MeKanik, Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Mesin **Vol.19, No.2 November 2026**
e-ISSN: 3046-8272, p-ISSN: 1979-0708 **(Hal: 43-55)**
Alamat Redaksi : Politeknik Negeri Samarinda, Jurusan Teknik Mesin, Jl.Ciptomangunkusumo Kampus Gg.Lipan Samarinda Kalimantan Timur

ANALISIS PENGARUH ARUS PENGISIAN TERHADAP WAKTU DAN EFISIENSI PENGISIAN BATERAI LITHIUM-ION 48V PADA MOBIL LISTRIK

Analysis of the Effect of Charging Current on Charging Time and Charging Efficiency of a 48 V Lithium-Ion Battery in an Electric Car

Wajilan[1*], Anni Fatmawati[2], Ifandi Ramadhan[3]

[1,2] Dosen Jurusan Teknik Mesin, Prodi Perawatan dan Perbaikan Mesin, Politeknik Negeri Samarinda,
[3] Mahasiswa, Prodi Perawatan dan Perbaikan Mesin, Politeknik Negeri Samarinda,
Jl.Dr.Ciptomangunkusumo Kampus Gunung Lipan, Samarinda Seberang, Kota Samarinda
e-mail: [1]wajilan@polnes.ac.id , [2]anni_f@polnes.ac.id , [3]ifandir872@gmail.com

Info Artikel

Riwayat Artikel:
Diterima: 27/09/2026
Diterima dalam bentuk revisi: 17/10/2026
Diterima/publikasi: 17/11/2026

Kata Kunci
Arus Pengisian, Baterai Lithium-Ion, Durasi Pengisian, Efisiensi Energi, Suhu

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi arus pengisian terhadap durasi pengisian, peningkatan suhu, dan efisiensi energi pada baterai lithium-ion 48 V 45 Ah. Metode yang digunakan adalah analisis kuantitatif dengan tiga variasi arus, yaitu 4,5 A (0,1C), 9 A (0,2C), dan 13,5 A (0,3C), menggunakan metode pengisian Constant Current-Constant Voltage (CC-CV). Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan arus memperpendek durasi ideal pengisian hingga State of Charge (SOC) 80%, dari 8 jam pada arus 4,5 A menjadi 4 jam pada arus 9 A dan 2,67 jam pada arus 13,5 A. Namun, peningkatan arus juga menaikkan potensi rugi panas resistif dengan indeks laju panas relatif sebesar 1, 4, dan 9. Hubungan antara arus dan efisiensi energi tidak bersifat linier. Arus rendah meningkatkan rugi tetap akibat durasi yang panjang, sedangkan arus tinggi meningkatkan rugi konduksi dan panas. Berdasarkan kompromi antara durasi dan beban termal, arus 9 A dinilai sebagai pilihan awal yang moderat dengan tetap mengikuti batas aman baterai, charger, dan BMS.

Abstract

This study aims to analyze the effects of charging current variations on charging duration, temperature rise, and energy efficiency of a 48 V 45 Ah lithium-ion battery. A quantitative analysis was conducted using three charging-current variations: 4.5 A (0.1C), 9 A (0.2C), and 13.5 A (0.3C), based on the Constant Current-Constant Voltage (CC-CV) charging method. The results show that increasing the charging current reduces the ideal charging duration required to reach 80% State of Charge (SOC), from 8 hours at 4.5 A to 4 hours at 9 A and 2.67 hours at 13.5 A. However, a higher charging current also increases potential resistive heat losses, with relative heat-generation indices of 1, 4, and 9, respectively. The relationship between charging current and energy efficiency is not linear. A low current increases fixed energy losses because of the longer charging duration, whereas a high current increases conduction and thermal losses. Based on the compromise between charging duration and thermal load, 9 A is considered a moderate initial option, provided that it complies with the safety limits of the battery, charger, and Battery Management System (BMS).

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

PENDAHULUAN

Elektrifikasi kendaraan mendorong kebutuhan sistem penyimpanan energi yang dapat diisi secara cepat, aman, dan efisien. Pada kendaraan listrik, kinerja pengisian tidak hanya ditentukan oleh kapasitas baterai, tetapi juga oleh karakteristik pengisi daya, strategi pengendalian arus, kondisi termal, dan batas keselamatan sel. Shahed et al. [1] meninjau perkembangan teknologi serta standar pengisian kendaraan listrik dan mengidentifikasi pengelolaan pengisian sebagai komponen penting dalam peningkatan keandalan sistem. Li et al. [2] menegaskan bahwa pemilihan strategi pengisian perlu menyesuaikan karakteristik baterai dengan kondisi operasi kendaraan. Dengan demikian, evaluasi pengisian perlu mempertimbangkan durasi, penggunaan energi, dan respons baterai secara bersamaan, termasuk pada kendaraan listrik dengan paket baterai bertegangan nominal 48 V.

Baterai lithium iron phosphate ($LiFePO_4$ atau LFP) merupakan salah satu kimia litium-ion yang digunakan dalam sistem penggerak listrik karena karakteristik stabilitas dan umur siklusnya. Akan tetapi, keunggulan tersebut tidak berarti bahwa baterai dapat menerima arus berapa pun tanpa konsekuensi. Zhou et al. [3] memperlihatkan bahwa perilaku degradasi dan keselamatan sel berbasis LFP tetap dipengaruhi oleh skenario pengisian cepat, termasuk proses yang berkaitan dengan deposisi litium pada elektroda negatif. Melalui analisis banyak faktor pada sel LFP, Xiong et al. [4] juga menunjukkan bahwa suhu, batas tegangan, serta arus pengisian dan pengosongan merupakan variabel yang memengaruhi mekanisme penuaan. Oleh sebab itu, arus pengisian perlu dipilih berdasarkan karakteristik dan batas komponen yang sebenarnya, bukan semata-mata kapasitas nominal baterai.

Salah satu parameter untuk menormalisasi arus pengisian ialah C-rate, yaitu perbandingan arus terhadap kapasitas nominal baterai. Pada paket 45 Ah, arus 4,5 A, 9 A, dan 13,5 A masing-masing setara dengan 0,1C, 0,2C, dan 0,3C; ketiganya berada pada rentang lebih rendah daripada banyak skenario fast charging yang diteliti pada tingkat sel. Qu et al. [5] menunjukkan bahwa pengaruh laju arus terhadap degradasi baterai berkaitan erat dengan temperatur operasi, sehingga kedua parameter tidak seharusnya ditinjau secara terpisah. Wang et al. [6] selanjutnya mengembangkan model elektro-kimia-termal untuk menjelaskan bagaimana perubahan suhu serta arus pengisian memengaruhi kemampuan pengisian dan proses penuaan. Implikasinya, perbandingan beberapa tingkat arus perlu dilakukan pada keadaan awal baterai dan batas pengisian yang sebanding.

Metode constant current–constant voltage (CC–CV) umum digunakan dalam pengisian baterai litium-ion. Selama tahap CC, arus dijaga mendekati nilai yang ditetapkan hingga tegangan batas tercapai; pada tahap CV, tegangan dipertahankan sementara arus secara bertahap menurun. Tahir et al. [7] menguraikan perkembangan strategi pengisian bertahap sebagai penyempurnaan terhadap pengisian dengan arus konstan tunggal. Huang et al. [8] mengoptimalkan titik peralihan berdasarkan state of charge (SoC) dan besaran arus untuk mempertimbangkan durasi serta temperatur pengisian. Karena itu, pendekatan sederhana berupa muatan yang dibutuhkan dibagi arus tetap hanya memberikan estimasi ideal selama tahap CC, bukan prediksi menyeluruh terhadap waktu pengisian CC–CV yang sesungguhnya.

Pemilihan batas SoC awal dan akhir juga menentukan kesetaraan perbandingan antarvariasi arus. Zhiani et al. [9] mengkaji hubungan protokol pengisian cepat dan jendela SoC terhadap kinerja serta umur siklus sel komersial. Pada kondisi lingkungan bersuhu rendah, Laforgue et al. [10] menemukan bahwa dampak pengisian berarus tinggi dapat berbeda menurut jenis sel serta temperatur pengujian. Kedua studi tersebut menunjukkan perlunya menyatakan rentang SoC, temperatur awal, batas tegangan, dan kriteria terminasi dengan jelas. Tanpa batas yang sama, selisih waktu

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

pengisian dapat dipengaruhi perbedaan kondisi awal, bukan hanya oleh perubahan arus yang menjadi variabel penelitian.

Peningkatan arus memang mempercepat perpindahan muatan pada tahap arus konstan, tetapi sekaligus meningkatkan laju pembentukan panas resistif. Pada asumsi hambatan tetap, rugi Joule sesaat sebanding dengan kuadrat arus (I^2R). Kim et al. [11] menelaah keterkaitan termal dan elektrokimia selama pengisian sehingga perubahan C-rate tidak dapat dipisahkan dari perubahan polarisasi sel. Wang et al. [12] membandingkan sejumlah mode pengisian melalui model termal-elektrokimia dan menemukan bahwa waktu terjadinya temperatur puncak serta total pembentukan panas berbeda antarprotokol. Dengan demikian, rasio I^2 pada beberapa arus dapat digunakan sebagai indikator awal kecenderungan panas, tetapi tidak langsung sama dengan rasio kenaikan suhu akhir maupun energi panas total yang dilepaskan selama satu siklus.

Kenaikan suhu baterai merupakan hasil interaksi antara panas yang dibangkitkan di dalam sel dan panas yang dilepas ke lingkungan. Pada pengujian sel dengan tingkat kesehatan berbeda, Meng et al. [13] melaporkan bahwa proses pengisian serta kondisi penuaan memengaruhi respons termal dan risiko keselamatan. Scheller et al. [14] secara eksperimental mengevaluasi kondisi pendinginan yang berbeda dan menunjukkan pentingnya batas termal ketika membandingkan performa pengisian silindris. Sementara itu, Khan et al. [15] merangkum metode pemanasan dan pendinginan baterai kendaraan listrik beserta kebutuhan energinya. Temuan-temuan tersebut mengindikasikan bahwa suhu permukaan sesudah pengisian saja belum memadai untuk menguraikan laju pembentukan panas tanpa informasi durasi, suhu lingkungan, dan kondisi perpindahan kalor.

Selain temperatur rata-rata, distribusi panas dan sifat kimia sel perlu dipertimbangkan dalam interpretasi keselamatan. Hwang et al. [16] meninjau sistem manajemen termal kendaraan listrik dan membedakan kebutuhan berbagai mekanisme pendinginan menurut karakteristik beban. Pada sel LFP, Sarkar et al. [17] memodelkan perilaku termal pada laju pelepasan arus dan suhu lingkungan berbeda; meskipun kajian tersebut berfokus pada pengosongan, hasilnya memperlihatkan bahwa respons temperatur sangat bergantung pada kondisi operasional. Oleh karena itu, kajian pengisian pada paket baterai kendaraan listrik sebaiknya menetapkan posisi sensor, temperatur awal, serta batas temperatur pengoperasian yang diizinkan oleh produsen dan battery management system (BMS).

Arus yang lebih tinggi juga dapat mengubah penuaan baterai, terutama apabila pengisian berlangsung berulang dalam kondisi yang kurang terkendali. Liu et al. [18] membandingkan perilaku penuaan serta pembentukan panas pada beberapa protokol pengisian berarus tinggi. Pada kasus yang lebih ekstrem, Wang et al. [19] mengevaluasi hubungan laju pengisian dengan karakteristik thermal runaway serta pelepasan gas ketika baterai LFP mengalami pengisian berlebih. Kondisi eksperimen dalam kedua penelitian tersebut tidak setara dengan arus 0,1–0,3C pada paket 45 Ah, sehingga hasilnya tidak boleh dipindahkan secara kuantitatif tanpa pengujian tambahan. Namun, keduanya mendukung pentingnya memisahkan tujuan mempercepat pengisian dari kewajiban menjaga keselamatan dan batas arus aktual sistem.

Berbagai penelitian mengembangkan strategi yang lebih adaptif untuk mengurangi pertentangan antara waktu dan beban termal. Jiao et al. Balancing Charging Efficiency and Thermal Safety: A Comparative Analysis of Multistage Constant Current Charging Protocols [20] mempelajari protokol multistage constant current dengan menggabungkan pemodelan dan validasi eksperimen guna menyeimbangkan efisiensi pengisian serta keselamatan termal. Liu et al. [21] menguji variasi pola pengisian berdenyut pada sel LFP dan NMC untuk mengevaluasi

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

pengaruh bentuk profil arus terhadap perilaku pengisian. Melalui pendekatan optimasi dan model predictive control, Zhou et al. [22] mengusulkan strategi pengisian yang membatasi penuaan sambil mempertimbangkan kebutuhan pengisian cepat. Pendekatan-pendekatan tersebut menunjukkan bahwa arus terbaik tidak bersifat universal, melainkan bergantung pada fungsi tujuan, kondisi operasi, dan kendala sistem yang ditetapkan.

Penilaian efisiensi energi membutuhkan definisi besaran yang lebih ketat daripada sekadar perubahan SoC atau panjang waktu pengisian. Su et al. [23] menguji efisiensi energi pengisian sel litium-ion pada variasi C-rate, temperatur, dan SoC, serta memperlihatkan adanya pengaruh saling terkait dari ketiga kondisi tersebut. Pada tingkat sistem, Blasuttigh et al. [24] mengkaji kompromi antara efisiensi baterai dan efisiensi konverter daya, sehingga arus yang menguntungkan pada satu komponen belum tentu menghasilkan rugi terkecil pada sistem pengisian keseluruhan. Untuk memperoleh efisiensi sisi AC ke terminal baterai, energi pada kedua sisi harus diukur dan diintegrasikan terhadap waktu; sedangkan pengukuran efisiensi penyimpanan atau round-trip efficiency memerlukan neraca energi masuk serta energi keluar pada batas pengujian yang jelas. Dengan demikian, tercapainya SoC tertentu tidak dapat langsung disebut sebagai efisiensi pengisian.

Pertimbangan efisiensi juga tidak dapat dilepaskan dari kendali BMS dan karakteristik lingkungan. Kim [25] meninjau metode kendali optimal baterai kendaraan listrik yang mencakup pengisian, pengaturan termal, serta penyeimbangan sel. Melalui perbandingan beberapa skenario temperatur ekstrem, Nazlıgül et al. [26] menganalisis pengaruh kondisi termal terhadap strategi pengisian baterai LFP. Kedua kajian tersebut menegaskan bahwa pemilihan arus harus diperlakukan sebagai keputusan yang dibatasi oleh kesehatan sel, proteksi rangkaian, dan kondisi operasi. Pada paket baterai 48 V, batas charge current dan cut-off voltage perlu diperoleh dari spesifikasi baterai, charger, serta BMS yang dipakai; kemampuan arus pengosongan tidak dapat diasumsikan sebagai kemampuan arus pengisian.

Kajian terdahulu telah memperlihatkan hubungan antara arus, suhu, strategi pengisian, dan penuaan, terutama untuk pengisian cepat pada sel atau sistem dengan karakteristik yang beragam. Namun, penerapannya pada suatu paket baterai kendaraan listrik berkapasitas terbatas tetap membutuhkan penyajian yang konsisten mengenai nilai arus, rentang SoC, durasi, respons termal, serta definisi rugi energi. Dalam konteks tersebut, kontribusi yang dituju penelitian ini ialah memperjelas kompromi pengisian pada tiga tingkat arus rendah hingga sedang di paket LFP 48 V 45 Ah. Penekanannya bukan pada klaim penemuan protokol baru ataupun penetapan arus optimum yang berlaku umum, melainkan pada evaluasi terstruktur mengenai batas manfaat penyingkatan waktu dan konsekuensi termal berdasarkan cakupan data yang tersedia.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi arus pengisian 4,5 A (0,1C), 9 A (0,2C), dan 13,5 A (0,3C) terhadap estimasi durasi pengisian hingga SoC 80% dan kecenderungan rugi resistif pada baterai $LiFePO_4$ 48 V 45 Ah untuk aplikasi mobil listrik. Analisis dilakukan dalam kerangka pengisian CC–CV dengan membedakan hasil perhitungan ideal dari data suhu pengujian pendukung. Selain mengidentifikasi kompromi antara durasi dan beban panas, kajian ini menempatkan pengukuran energi masuk dari charger dan energi pada terminal baterai sebagai prasyarat ketika menilai efisiensi aktual. Pendekatan tersebut diharapkan menghasilkan interpretasi yang lebih transparan mengenai pemilihan arus pengisian dalam batas keselamatan baterai, charger, dan BMS.

METODE PERANCANGAN

Rancangan Penelitian

Penelitian ini memakai metode eksperimen kuantitatif. Yang dirancang

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

bukan konstruksi baterainya, melainkan sistem pengujian untuk mengisi baterai lithium-ion 48 V 45 Ah dengan beberapa tingkat arus. Arus pengisian diposisikan sebagai variabel yang diubah, sementara waktu pengisian, kenaikan suhu, energi yang masuk, dan efisiensi pengisian dibiarkan muncul sebagai hasil yang diamati. Waktu dan suhu sengaja diletakkan di barisan depan, sebab keduanya memang saling tarik dalam persoalan pengisian cepat [27].

Pola pengisiannya Constant Current-Constant Voltage (CC-CV). Supaya pengaruh arus bisa dibandingkan secara adil, baterai, charger, batas tegangan CV, arus terminasi, kabel, konektor, posisi sensor suhu, kondisi awal baterai, dan cara pencatatan data dibuat sama pada setiap pengujian. Besar arus sendiri tidak boleh melewati batas pengisian baterai dan BMS yang tertera pada nameplate atau datasheet.

Rancangan sistem pengujian disusun dalam enam langkah. Spesifikasi nyata baterai dicatat lebih dulu, mencakup tegangan nominal, kapasitas, jenis kimia, jumlah sel seri bila tersedia, tegangan pengisian maksimum, dan batas arus dari BMS. Berikutnya ditentukan beberapa tingkat arus yang sanggup diberikan charger tanpa menembus batas aman. Batas pengukuran energi lalu ditetapkan, yakni energi AC sebelum charger dan energi DC yang sampai ke terminal baterai, disusul pemilihan alat ukur arus, tegangan, energi, suhu, dan waktu dengan rentang yang memadai. Prosedur pengisian yang sama disiapkan untuk semua variasi, dari kondisi awal sampai kriteria selesai. Langkah terakhir adalah mengolah hasil dengan persamaan yang sudah ditetapkan, kemudian membandingkan pengaruh tiap variasi arus terhadap waktu, suhu, dan efisiensi.

Pengumpulan Data

Data utama berasal dari pengukuran langsung selama pengisian. Nameplate, datasheet baterai, charger, BMS, dan alat ukur menyumbang data pendukung yang dipakai untuk menentukan batas aman sekaligus menjelaskan karakter sistem yang diuji. Parameter yang dicatat meliputi tegangan baterai, arus pengisian aktual, daya atau energi sisi AC, suhu permukaan baterai, suhu lingkungan, dan waktu, ditambah informasi SOC dari BMS bila tersedia. Seluruh pencatat waktu dinyalakan serentak agar arus, tegangan, suhu, dan energi punya acuan waktu yang seragam.

Interval pencatatan dibuat tetap. Bila memakai data logger, interval tidak lebih dari satu menit supaya peralihan tahap CC ke CV tidak lolos dari pengamatan, dan pencatatan manual pun memakai interval yang sama dari awal sampai akhir. Kejadian di luar kebiasaan, misalnya penurunan arus atau pemutusan oleh BMS, dicatat sebagai keterangan pengujian. Kondisi awal disamakan lewat penetapan SOC atau tegangan awal dan suhu awal pada rentang tertentu. Pengisian dianggap selesai ketika charger atau BMS menghentikan aliran pengisian, atau ketika arus turun ke nilai terminasi sesuai spesifikasi. Kriteria ini tidak boleh berubah antarvariasi.

Alat dan Objek Penelitian

Alat dipilih bukan hanya karena sanggup mengisi baterai, tetapi juga karena mampu menghasilkan data yang lengkap dan aman. Daftarnya ada pada Tabel 1, dengan merek, tipe, rentang, dan ketelitian yang dicatat sesuai perangkat yang betul-betul dipakai.

Tabel 1: Alat yang digunakan

No.	Nama alat	Fungsi
1	Charger baterai CC-CV	Memberikan arus dan tegangan pengisian kepada baterai
2	Power meter atau wattmeter AC	Mengukur daya nyata dan energi yang diambil charger dari sumber listrik
3	Sensor tegangan dan arus DC atau data logger	Merekam tegangan terminal, arus aktual, daya, dan energi yang masuk ke baterai
4	Multimeter digital	Memeriksa tegangan, kontinuitas, dan kesesuaian pembacaan sensor
5	Sensor suhu atau termokopel dan pembaca data	Mengukur suhu permukaan baterai selama pengisian
6	Stopwatch atau pencatat waktu	Mencatat waktu mulai, peralihan tahap, dan waktu selesai

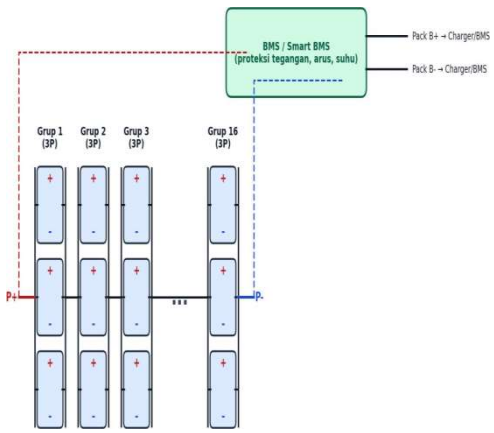
@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

No.	Nama alat	Fungsi
7	Laptop dan perangkat lunak pengolah data	Menyimpan data, menghitung, dan membuat grafik
8	Perangkat pemantau BMS	Membaca SOC, tegangan sel, suhu, atau status proteksi bila fitur tersedia
9	Perlengkapan keselamatan kerja	Melindungi peneliti dan area pengujian

Objek penelitian berupa baterai lithium-ion jenis $LiFePO_4$ dengan spesifikasi nominal 48 V 45 Ah, dipakai pada seluruh variasi pengujian. Rincian parameternya, yang bersumber dari deskripsi produk dan datasheet, dirangkum pada Tabel 2, sedangkan susunan selnya tampak pada Gambar 1.

Tabel 2: Parameter objek penelitian

No.	Parameter	Nilai atau keterangan
1	Jenis baterai	Lithium-ion $LiFePO_4$
2	Tegangan paket	48 V
3	Kapasitas paket	45 Ah
4	Kapasitas sel (deskripsi produk)	15 Ah
5	Sistem perlindungan	BMS atau Smart BMS JiKong
6	Metode sambungan	Pelat nikel dengan spot welding
7	Kabel	Silikon tahan temperatur tinggi
8	Waktu pengisian yang dilaporkan	±3 jam hingga 80%
9	Lama penggunaan yang dilaporkan	±4 jam
10	Tegangan rata-rata sel saat penuh	3,6 V
11	SOC hasil pemeriksaan	79% dari target 80%



Gambar 1: Skema rangkaian sel baterai lithium-ion dengan BMS (konfigurasi diperkirakan 16S3P)

Perakitan dan Prosedur Pengujian

Perakitan dikerjakan saat sumber listrik belum tersambung. Aliran dayanya begini, sumber AC masuk ke power meter, kemudian ke charger CC-CV. Di sisi DC, keluaran charger melewati sensor tegangan dan arus, perangkat proteksi, dan BMS sebelum akhirnya menyentuh baterai 48 V 45 Ah.

Seluruh komponen diperiksa secara fisik lebih dulu, dan bagian yang longgar, terkelupas, atau rusak tidak dipakai. Power meter dipasang sebelum charger agar seluruh energi yang ditelan charger ikut terekam. Sensor tegangan dan arus diletakkan di antara charger dan baterai, dengan polaritas diperiksa sebelum sambungan dikencangkan. Sekering atau pemutus arus dipasang pada jalur DC sedekat mungkin dengan sumber energi. Sensor suhu ditempelkan pada titik yang gampang diulang dan dijauhkan dari hembusan kipas charger, supaya pendinginan tidak berbeda dari satu pengujian ke pengujian lain. Alat ukur dihubungkan ke laptop dengan waktu yang disamakan terhadap stopwatch. Terakhir, konduktor terbuka diisolasi, tegangan awal dibandingkan dengan multimeter, lalu uji awal pada arus terendah dijalankan. Sistem baru dinyatakan siap bila pembacaan stabil dan tidak ada panas berlebih.

Setelah sistem siap, baterai dikondisikan pada SOC atau tegangan awal yang sama, lalu nilai awal tegangan, suhu baterai, suhu lingkungan, dan energi pada power meter dicatat. Charger diatur pada variasi arus yang diuji dan pencatatan dimulai bersamaan dengan waktu. Pengisian dibiarkan mengikuti pola CC-CV sampai kriteria selesai terpenuhi. Data disimpan, baterai diistirahatkan, dan kondisi awalnya dikembalikan dengan prosedur yang sama sebelum variasi berikutnya.

Metode Perhitungan

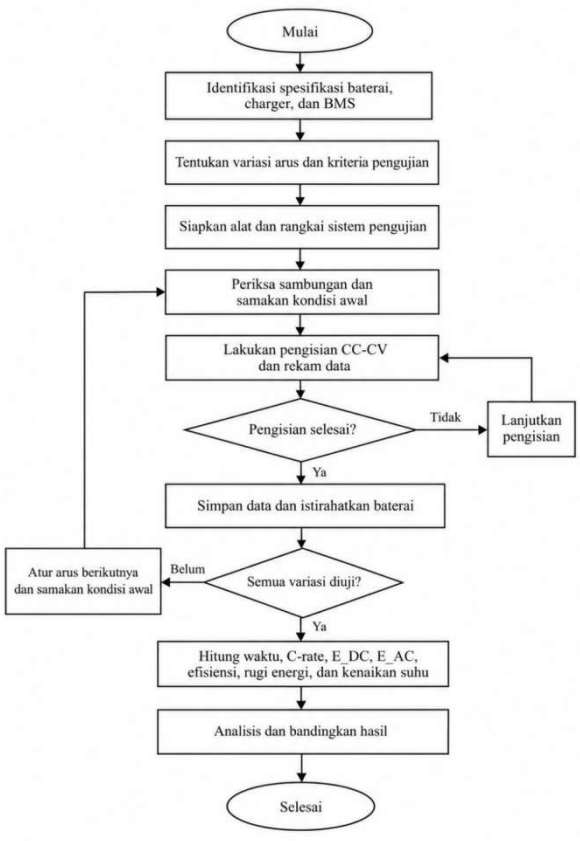
Data diolah menjadi sejumlah besaran. Jumlah sel paralel dan energi nominal dihitung dari spesifikasi paket, sedangkan ketercapaian target SOC menilai seberapa

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

dekat hasil pengisian aktual dengan target. C-rate, muatan, dan durasi pengisian ideal dihitung untuk setiap variasi arus. Laju panas resistif memakai hubungan I^2R dan kenaikan suhu diambil dari selisih suhu akhir dengan suhu awal. Perhitungan energi DC dan AC, efisiensi, serta rugi energi disiapkan sebagai dasar penilaian efisiensi, walau pada pembahasan ini efisiensi baru ditelaah sebagai kecenderungan. Persamaan beserta simbolnya diperkenalkan langsung di bagian hasil, tepat sebelum angkanya dihitung, supaya pembaca tidak perlu bolak-balik halaman.

Diagram Alir

Urutan penelitian dari identifikasi spesifikasi sampai pengolahan data dirangkum pada Gambar 2. Pencatatan dilanjutkan selama kriteria pengisian belum tercapai, dan setelah satu variasi selesai pengujian berlanjut ke variasi berikutnya dengan kondisi awal yang disamakan kembali.



Gambar 2: Diagram alir penelitian

Proses dimulai dari identifikasi spesifikasi baterai, charger, dan BMS untuk mengetahui kapasitas nominal, tegangan kerja, batas arus pengisian, tegangan maksimum, dan sistem perlindungan. Informasi itu menjadi pegangan dalam menentukan variasi arus dan kriteria berakhirnya pengujian. Alat lalu dirangkai sesuai skema, sambungan serta polaritas diperiksa, dan kondisi awal baterai disamakan. Pengisian CC-CV dijalankan sambil merekam tegangan, arus, energi AC, suhu baterai, dan waktu. Bila kriteria selesai belum terpenuhi, pengisian dan perekaman diteruskan. Usai pengisian, data disimpan dan baterai diistirahatkan agar suhu dan tegangannya kembali stabil. Jika masih ada variasi yang belum diuji, arus diatur ke nilai berikutnya dan siklus diulang. Setelah semua variasi tuntas, data diolah menjadi waktu pengisian, C-rate, energi DC dan AC, efisiensi, rugi energi, serta kenaikan suhu, kemudian dianalisis dan dibandingkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Objek dan Susunan Sel

Menurut deskripsi produk, paket baterai memakai sel berkapasitas 15 Ah, dilengkapi BMS atau Smart BMS JiKong, kabel silikon tahan temperatur tinggi, konektor XT60 atau XT90 sesuai kebutuhan, dan sambungan pelat nikel yang di-spot welding. BMS bertugas mengawasi tegangan, arus, suhu, serta kondisi proteksi, sehingga baterai terhindar dari pengisian berlebih, pengosongan berlebih, dan panas berlebih. Supaya kapasitas paket mencapai 45 Ah, tiga sel harus dipasang paralel pada tiap kelompok seri. Jumlah paralel dihitung dengan Persamaan (1).

$$N_p = \frac{C_{\text{paket}}}{C_{\text{sel}}} \quad (1)$$

dengan N_p jumlah sel paralel, C_{paket} kapasitas paket baterai (Ah), dan C_{sel} kapasitas satu sel (Ah). Untuk C_{paket} = 45 Ah dan C_{sel} = 15 Ah diperoleh N_p = 45/15 = 3. Kapasitas 45 Ah dengan demikian diperkirakan berasal dari tiga sel paralel

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

(3P). Bila paket 48 V tersusun dari 16 kelompok seri $LiFePO_4$, konfigurasinya diperkirakan 16S3P seperti pada Gambar 1. Dugaan ini perlu dicatat masih menunggu konfirmasi dari label baterai atau aplikasi Smart BMS, karena deskripsi produk tidak menyebut susunan serinya secara langsung.

Energi Nominal Baterai

Energi nominal memberi gambaran kemampuan simpan energi dari tegangan dan kapasitas yang tercantum pada spesifikasi, dan dihitung dengan Persamaan (2) [28].

$$E_{\text{nom}} = V_{\text{nom}} \times C_{\text{nom}} \quad (2)$$

untuk V_{nom} = 48 V dan C_{nom} = 45 Ah, E_{nom} = 48 × 45 = 2.160 Wh atau 2,16 kWh. Angka ini berangkat dari spesifikasi, jadi bukan energi aktual yang pasti masuk saat pengisian. Energi aktual masih dipengaruhi perubahan tegangan, arus yang menurun pada tahap CV, serta rugi-rugi charger, kabel, konektor, dan BMS.

Kondisi Awal dan Kelayakan Baterai

Hasil pemeriksaan memperlihatkan tegangan rata-rata sel saat penuh sebesar 3,6 V, sedangkan kapasitas terbaca 79% dari target pengisian maksimum 80%. Ketercapaian target SOC dinilai dengan Persamaan (3).

$$K_{\text{SOC}} = \frac{SOC_{\text{aktual}}}{SOC_{\text{target}}} \times 100\% \quad (3)$$

dengan K_{SOC} persentase ketercapaian target SOC (%), SOC_{aktual} SOC yang terbaca pada baterai (%), dan SOC_{target} SOC yang ditetapkan sebagai target (%). Dengan SOC aktual 79% dan target 80%, K_{SOC} = (79/80) × 100% = 98,75%. Selisihnya hanya 1%, jadi baterai masih mau menerima pengisian dan layak dipakai. Meski begitu, angka 98,75% ini murni ketercapaian target SOC. Menyebutnya efisiensi energi pengisian adalah keliru.

Pengaruh Arus Pengisian terhadap Durasi

Agar perbandingan seragam, analisis memakai tiga variasi arus, yaitu 4,5 A, 9 A, dan 13,5 A, yang masing-masing setara 0,1C, 0,2C, dan 0,3C terhadap kapasitas nominal 45 Ah. C-rate dihitung dengan Persamaan (4) [29].

$$C\text{-rate} = \frac{I_{\text{ch}}}{C_{\text{nom}}} \quad (4)$$

dengan I_{ch} arus pengisian (A). Durasi dinormalisasi dari SOC 0% sampai 80% supaya rentang pengisian sama untuk semua variasi. Muatan yang harus masuk ke baterai dihitung dengan Persamaan (5), dan durasi idealnya pada tahap arus konstan dengan Persamaan (6).

$$Q_{\text{masuk}} = C_{\text{nom}} \times \frac{SOC_{\text{akhir}} - SOC_{\text{awal}}}{100} \quad (5)$$

$$t_{\text{ideal}} = \frac{Q_{\text{masuk}}}{I_{\text{ch}}} \quad (6)$$

untuk SOC 0% sampai 80%, Q_{masuk} = 45 × (80 − 0)/100 = 36 Ah. Durasi idealnya 8 jam pada 4,5 A, 4 jam pada 9 A, dan 2,67 jam (sekitar 2 jam 40 menit) pada 13,5 A, seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3: C-rate, muatan, dan durasi ideal pengisian

Arus pengisian	C-rate	Muatan sampai SOC 80%	Durasi ideal
4,5 A	0,1C	36 Ah	8 jam
9 A	0,2C	36 Ah	4 jam
13,5 A	0,3C	36 Ah	2,67 jam

Naiknya arus dari 4,5 A ke 9 A memangkas durasi ideal sebesar 4 jam atau 50%. Lompatan berikutnya, dari 9 A ke 13,5 A, hanya memangkas sekitar 1,33 jam atau 33,25%. Arus yang lebih besar memang mempercepat, tetapi tambahan hematnya makin tipis, mirip menekan pedal gas pada mobil yang sudah hampir mentok di kecepatan jalan tol.

Data pendukung menyebut waktu pengisian sekitar tiga jam sampai 80%, dan angka itu terpaut dekat dengan hasil analisis

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

13,5 A sebesar 2,67 jam. Namun arus charger pada data tersebut tidak tercantum dan SOC awalnya tidak diketahui, sehingga tiga jam itu tidak bisa dipakai untuk menyatakan arus aktualnya pasti 13,5 A. Pada pengisian nyata durasi dapat lebih panjang karena charger memasuki tahap CV, arus menurun menjelang penuh, BMS menyeimbangkan sel, dan sistem mengalami rugi-rugi.

Pengaruh Arus Pengisian terhadap Suhu

Selama pengisian, sebagian energi listrik berubah menjadi panas akibat hambatan internal sel, kabel, konektor, dan komponen proteksi. Laju panas resistif dinyatakan dengan Persamaan (7) [30].

$$P_{\text{panas}} = I^2 R \qquad (7)$$

dengan P_{panas} daya panas atau rugi resistif (W), I arus pengisian (A), dan R hambatan total baterai dan rangkaian (Ω). Bila R dianggap tetap, indeks laju panas ditentukan oleh I^2, yakni 20,25 untuk 4,5 A, 81 untuk 9 A, dan 182,25 untuk 13,5 A. Terhadap 4,5 A, itu berarti 1, 4, dan 9 kali (Tabel 4).

Tabel 4: Indeks laju panas berdasarkan hubungan $P = I^2R$

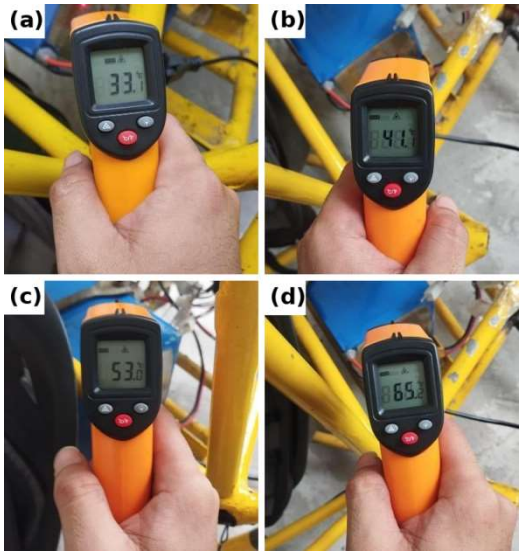
Arus	Nilai I^2	Indeks laju panas relatif
4,5 A	20,25	1 kali
9 A	81	4 kali
13,5 A	182,25	9 kali

Tabel 4 menunjukkan laju pembangkitan panas sesaat, bukan kenaikan suhu akhir dalam derajat Celsius. Arus 9 A menghasilkan laju rugi resistif empat kali dibanding 4,5 A, dan 13,5 A sembilan kali. Tetapi arus besar juga membuat pengisian lebih singkat. Untuk muatan yang sama dengan hambatan tetap, total panas pada tahap CC mengikuti $Q_{panas} = I^2Rt$. Karena waktu ideal berbanding terbalik dengan arus, totalnya meningkat mendekati perbandingan 1:2:3 untuk 4,5 A, 9 A, dan 13,5 A.

Analisis I^2R tadi dilengkapi pengujian langsung terhadap tiga variasi arus. Suhu permukaan baterai dicatat pada kondisi awal dan akhir pengisian, dan suhu awal pada semua pengujian tercatat 33°C. Layar charger memperlihatkan arus 4,50 A pada 53,8 V, 6,53 A pada 53,9 V, dan 8,92 A pada 54,1 V (Gambar 3), sehingga ketiganya disebut 4,5 A, 6,5 A, dan 8,9 A. Variasi uji lapangan ini tidak sama persis dengan variasi analitis 4,5 A, 9 A, dan 13,5 A, jadi keduanya dibaca berdampingan, bukan dicampur. Pembacaan suhu pada termometer ditunjukkan Gambar 4 dan hasilnya dirangkum pada Tabel 5.



Gambar 3: Tampilan layar charger saat pengisian (a) 4,5 A, (b) 6,5 A, dan (c) 8,9 A



Gambar 4: Pembacaan suhu baterai (a) sebelum pengisian, (b) 4,5 A, (c) 6,5 A, dan (d) 8,9 A

Tabel 5: Hasil pengujian suhu pengisian dan estimasi durasi

Arus	Suhu awal	Suhu akhir	Kenaikan suhu (ΔT)	Estimasi durasi*
4,5 A	33°C	41°C	8°C	8 jam 0 menit
6,5 A	33°C	53°C	20°C	5 jam 32 menit
8,9 A	33°C	65°C	32°C	4 jam 3 menit

*Muatan 36 Ah dibagi arus, mengikuti Persamaan (6).

Suhu naik 8°C pada 4,5 A, 20°C pada 6,5 A, dan 32°C pada 8,9 A. Kenaikannya tidak linier terhadap arus, melainkan menajam seiring arus naik, sejalan dengan hubungan I^2R pada Persamaan (7). Rasio I^2

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

antara 8,9 A dan 4,5 A sekitar 3,9 kali, sedangkan rasio ΔT antara keduanya 4 kali. Kedekatan angka ini menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan model I^2R, walau tidak identik karena sebagian panas lepas ke lingkungan. Tiga titik data tentu terlalu sedikit untuk menggambar kurva yang pasti.

Estimasi durasi turun dari 8 jam pada 4,5 A menjadi sekitar 4 jam pada 8,9 A, selaras dengan pola pada Tabel 3. Mempercepat pengisian memang menggoda, tetapi harganya adalah suhu. Karena itu arus optimal tidak bisa ditentukan dari waktu tersingkat saja, batas termal yang aman ikut diperhitungkan. Tarik-menarik antara waktu pengisian dan kenaikan suhu ini juga menjadi pokok dalam penelitian optimasi pengisian baterai lithium-ion [27].

Data pendukung dari pengujian mobil listrik mencatat suhu awal baterai 33°C dan suhu akhir 33°C, 34°C, 33°C, 34°C, dan 34°C pada lima pengujian. Rata-rata suhu akhirnya 33,6°C, sehingga kenaikan suhu dihitung dengan Persamaan (8).

$$\Delta T = T_{\text{akhir}} - T_{\text{awal}} \quad (8)$$

Hasilnya ΔT = 33,6 − 33 = 0,6°C. Angka sekecil itu menandakan kondisi termal yang relatif stabil saat kendaraan beroperasi. Namun data ini hanya penopang kelayakan baterai, bukan suhu selama proses pengisian, sebab diukur sebelum dan sesudah kendaraan dipakai di lintasan.

Kecenderungan Efisiensi

Pada arus rendah, durasi yang panjang membuat konsumsi tetap kipas, rangkaian kontrol, BMS, dan charger berlangsung lama. Rugi energi bisa bertambah walaupun rugi resistif sesaatnya kecil. Pada arus tinggi pengisian lebih singkat, tetapi rugi konduksi dan panas melonjak karena bergantung pada kuadrat arus. Hubungan arus dengan efisiensi pun tidak selalu linier dan dapat memiliki nilai optimum pada arus menengah. Perlu ditegaskan bahwa bagian ini bersifat kecenderungan, belum menghadirkan angka efisiensi hasil ukur.

Energi nominal yang setara SOC 80% dihitung dengan Persamaan (9).

$$E_{80\%} = 0{,}8 \times E_{\text{nom}} \quad (9)$$

Dengan E_{nom} = 2.160 Wh, $E_{80\%}$ = 0,8 × 2.160 = 1.728 Wh. Bila pengisian dari SOC 0% ke 80% ditempuh dalam tiga jam, arus rata-rata ekuivalennya 12 A (36 Ah dibagi 3 jam). Angka 12 A ini bukan bacaan arus charger, sebab SOC awal dan profil arus aktual pada data pendukung tidak tersedia. Ia hanya menunjukkan bahwa waktu tiga jam masih masuk akal untuk baterai 45 Ah, selama arus rata-rata berada di kisaran menengah dan prosesnya dipengaruhi tahap CC-CV.

Perbandingan Variasi Arus dan Kelayakan

Perbandingan keseluruhan variasi arus dirangkum pada Tabel 6. Arus 4,5 A memberi beban termal paling rendah, tetapi membutuhkan waktu paling lama. Arus 13,5 A paling cepat, namun potensi rugi panasnya paling tinggi. Arus 9 A berada di tengah, sehingga dapat dipilih sebagai arus awal yang seimbang bila batas pengisian baterai dan BMS mengizinkan.

Tabel 6: Perbandingan keseluruhan variasi arus

Parameter	4,5 A (0,1C)	9 A (0,2C)	13,5 A (0,3C)
Durasi ideal hingga SOC 80%	8 jam	4 jam	2,67 jam
Laju panas relatif I^2R	1 kali	4 kali	9 kali
Indeks total panas CC sederhana	1	2	3
Potensi rugi tetap sistem	Paling tinggi	Sedang	Paling rendah
Potensi rugi resistif	Paling rendah	Sedang	Paling tinggi
Penilaian umum	Aman tetapi lambat	Kompromi waktu dan panas	Cepat tetapi beban termal lebih tinggi

Kelayakan baterai dinilai dari beberapa indikator yang tersedia, dirangkum pada Tabel 7. Baterai mampu mencapai SOC 79% dari target 80%, tegangan rata-rata sel

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

penuhnya 3,6 V, bisa dipakai sekitar empat jam, dan kenaikan suhu operasinya hanya 0,6°C. Smart BMS, kabel tahan temperatur tinggi, konektor yang disesuaikan, dan sambungan spot welding turut menopang keamanan konstruksi paket.

Tabel 7: Hasil evaluasi kinerja baterai

Indikator	Hasil	Penilaian
Ketercapaian target SOC	98,75% dari target 80%	Baik
Tegangan rata-rata sel penuh	3,6 V	Mendukung kondisi sel terisi
Waktu pengisian pendukung	±3 jam hingga 80%	Masih sesuai untuk arus menengah
Lama penggunaan	±4 jam	Mendukung fungsi operasional
Kenaikan suhu operasi pendukung	0,6°C	Relatif kecil
Sistem proteksi	BMS atau Smart BMS JiKong	Mendukung keamanan

Kendati begitu, kelayakan pengisian pada suatu arus tetap harus berpatokan pada batas charge current BMS, rating charger, ukuran kabel, konektor, sekering, suhu baterai, dan keseimbangan sel. Informasi maximum discharge 3C pada deskripsi produk hanya menyatakan kemampuan pelepasan arus, jadi tidak boleh dijadikan batas arus pengisian.

KESIMPULAN

Hasil analisis memperlihatkan dua kepentingan yang saling bertabrakan, yaitu durasi dan kondisi termal. Arus yang naik mempercepat perpindahan muatan, tetapi sekaligus mengerek laju rugi resistif dan potensi kenaikan suhu. Karena itu arus optimal tidak cukup ditentukan oleh waktu tercepat. Temperatur, rugi energi, respons BMS, dan batas aman komponen harus ikut diperhitungkan. Arus 4,5 A cocok untuk pengisian lambat dengan beban panas rendah, namun SOC 80% baru tercapai sekitar delapan jam. Arus 13,5 A menurunkan durasi ke sekitar 2,67 jam, tetapi laju rugi resistifnya sembilan kali dibanding 4,5 A dengan asumsi hambatan sama. Arus 9 A memberi durasi sekitar empat jam dengan beban termal di tengah, sehingga diajukan sebagai rekomendasi awal yang moderat, bukan batas mutlak, karena nilai akhirnya tetap mengikuti spesifikasi nyata charger dan BMS.

Waktu pengisian sekitar tiga jam sampai SOC 80%, SOC 79% dari target 80%, dan kenaikan suhu operasi 0,6°C secara bersama-sama menunjukkan bahwa baterai 48 V 45 Ah masih berfungsi baik dan layak dipakai, asalkan diisi dengan charger yang sesuai dan tetap diawasi BMS.

REFERENSI

[1] M. T. Shahed and A. B. M. H. Rashid, "Battery charging technologies and standards for electric vehicles: A state-of-the-art review, challenges, and future research prospects," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 5978–5998, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.05.062.

[2] S. Li, J. Ma, X. Zhao, K. Zhang, Z. Jiao, and Q. Xue, "Towards intelligent electric vehicle power batteries and multi-scenario application vehicle operation safety charging strategies: a review," *Sustain. Energy Fuels*, vol. 8, no. 16, pp. 3496–3523, 2024, doi: 10.1039/D4SE00291A.

[3] H. Zhou *et al.*, "Effect of fast charging on degradation and safety characteristics of lithium-ion batteries with LiFePO4 cathodes," *Appl. Energy*, vol. 377, p. 124465, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124465.

[4] R. Xiong, P. Wang, Y. Jia, W. Shen, and F. Sun, "Multi-factor aging in Lithium Iron phosphate batteries: Mechanisms and insights," *Appl. Energy*, vol. 382, p. 125250, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.125250.

[5] J. G. Qu, Z. Y. Jiang, and J. F. Zhang, "Investigation on lithium-ion battery degradation induced by combined effect of current rate and operating temperature during fast charging," *J. Energy Storage*, vol. 52, p. 104811, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104811.

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

[6] Z. Wang, X. Wu, Z. Bai, N. Yang, G. Guo, and O. S. Banjoko, "Enhancing fast charging performance of lithium-ion batteries: The role of operating temperature and charging rate," *Electrochim. Acta*, vol. 511, p. 145390, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.electacta.2024.145390.

[7] M. Usman Tahir, A. Sangwongwanich, D.-I. Stroe, and F. Blaabjerg, "Overview of multi-stage charging strategies for Li-ion batteries," *J. Energy Chem.*, vol. 84, pp. 228–241, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jechem.2023.05.023.

[8] Q.-Y. Huang, Y.-H. Liu, G.-J. Chen, Y.-F. Luo, and C.-L. Liu, "Optimization of the SOC-based multi-stage constant current charging strategy using coyote optimization algorithm," *J. Energy Storage*, vol. 77, p. 109867, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.109867.

[9] M. Zhiani, M. Moslemi, M. Jamali, and H. Gharibi, "Impact of fast-charging protocols and state-of-charge windows on the performance and cycle life of commercial lithium-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 678, p. 239975, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.jpowsour.2026.239975.

[10] A. Laforgue *et al.*, "Comparative investigation of the impact of fast charging at low temperature on commercial Li-ion cells," *J. Power Sources*, vol. 524, p. 231071, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231071.

[11] R. Kim, Y. Kim, D. H. Lee, S. Kim, and D. K. Kim, "Thermal–electrochemical effect on the degradation of lithium-ion batteries during the charging process," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 158, p. 107855, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107855.

[12] W. Wang, Y. Wang, R. Ni, and Z. Xie, "Effects of Fast Charging Modes on Thermal Performance of Lithium-Ion Battery," *Energy Technol.*, vol. 10, no. 11, Nov. 2022, doi: 10.1002/ente.202200415.

[13] D. Meng, X. Wang, W. Hu, C. Zhao, and J. Wang, "Experimental investigation of aging effects on thermal behavior of lithium-ion batteries during charging process," *J. Energy Storage*, vol. 98, p. 113102, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.113102.

[14] M. Scheller, A. Aufschläger, A. Frank, M. Steinhardt, J. Sturm, and A. Jossen, "Experimental Investigation on the Impact of Various Cooling Conditions for Fast Charging Cylindrical Lithium-ion Cells," *J. Energy Storage*, vol. 56, p. 105942, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105942.

[15] A. Khan *et al.*, "A state-of-the-art review on heating and cooling of lithium-ion batteries for electric vehicles," *J. Energy Storage*, vol. 76, p. 109852, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.109852.

[16] F. S. Hwang *et al.*, "Review of battery thermal management systems in electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 192, p. 114171, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114171.

[17] S. Sarkar, M. T. Amin, M. M. El-Halwagi, and F. Khan, "Thermal behavior of LiFePO4 battery at faster C-rates and lower ambient temperatures," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 186, pp. 118–133, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.03.095.

[18] J. Liu, L. Zhou, H. Zhang, K. Zhao, and Z. Wang, "Aging and thermal behavior of lithium-ion battery under high charging current cycling," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 69, p. 104466, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.tsep.2025.104466.

[19] K. Wang, D. Wu, C. Chang, J. Zhang, D. Ouyang, and X. Qian, "Charging rate effect on overcharge-induced thermal runaway characteristics and gas venting

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

behaviors for commercial lithium iron phosphate batteries," *J. Clean. Prod.*, vol. 434, p. 139992, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139992.

[20] M. Jiao *et al.*, "Balancing Charging Efficiency and Thermal Safety: A Comparative Analysis of Multistage Constant Current Charging Protocols," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 63, no. 22, pp. 10054–10066, Jun. 2024, doi: 10.1021/acs.iecr.4c00971.

[21] J. Liu and X. Wang, "Experimental study of the effect of different pulse charging patterns on lithium-ion battery charging," *J. Power Sources*, vol. 610, p. 234700, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.234700.

[22] B. Zhou *et al.*, "Life-extending optimal charging for lithium-ion batteries based on a multi-physics model and model predictive control," *Appl. Energy*, vol. 361, p. 122918, May 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.122918.

[23] X. Su, B. Sun, J. Wang, H. Ruan, W. Zhang, and Y. Bao, "Experimental study on charging energy efficiency of lithium-ion battery under different charging stress," *J. Energy Storage*, vol. 68, p. 107793, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107793.

[24] N. Blasuttigh, H. Beiranvand, T. Pereira, S. Castellan, A. M. Pavan, and M. Liserre, "Charging Strategy for Lithium-Ion Batteries: Theory, Design, and Validation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 39, no. 7, pp. 7890–7900, Jul. 2024, doi: 10.1109/TPEL.2024.3381644.

[25] Y. Kim, "Critical Review of Optimal Control Methods for Li-Ion Batteries in Electric Vehicles," *ChemElectroChem*, vol. 11, no. 3, Feb. 2024, doi: 10.1002/celc.202300497.

[26] H. Nazlıgül, M. M. Savrun, and B. Doğru Mert, "Extreme weather impacts on LiFePO4 batteries: Insights from arrhenius-based analysis and charging techniques," *J. Energy Storage*, vol. 144, p. 119820, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.est.2025.119820.

[27] C. Zhang, J. Jiang, Y. Gao, W. Zhang, Q. Liu, and X. Hu, "Charging optimization in lithium-ion batteries based on temperature rise and charge time," *Appl. Energy*, vol. 194, pp. 569–577, May 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.059.

[28] Y. Liu, L. Zhang, J. Jiang, S. Wei, S. Liu, and W. Zhang, "A Data-Driven Learning-Based Continuous-Time Estimation and Simulation Method for Energy Efficiency and Coulombic Efficiency of Lithium Ion Batteries," *Energies*, vol. 10, no. 5, p. 597, Apr. 2017, doi: 10.3390/en10050597.

[29] P. Keil and A. Jossen, "Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life—An experimental study with different 18650 high-power cells," *J. Energy Storage*, vol. 6, pp. 125–141, May 2016, doi: 10.1016/j.est.2016.02.005.

[30] D. Bernardi, E. Pawlikowski, and J. Newman, "A General Energy Balance for Battery Systems," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 132, no. 1, pp. 5–12, Jan. 1985, doi: 10.1149/1.2113792.

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal