] S. S. Madani, C. Ziebert, and M. Marzband, "Thermal Characteristics and Safety Aspects of Lithium-Ion Batteries: An In-Depth Review," *Symmetry*, vol. 15, no. 10, p. 1925, 2023, doi: 10.3390/sym15101925.
- [4] F. Rosikin *et al.*, "Literature Review dan Perbandingan Baterai Lithium-ion, Nikel-Kadmium, LiFePO₄, dan Perak Oksida di Indonesia," *Jurnal TECNOSCIENZA*, vol. 9, no. 2, pp. 314–328, 2025, doi: 10.51158/cjm0s369.
- [5] A. Pranata and R. F. Syahputra, "Evaluasi Kinerja Elektrokimia Katoda LiFePO₄ dengan Variasi Aditif Graphene Oxide, Reduced Graphene Oxide dan Koloid Nanopartikel Perak (AgNP)."
- [6] K. Maher and A. Boumaiza, "Thermal Challenges in Lithium-Ion Battery Technology: Investigating Performance and Thermal Stability," *Journal of Energy Storage*, vol. 111, 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.115396.
- [7] D. H. Jung, D. Kim, S. Kim, and T. Kim, "Internal Heat Self-generation in LiFePO₄ Battery Module," *Applied Science and Convergence Technology*, vol. 29, no. 4, pp. 94–97, 2020, doi: 10.5757/ASCT.2020.29.4.094.
- [8] S. Wang *et al.*, "Effects of Current and Ambient Temperature on Thermal Response of Lithium-Ion Battery," *Batteries*, vol. 8, no. 11, p. 203, 2022, doi: 10.3390/batteries8110203.
- [9] D. Shi *et al.*, "A Review of the Combined Effects of Environmental and Operational Factors on Lithium-Ion Battery Performance," *RSC Advances*, vol. 15, no. 17, pp. 13272–13283, 2025, doi: 10.1039/D5RA00934K.
- [10] S. Panchal, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser, and M. Fowler, "Thermal Modeling and Validation of Temperature Distributions in a Prismatic Lithium-Ion Battery at Different Discharge Rates and Varying Boundary Conditions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 96, pp. 190–199, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.019.
- [11] T. Sun *et al.*, "Thermal Runaway Characteristics and Modeling of LiFePO₄ Power Battery for Electric Vehicles," *Automotive Innovation*, vol. 6, no. 3, pp. 414–424, 2023, doi: 10.1007/s42154-023-00226-3.
- [12] L. Zhou *et al.*, "State Estimation Models of Lithium-Ion Batteries for Battery Management System," *Batteries*, vol. 9, no. 2, p. 131, 2023, doi: 10.3390/batteries9020131.
- [13] A. A. Yaqien, M. Yamin, and C. P. Mahandari, "Sistem Manajemen Termal Baterai LiFePO₄ Menggunakan Pelat Pendingin Mini Channel Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik," *JST: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 12, no. 3, pp. 779–789, 2023.
- [14] A. Sharma, M. Khatamifar, W. Lin, and R. Pitchumani, "A State-of-the-Art Review on Numerical Investigations of Liquid-Cooled Battery Thermal Management Systems for Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles," *Journal of Energy Storage*, vol. 101, Art. no. 113844, 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.113844.
- [15] Y. Ortiz, P. Arévalo, D. Peña, and F. Jurado, "Recent Advances in Thermal Management Strategies for Lithium-Ion Batteries: A Comprehensive Review," *Batteries*, vol. 10, no. 3, Art. no. 83, 2024, doi: 10.3390/batteries10030083.

- [16]A. Khan *et al.*, “A State-of-the-Art Review on Heating and Cooling of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles,” *Journal of Energy Storage*, vol. 76, Art. no. 109852, 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.109852.
- [17]T. Hidayat and M. Amiruddin, “Pengaruh Kecepatan dan Beban terhadap Jarak Tempuh dan Konsumsi Tegangan Baterai Lithium Ion INR 18650 60V 25Ah pada Mobil Listrik GASIX,” *Journal of Automotive Technology and Vocational Education*, vol. 6, no. 1, 2025.
- [18]T.-W. Su, C.-J. Ko, and K.-C. Chen, "Estimation of Battery Temperature During Drive Cycle Operation by the Time Evolution of Voltage and Current," *Journal of Energy Storage*, vol. 91, Art. no. 112075, 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112075.
- [19]M. Subramanian et al., "Computational and Experimental Investigations on Liquid-Based Battery Thermal Management Systems for Electric Vehicle Applications Under Various Discharge Rates with Different Flow Speeds," *Journal of Energy Storage*, vol. 91, Art. no. 111757, 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.111757.
- [20]M. A. Bamdezh and G. R. Molaeimanesh, "Aging Behavior of an Electric Vehicle Battery System Considering Real Drive Conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 304, Art. no. 118213, 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118213.