



Kajian Eksperimental Pengaruh Variasi Discharge Rate terhadap Karakteristik Elektrokimia dan Termal Baterai Lithium-Ion Silinder LCO, LFP, NMC, dan NCA

Sumedi^{1*}, Ignatius Rendroyoko², Prasetyo Adi Nugroho³

¹⁻³Program Studi Magister Teknik Elektro, Sekolah Pascasarjana Institut Teknologi Perusahaan Listrik Negara, Indonesia

*Penulis Korespondensi: sumedi2310550@itpln.ac.id

Abstract. *Lithium-ion batteries are a key component of modern energy storage systems, including electric vehicles and renewable energy integration. Nevertheless, their performance is strongly affected by operating conditions, especially the discharge rate. This study aims to evaluate the effect of discharge rate variation (0.5C, 1C, 2C, and 3C) on the electrochemical and thermal characteristics of four commercial cylindrical lithium-ion cell chemistries - LCO, LFP, NMC, and NCA, using a quantitative experimental method with a Neware CE-6002n Battery Testing System and a Hioki LR8450 Memory HiLogger. Test results show that discharge capacity decreased by 2.3–8.9% from 0.5C to 3C, while discharge energy decreased significantly by 14–21% due to reduced working voltage caused by internal resistance. Energy efficiency dropped from a range of 83–94% to 65–80%. Surface temperatures of the NMC and NCA cells exceeded 60°C at a 3C discharge rate, surpassing the safe operating limit, whereas LCO exhibited the lowest ΔT value. Based on the Simple Additive Weighting method applied to seven performance parameters, the overall performance ranking obtained was NMC > LCO > NCA > LFP. The quadratic regression model provided the best representation for capacity, energy, and temperature rise, while the geometric model was most suitable for energy efficiency.*

Keywords: *Discharge Rate; Electrochemical Characteristics; Lithium-Ion Battery; Simple Additive Weighting; Thermal Response.*

Abstrak. Baterai lithium-ion merupakan komponen utama dalam sistem penyimpanan energi modern, termasuk kendaraan listrik dan integrasi energi terbarukan, namun performanya sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi seperti discharge rate. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi discharge rate (0,5C; 1C; 2C; dan 3C) terhadap karakteristik elektrokimia dan termal empat jenis sel baterai lithium-ion silinder komersial, yaitu LCO, LFP, NMC, dan NCA, menggunakan metode eksperimental kuantitatif dengan Battery Testing System Neware CE-6002n dan Hioki LR8450 Memory HiLogger. Hasil pengujian menunjukkan kapasitas discharge menurun 2,3–8,9% dari 0,5C ke 3C, sedangkan energi discharge mengalami penurunan signifikan sebesar 14–21% akibat penurunan tegangan kerja yang disebabkan oleh resistansi internal. Efisiensi energi menurun dari kisaran 83–94% menjadi 65–80%. Temperatur permukaan sel NMC dan NCA melampaui 60 °C pada discharge rate 3C, melebihi batas operasi aman, sedangkan LCO menunjukkan nilai ΔT terendah. Berdasarkan metode Simple Additive Weighting terhadap tujuh parameter performa, diperoleh urutan performa keseluruhan NMC > LCO > NCA > LFP. Model regresi kuadratik memberikan representasi terbaik untuk kapasitas, energi, dan kenaikan temperatur, sedangkan model geometrik paling sesuai untuk efisiensi energi.

Kata Kunci: Baterai Lithium-Ion; *Discharge Rate*; Karakteristik Elektrokimia; Respons Termal; *Simple Additive Weighting*.

1. LATAR BELAKANG

Konsumsi energi terus meningkat seiring pertumbuhan aktivitas ekonomi, industri, dan mobilitas masyarakat, sehingga energi memegang peran penting dalam menunjang pembangunan. Tantangan besar yang dihadapi adalah menemukan sumber energi yang efisien dan berkelanjutan, salah satunya melalui pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT). Namun demikian, pemanfaatan EBT menghadapi tantangan intermitensi, sehingga diperlukan sistem penyimpanan energi yang mampu menjaga kehandalan sistem kelistrikan.

Di antara berbagai teknologi penyimpanan energi, baterai lithium-ion banyak digunakan karena unggul dalam densitas energi, umur pakai, dan efisiensi pengisian daya dibandingkan jenis baterai lain. Baterai lithium-ion kini menjadi penopang utama transisi menuju kendaraan listrik dan integrasi energi terbarukan, dengan kendaraan listrik menyumbang lebih dari seperlima penjualan mobil dunia pada 2024 (International Energy Agency, 2025).

Meskipun unggul, performa baterai lithium-ion dipengaruhi oleh kondisi operasi dan sensitif terhadap suhu tinggi. Salah satu kondisi operasi yang berpengaruh terhadap karakteristik baterai adalah laju pengosongan atau *discharge rate*. Pada saat *discharge rate* meningkat, arus yang dikeluarkan baterai semakin besar, sehingga mempengaruhi kapasitas, performa, dan kenaikan temperatur baterai (Popović et al., 2024; Qu et al., 2022; Schmitt et al., 2023; Wang et al., 2024). Perbedaan karakteristik elektrokimia pada setiap kimia baterai LCO, LFP, NMC, dan NCA menyebabkan respon yang berbeda terhadap variasi *discharge rate* (Evro et al., 2024; Mekdour et al., 2025).

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh laju arus terhadap performa baterai lithium-ion, namun sebagian besar masih bersifat parsial. Schmitt et al. (2023) & Qu et al. (2022) memfokuskan kajian pada sisi pengisian dan mekanisme degradasi, Parschau et al. (2023) menguji pengaruh variasi arus pengisian pada beberapa sel komersial, sedangkan Wang et al. (2024) membatasi objek kajian pada sel terner. Kajian termal oleh Popović et al. (2024) hanya membandingkan dua kimia, yaitu NMC dan LFP, dan Jones et al. (2023) menitikberatkan pada pengukuran temperatur internal sel. Dengan demikian, masih terbatas penelitian yang membandingkan empat kimia katoda komersial sekaligus, yaitu LCO, LFP, NMC, dan NCA, di bawah protokol pengujian *discharge* yang identik, sekaligus mengintegrasikan parameter elektrokimia dan termal ke dalam satu kerangka penilaian komparatif yang terukur.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi *discharge rate* 0,5C; 1C; 2C; dan 3C terhadap kapasitas, energi *discharge*, densitas energi, densitas daya, efisiensi energi, serta retensi kapasitas keempat kimia sel; menganalisis respons termal berupa kenaikan temperatur dan laju kenaikan temperatur pada setiap variasi *discharge rate*; menyusun peringkat performa komparatif antar-kimia menggunakan metode *Simple Additive Weighting* (SAW); dan memodelkan hubungan *discharge rate* terhadap parameter performa melalui pendekatan regresi linier, geometrik, dan kuadratik. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengujian empat kimia sel silinder komersial secara berdampingan dengan protokol dan instrumentasi yang sama, serta pada integrasi hasil pengukuran elektrokimia dan termal ke

dalam satu skor komposit yang dapat dijadikan acuan kuantitatif dalam pemilihan kimia baterai.

2. KAJIAN TEORITIS

Sel baterai lithium-ion bekerja berdasarkan mekanisme interkalasi, yaitu perpindahan ion lithium (Li^+) secara bolak-balik antara elektroda positif (katoda) dan elektroda negatif (anoda) melalui elektrolit, sementara elektron mengalir melalui rangkaian luar. Pada proses charging, ion lithium terlepas dari katoda dan tersisipkan ke dalam struktur anoda berbasis grafit atau komposit silikon-grafit, dan proses sebaliknya terjadi pada saat *discharge* (Mekdour et al., 2025; Tran et al., 2021).

Peningkatan *discharge rate* akan menurunkan kapasitas *discharge* baterai karena tegangan sel lebih cepat mencapai batas minimal atau *cut-off* serta akan menurunkan efisiensi energi dan meningkatkan temperatur sel baterai sehingga perlu dimitigasi agar tidak terjadi *thermal runaway* (Popović et al., 2024; Qu et al., 2022; Schmitt et al., 2023; Wang et al., 2024).

3. METODE PENELITIAN

Sampel dan Spesifikasi Baterai

Pemilihan sampel uji dilakukan melalui kajian literatur untuk memastikan bahwa jenis kimia baterai yang digunakan memiliki relevansi ilmiah, telah banyak digunakan sebagai objek penelitian sebelumnya, serta mewakili karakteristik performa yang berbeda (Mekdour et al., 2025). Berdasarkan kajian tersebut, dipilih empat jenis sel baterai lithium-ion silinder komersial, yaitu LCO kapasitas 2.600 mAh (Samsung ICR18650-26J M) (Jones et al., 2023), dengan spesifikasi mengacu pada datasheet resmi produk (Alldatasheet, n.d.); LFP kapasitas 3.500 mAh (Wintonic IFR26650), diidentifikasi dari nilai tegangan nominal 3,2 V pada spesifikasi produk (Wintonic, n.d.), nilai tersebut yang menjadi ciri khas kimia LFP. NMC kapasitas 3.500 mAh (LG Chem INR18650-MJ1) (Heenan et al., 2020; Li et al., 2019), dengan spesifikasi mengacu pada datasheet produk (Votlt, n.d.). Kemudian NCA kapasitas 3.500 mAh (Samsung INR18650-35E) Jeon et al. (2022); Kuntz et al. (2021); Liu et al. (2024); Parschau et al. (2023), dengan spesifikasi mengacu pada datasheet produk (Samsung SDI, 2015).



Gambar 1. Sampel sel baterai uji LCO, LFP, NMC, dan NCA (kiri ke kanan).

Sumber: Dokumentasi lapangan, 2026.

Spesifikasi teknis keempat sampel disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi sampel uji baterai

Parameter	LCO	LFP	NMC	NCA
Manufaktur	Samsung	Wintonic	LG Chem	Samsung
Tipe	ICR18650-26J M	IFR26650	INR18650-MJ1	INR18650-35E
Kapasitas nominal (mAh)	2.600	3.500	3.500	3.500
Tegangan nominal (V)	3,63	3,2	3,635	3,6
Tegangan maksimal (V)	4,2	3,65	4,2	4,2
Tegangan minimal (V)	2,75	2,3	2,5	2,65
Arus maksimal charging (A)	2,6 (1C)	3,5 (1C)	3,4 (1C)	2
Arus maksimal discharging (A)	5,2 (2C)	7 (2C)	10	8
Temperatur operasi (°C)	-20 – 60	-20 – 50	-20 – 60	-10 – 60
Format sel	18650	26650	18650	18650
Massa nominal (g)	45	84	49	50
Massa aktual terukur (g)*	45,81	80,98	47,10	47,16

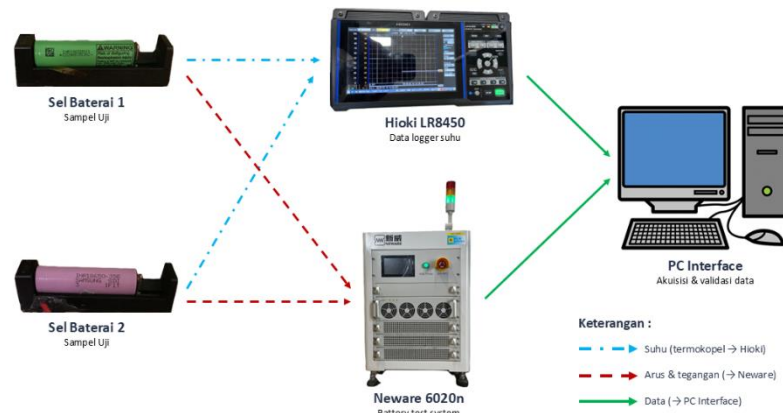
* Massa aktual diukur menggunakan Sartorius Secura 124-1S.

Sumber: Disusun dari datasheet produk (Alldatasheet, n.d.; Wintonic, n.d.; Voltt, n.d.; Samsung SDI, 2015) dan hasil pengukuran, 2026.

Peralatan Pengujian

Pengujian dilaksanakan di Laboratorium PT PLN (Persero) Pusat Pemeliharaan Listrik UP2W III, Bandung, Jawa Barat. Proses charge dan discharge, tegangan, arus, dan kapasitas diukur menggunakan *Battery Testing System* Neware CE-6002n (Neware Technology Ltd., n.d.), sedangkan temperatur permukaan sel dan temperatur ambien diukur menggunakan termokopel yang terpasang pada *casing* baterai dan direkam melalui Hioki LR8450 Memory HiLogger (Hioki E.E. Corporation, 2018). Kedua instrumen mencatat data dengan interval waktu 1 detik, masing-masing diakses melalui aplikasi BTS Client dan Hioki Gennect One (Hioki, 2018). Pengujian dilaksanakan pada temperatur ruang laboratorium tanpa pengondisian

temperatur ambien, tanpa mempertimbangkan faktor kelembapan udara maupun getaran mekanis.



Gambar 2. Skema pengujian sel baterai.

Sumber: Diadaptasi dari skema instrumentasi pengujian, 2026.

Prosedur Charge

Setiap sampel diisi (*charging*) pada laju 1C menggunakan mode *Constant Current Constant Voltage* (CCCV) hingga arus mencapai batas cut-off sebesar C/20. Setelah proses *charging* selesai, sel diistirahatkan (*resting*) selama 1 jam untuk menurunkan temperatur dan menstabilkan tegangan, mengacu pada standar pengujian baterai sekunder bentuk sel prismaatik dan silinder IEC 61960-3:2017 (International Electrotechnical Commission [IEC], 2017).

Prosedur Discharge

Setiap sampel diuji dengan mode *Constant Current* (CC) pada variasi *discharge rate* 0,5C_{awal}; 1C; 2C; 3C; dan 0,5C_{akhir}, hingga tegangan mencapai batas *cut-off* masing-masing kimia, dengan jeda *resting* 1 jam pada setiap pergantian *discharge rate*. Siklus diulang apabila ditemukan data tidak lengkap atau anomali sebelum dilanjutkan ke variasi *discharge rate* berikutnya. Pengujian *discharge* 0,5C di awal dan di akhir rangkaian digunakan khusus untuk menghitung retensi kapasitas dan *capacity loss* setelah sel menjalani seluruh variasi *discharge rate*.

Pengukuran dan Analisis Elektrokimia

Laju arus (C-rate) dinyatakan sebagai perbandingan arus operasi terhadap kapasitas nominal baterai (Bašić, Bobanac, & Pandžić, 2023; Wang et al., 2024):

$$C\text{-rate} = I_{ch/dch} / Q_{nom} \dots \dots \dots (i)$$

Keterangan: C-rate = laju arus (C); $I_{ch/dch}$ = arus charging/discharging (A); Q_{nom} = kapasitas nominal baterai (Ah).

Kapasitas discharge dihitung dari integrasi arus terhadap waktu selama proses discharge (Andrenacci, Pasquali, Vellucci, & Venanzoni, 2024; Nebl, Steger, & Schweiger, 2017):

$$Q_{dch} = (1/3600) \int I_{dch} dt \dots\dots\dots (ii)$$

Keterangan: Qdch = kapasitas discharge (Ah); Idch = arus discharge (A); t = waktu (s).

Energi *discharge* dihitung dari integrasi daya sesaat (hasil kali tegangan dan arus) sepanjang durasi *discharge* (Barcellona & Piegari, 2020; Bašić et al., 2023), dapat juga disederhanakan sebagai perkalian kapasitas dan tegangan kerja rata-rata sel:

$$E_{dch} = (1/3600) \int V_{dch} \cdot I_{dch} dt = Q_{dch} \times V_{dch} \dots\dots\dots (iii)$$

Keterangan: Edch = energi discharge (Wh); Vdch = tegangan discharge (V); Qdch = kapasitas discharge (Ah).

Densitas energi (*Specific Energy*, SE) dan densitas daya (*Specific Power*, SP) dihitung relatif terhadap massa aktual sel (m) untuk memungkinkan perbandingan objektif antar format sel (Beard, 2019):

$$SE = E_{dch} / m \dots\dots\dots (iv)$$

$$SP = P_{avg} / m \dots\dots\dots (v)$$

Keterangan: SE = densitas energi (Wh/kg); SP = densitas daya (W/kg); E_{dch} = energi discharge (Wh); P_{avg} = daya rata-rata (W); m = massa aktual sel (kg).

Efisiensi energi (ηE) dihitung sebagai rasio energi *discharge* terhadap energi *charge* (Bašić et al., 2023; Madani et al., 2019):

$$\eta E = (E_{dch} / E_{ch}) \times 100\% \dots\dots\dots (vi)$$

Keterangan: ηE = efisiensi energi (%); Edch = energi *discharge* (Wh); Ech = energi *charge* (Wh).

Kapasitas retensi dan *capacity loss* dihitung dari perbandingan kapasitas 0,5C awal (Q_{awal}) dan 0,5C akhir (Q_{akhir}):

$$\text{Retensi (\%)} = (Q_{akhir} / Q_{awal}) \times 100\% \dots\dots\dots (vii)$$

$$\text{Capacity Loss (\%)} = [(Q_{awal} - Q_{akhir}) / Q_{awal}] \times 100\% \dots\dots\dots (viii)$$

Keterangan: Qawal = kapasitas discharge 0,5C awal pengujian (mAh); Qakhir = kapasitas *discharge* 0,5C akhir pengujian, setelah sel menjalani seluruh variasi *discharge rate* (mAh).

Pengukuran dan Analisis Respon Termal

Respons termal dievaluasi melalui kenaikan temperatur (ΔT) dan laju kenaikan temperatur (*Rate of Temperature Rise*, RTR) selama proses *discharge*:

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\text{awal}} \dots\dots\dots (\text{ix})$$

$$\text{RTR} = \Delta T / t_{\text{dch}} \dots\dots\dots (\text{x})$$

Keterangan: ΔT = kenaikan temperatur ($^{\circ}\text{C}$); $T_{\max}$ = temperatur maksimum permukaan sel selama *discharge* ($^{\circ}\text{C}$); T_{awal} = temperatur awal sebelum *discharge* ($^{\circ}\text{C}$); RTR = laju kenaikan temperatur ($^{\circ}\text{C}/\text{menit}$); t_{dch} = durasi *discharge* (menit).

Analisis Komparatif dan Pemodelan Regresi

Perbandingan performa antar-kimia baterai dilakukan menggunakan metode Simple Additive Weighting (SAW), salah satu metode Multi-Criteria Decision Making (MCDM), yang mengintegrasikan tujuh parameter hasil pengujian yaitu kapasitas (Q), energi discharge (E), efisiensi energi (ηE), retensi kapasitas, densitas energi (SE), densitas daya (SP), dan respons termal (ΔT) kedalam satu skor komposit dengan kontribusi bobot setara pada setiap parameter (Vafaei, Ribeiro, & Camarinha-Matos, 2022). Setiap parameter dinormalisasi ke rentang 0–1 menggunakan metode min-max scaling. Untuk parameter kategori benefit (semakin besar semakin baik):

$$n_{ij}^{+} = (r_{ij} - r_{\min}) / (r_{\max} - r_{\min}) \dots\dots\dots (\text{xi})$$

Untuk parameter kategori *cost* (kenaikan temperatur ΔT , semakin kecil semakin baik):

$$n_{ij}^{-} = (r_{\max} - r_{ij}) / (r_{\max} - r_{\min}) \dots\dots\dots (\text{xii})$$

Keterangan: n_{ij} = nilai normalisasi parameter ke-j pada alternatif (kimia baterai) ke-i; r_{ij} = nilai aktual parameter ke-j pada alternatif ke-i; $r_{\min}$, $r_{\max}$ = nilai minimum dan maksimum parameter tersebut di antara seluruh alternatif yang dibandingkan.

Hubungan antara discharge rate dan parameter performa dimodelkan menggunakan tiga bentuk regresi yaitu linier, geometrik (power), dan kuadratik dengan metode Ordinary Least Squares (OLS) (Chen & Chen, 2022):

$$y = ax + b \text{ (linier)} \dots\dots\dots (\text{xiv})$$

$$y = ax^b \text{ (geometrik)} \dots\dots\dots (\text{xv})$$

$$y = ax^2 + bx + c \text{ (kuadratik)} \dots\dots\dots (\text{xvi})$$

Keterangan: y = variabel terikat (parameter performa: kapasitas, energi discharge, efisiensi energi, atau kenaikan temperatur); x = variabel bebas (*discharge rate*); a , b , c = koefisien regresi hasil pendugaan Ordinary Least Squares.

dengan discharge rate (0,5C; 1C; 2C; 3C) sebagai variabel bebas, dan kapasitas, energi discharge, efisiensi energi, serta kenaikan temperatur sebagai variabel terikat. Kesesuaian setiap model dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R^2) dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE), dengan model terbaik dipilih berdasarkan nilai R^2 tertinggi dan MAPE terendah (Chicco, Warrens, & Jurman, 2021).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 2 menyajikan rekapitulasi kuantitatif seluruh parameter elektrokimia dan termal keempat kimia baterai pada setiap variasi *discharge rate*, bersumber langsung dari hasil pengujian Neware CE-6002n dan Hioki LR8450, yang menjadi dasar seluruh pembahasan pada bagian ini.

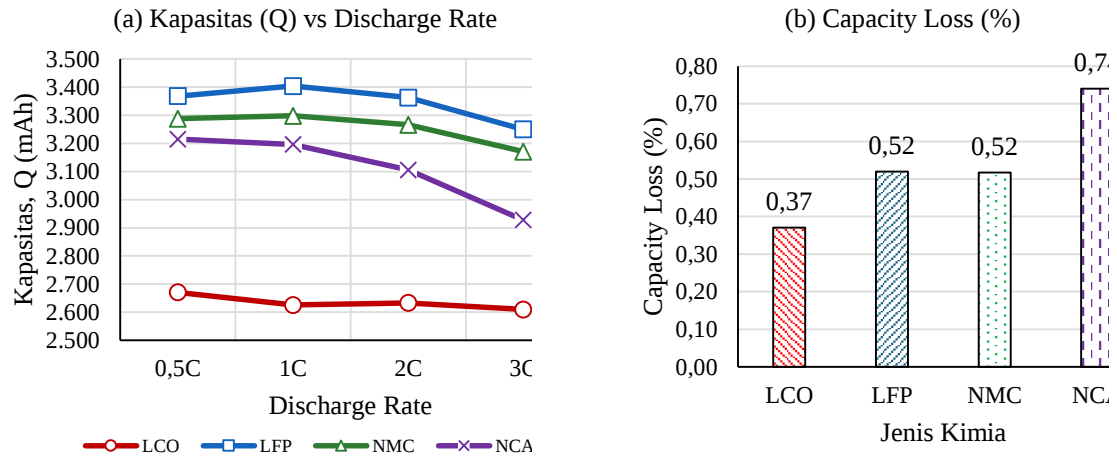
Tabel 2. Performa elektrokimia dan termal baterai LCO, LFP, NMC, dan NCA pada variasi *discharge rate*.

Kimia Sel	Discharge rate	Q (mAh)	Retensi (%)	E (Wh)	SE (Wh/kg)	SP (W/kg)	ηE (%)	Tmax (°C)
LCO	0,5C	2.670,3	99,63	9,48	206,88	101,04	93,97	24,9
	1C	2.625,3		8,97	195,74	194,17	86,31	29,1
	2C	2.632,8		8,50	185,58	366,88	83,02	40,4
	3C	2.609,5		8,18	178,62	534,51	79,68	51,2
LFP	0,5C	3.368,1	99,48	10,07	124,36	64,52	83,26	28,2
	1C	3.403,5		9,81	121,20	124,55	74,24	37,4
	2C	3.362,6		9,11	112,44	234,12	69,96	50,3
	3C	3.249,8		8,30	102,45	331,09	65,34	60,9
NMC	0,5C	3.287,9	99,48	11,71	248,57	132,63	93,77	31,0
	1C	3.297,9		11,39	241,83	256,96	87,19	37,8
	2C	3.265,8		10,72	227,68	488,47	82,69	55,1
	3C	3.170,7		9,96	211,54	701,24	77,71	72,3
NCA	0,5C	3.214,6	99,26	11,40	241,74	131,40	93,67	27,7
	1C	3.196,1		10,95	232,29	254,25	82,20	34,5
	2C	3.105,4		10,07	213,45	481,16	76,66	52,6
	3C	2.927,6		9,05	191,88	688,01	70,94	72,8

Sumber: Hasil pengolahan data pengujian menggunakan Microsoft Excel, 2026.

Kapasitas Discharge, Retensi, dan Capacity Loss

Kapasitas discharge keempat kimia baterai tetap mendekati kapasitas nominalnya pada seluruh variasi discharge rate. LFP dan NMC memiliki kapasitas tertinggi (mendekati 3.500 mAh), sedangkan LCO terendah (sekitar 2.600 mAh), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3(a). Kapasitas keempat kimia relatif sama terhadap kenaikan discharge rate, namun dengan tingkat degradasi yang berbeda. Antara 0,5C dan 3C, LCO mengalami penurunan paling kecil (sekitar 2,3%), diikuti LFP dan NMC (3,5–3,6%), sedangkan NCA mengalami penurunan paling besar (sekitar 8,9%). Penurunan kapasitas ini terjadi karena polarisasi membuat sel lebih cepat mencapai tegangan cut-off sebelum seluruh muatan listrik dapat dikeluarkan (Schmitt et al., 2023; Wang et al., 2024). Penyusutan NCA yang paling signifikan sesuai dengan kajian Qu et al. mengenai degradasi katoda nickel-rich akibat pembebanan arus besar (Qu et al., 2022).



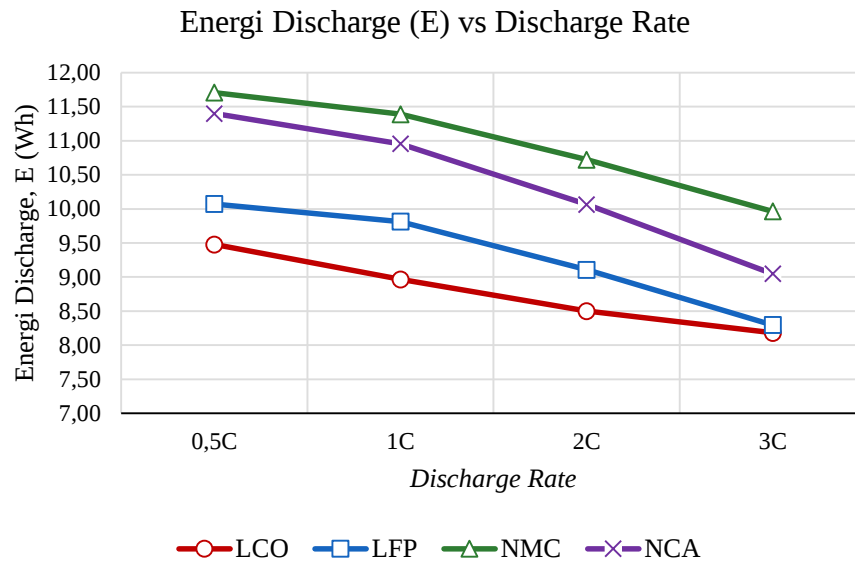
Gambar 3. (a) Kapasitas *discharge* vs *discharge rate*; (b) *Capacity loss*.

Sumber: Hasil pengolahan data pengujian menggunakan Microsoft Excel, 2026

Seluruh sel menunjukkan retensi kapasitas di atas 99% setelah rangkaian pengujian *discharge rate*, sebagaimana diharapkan karena pengujian hanya mencakup satu rangkaian siklus *discharge rate*, bukan pengujian *aging* jangka panjang (Gambar 3b). *Capacity loss* terendah dimiliki LCO (0,37%), disusul NMC dan LFP yang hampir setara (0,52%), sedangkan NCA terbesar (0,74%). Karena cakupan pengujian terbatas pada satu rangkaian *discharge rate*, hasil ini baru mengindikasikan kecenderungan awal dan belum dapat memprediksi laju degradasi jangka panjang tiap kimia baterai.

Energi Discharge

Energi discharge dihitung dari integrasi daya sepanjang proses discharge, sehingga turut memperhitungkan tegangan kerja sel dan mencerminkan kerja total yang dihasilkannya. Karena itu, parameter ini dinilai lebih representatif daripada kapasitas dalam menggambarkan performa baterai (Tran et al., 2021). NMC menghasilkan energi discharge tertinggi pada seluruh discharge rate, disusul NCA, LFP, dan LCO terendah (Gambar 4). Berbeda dengan kapasitas, energi discharge menurun lebih signifikan terhadap kenaikan discharge rate, karena besaran energi merupakan perkalian antara kapasitas dan tegangan kerja, sementara tegangan kerja itu sendiri ikut menurun akibat meningkatnya resistansi internal sel saat dialiri arus besar (Wang et al., 2024). Antara 0,5C dan 3C, LCO masih menyimpan energi tertinggi (86,3% dari energi awalnya), disusul NMC (85,1%), LFP (82,4%), dan NCA (79,4%). LFP kehilangan energi lebih besar daripada NMC meskipun penyusutan kapasitasnya lebih kecil; hal ini disebabkan oleh plateau tegangan LFP yang rendah, sesuai dengan Evro et al. (2024).

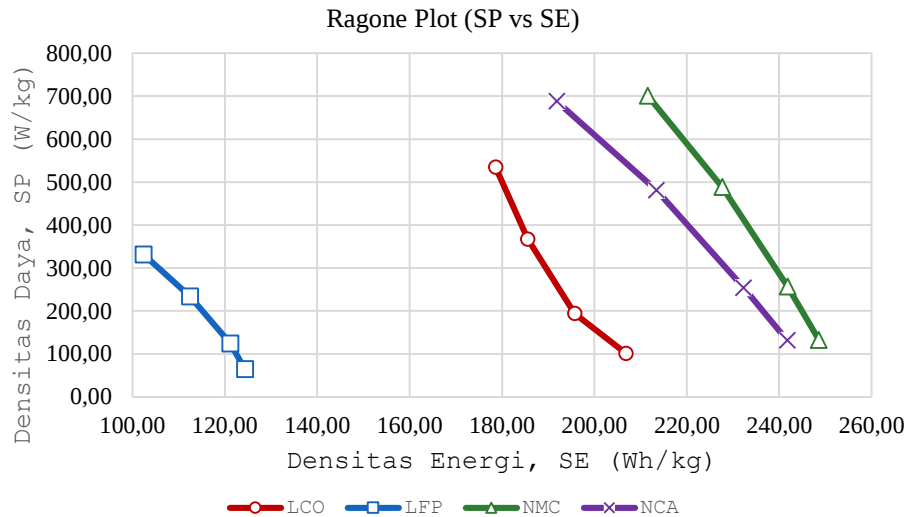


Gambar 4. Energi discharge vs discharge rate,

Sumber: Hasil pengolahan data pengujian menggunakan Microsoft Excel, 2026,

Densitas Energi dan Densitas Daya (Ragone Plot)

Densitas energi (SE) dan densitas daya (SP) dihitung relatif terhadap massa sel sehingga memungkinkan perbandingan yang objektif antar sel dengan format berbeda, khususnya LFP berformat 26650 terhadap ketiga sel 18650 lainnya. Nilai SE keempat kimia menurun berbanding terbalik dengan kenaikan discharge rate, dengan NMC tertinggi (248,57 Wh/kg pada 0,5C hingga 211,54 Wh/kg pada 3C). NCA yang semula unggul pada discharge rate rendah mengalami penurunan lebih cepat (20,6%) sehingga tergeser ke posisi ketiga setelah LCO pada discharge rate tinggi, dengan LFP di posisi SE terendah (124,36–102,45 Wh/kg). Sebaliknya, SP keempat kimia meningkat konsisten terhadap kenaikan discharge rate, dengan NMC tertinggi (hingga 701,24 W/kg pada 3C), disusul NCA, LCO, dan LFP terendah (331,09 W/kg). Posisi LFP yang terendah pada SE maupun SP menunjukkan performa energi dan dayanya berada di bawah ketiga kimia lainnya, meskipun LFP menawarkan keunggulan stabilitas termal sehingga lebih sesuai untuk aplikasi yang mengutamakan aspek keselamatan (Mekdour et al., 2025).



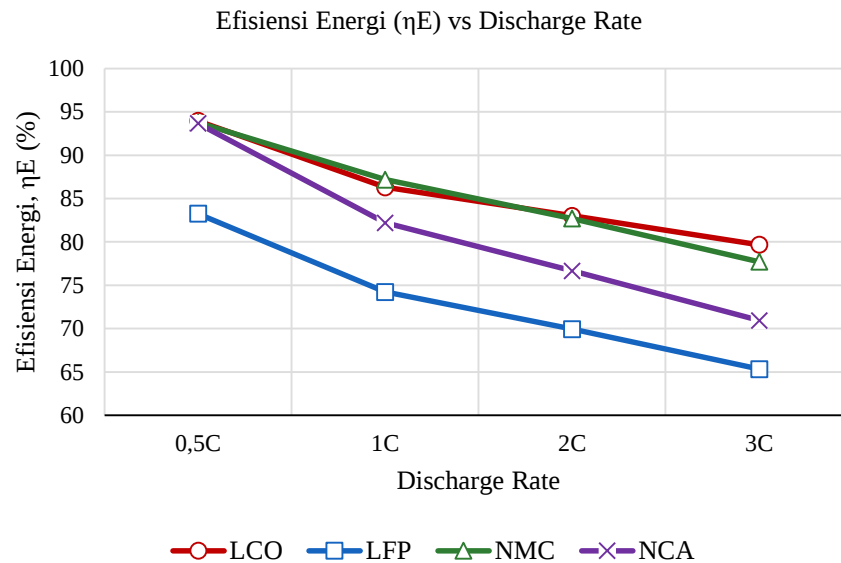
Gambar 5. Ragone plot (SE vs SP).

Sumber: Hasil pengolahan data pengujian menggunakan Microsoft Excel, 2026.

Ragone plot pada Gambar 5 menunjukkan bahwa titik-titik NMC berada paling dekat dengan sudut kanan atas grafik, menunjukkan kombinasi densitas energi dan daya terbaik di antara seluruh kimia yang diuji, sedangkan LFP berada paling dekat dengan sudut kiri bawah, mengindikasikan performa energi dan daya paling rendah. Pola ini didukung oleh kajian komparatif Tran et al. (2021) yang menempatkan kimia berbasis nikel lebih unggul pada Ragone plot dibandingkan LFP. Dengan demikian, ditinjau dari densitas energi dan daya secara bersamaan, NMC merupakan kimia paling unggul di antara keempat kimia yang diuji.

Efisiensi Energi

Efisiensi energi (η_E) menyatakan perbandingan energi discharge terhadap energi charge dan menjadi indikator seberapa efektif energi yang tersimpan dapat dimanfaatkan kembali pada kondisi pembebanan tertentu. Efisiensi energi menurun konsisten terhadap kenaikan discharge rate pada seluruh kimia baterai (Gambar 6), berkaitan dengan meningkatnya rugi-rugi tegangan internal pada discharge rate tinggi. Pada 1C, efisiensi tertinggi dicapai NMC (87,19%), disusul LCO (86,31%), NCA (82,20%), dan LFP (74,24%); pada 3C urutan berubah, LCO menjadi tertinggi (79,68%), disusul NMC (77,71%), NCA (70,94%), dan LFP tetap terendah (65,34%). Perubahan urutan antar variasi discharge rate ini menunjukkan bahwa hubungan efisiensi energi terhadap discharge rate tidak selalu linier dan bergantung pada karakteristik resistansi internal tiap kimia. LFP memiliki efisiensi terkecil karena tegangan nominalnya yang paling rendah di antara keempat kimia lainnya (Evro et al., 2024).

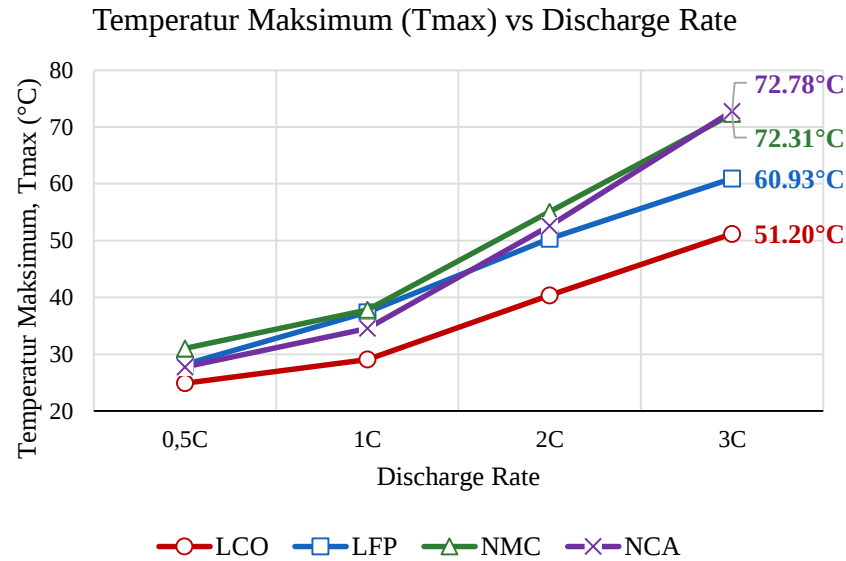


Gambar 6. Efisiensi energi (η_E) vs *discharge rate* keempat kimia baterai.

Sumber: Hasil pengolahan data pengujian menggunakan Microsoft Excel, 2026.

Respon Termal

Kenaikan temperatur (ΔT) meningkat tajam dan non-linier seiring discharge rate pada seluruh kimia (Gambar 7a), karena pembentukan panas sebanding dengan kuadrat arus melalui rugi-rugi ohmik, ditambah komponen kalor entropik dan polarisasi yang membesar pada arus tinggi. Pada 3C, ΔT LCO sebesar 31,6°C; LFP 36,4°C; NMC 48,0°C; dan NCA 52,8°C, dengan temperatur permukaan maksimum NMC (72,3°C) dan NCA (72,8°C) melebihi batas temperatur operasi aman sebesar 60°C. Urutan respons termal ini berbeda dari ekspektasi literatur stabilitas termal yang menempatkan LFP sebagai kimia paling stabil (Mekdour et al., 2025); stabilitas terhadap thermal runaway pada kondisi ekstrem (abuse) berbeda dengan kenaikan temperatur operasional pada discharge normal. Sebagaimana hasil kajian Popović et al. (2024), kenaikan temperatur permukaan sel sebanding dengan kenaikan discharge rate.. Oleh karena itu, pada discharge rate tinggi, NMC dan NCA memerlukan manajemen termal yang lebih efektif dibandingkan LCO dan LFP untuk menjaga temperatur operasi tetap berada dalam batas aman.



Gambar 7. ΔT vs discharge rate.

Sumber: Hasil pengolahan data pengujian menggunakan Microsoft Excel, 2026.

Skor Performa Komparatif (SAW)

Untuk mengintegrasikan ketujuh parameter performa ke dalam satu indikator komparatif, dilakukan penilaian menggunakan metode Simple Additive Weighting (SAW) (Vafaei et al., 2022), dengan hasil ditunjukkan pada Tabel 3 dan divisualisasikan pada radar Gambar 8.

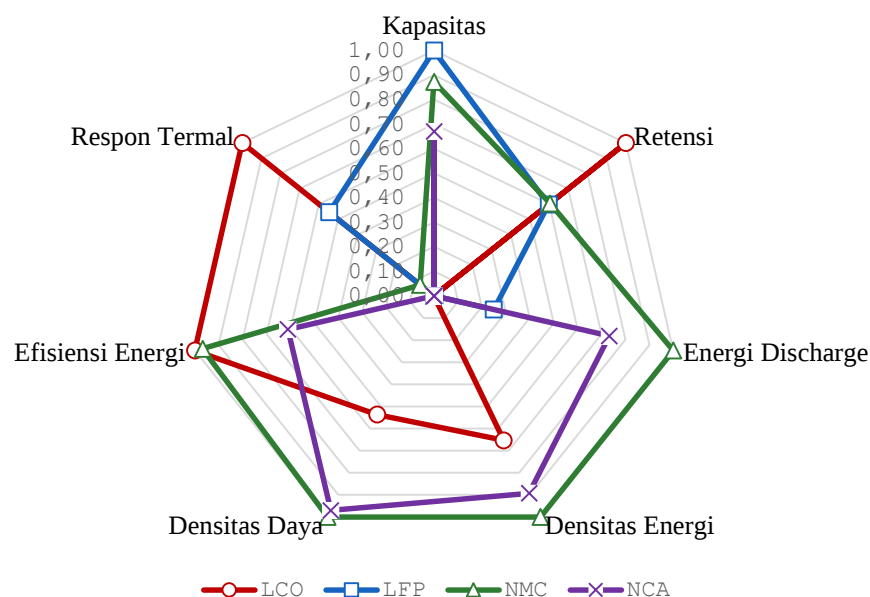
Tabel 3. Skor karakteristik elektrokimia dan termal menggunakan metode SAW.

Parameter	LCO	LFP	NMC	NCA
Kapasitas	0,00	1,00	0,87	0,67
Retensi	1,00	0,60	0,60	0,00
Energi discharge	0,00	0,25	1,00	0,73
Densitas energi	0,65	0,00	1,00	0,89
Densitas daya	0,54	0,00	1,00	0,97
Efisiensi energi	1,00	0,00	0,97	0,61
Respon termal	1,00	0,55	0,07	0,00
Total skor	4,19	2,39	5,52	3,88

Sumber: Hasil pengolahan data pengujian menggunakan Microsoft Excel, 2026.

Berdasarkan skor metode SAW pada Tabel 3, NMC memperoleh skor total tertinggi (5,52 dari maksimum 7,00), dengan kontribusi terbesar berasal dari densitas energi, densitas daya, dan energi discharge (masing-masing 1,00), meskipun skor respon termalnya rendah (0,07). LCO menempati peringkat kedua (4,19), dengan kontribusi utama dari retensi kapasitas, efisiensi energi, dan respon termal (masing-masing 1,00), namun terendah pada kapasitas dan energi discharge (0,00). NCA memperoleh skor 3,88, relatif merata pada sebagian besar parameter namun terendah pada retensi kapasitas dan respons termal (masing-masing 0,00), menghasilkan pola radar yang relatif seimbang tanpa dominasi pada parameter tertentu. LFP memperoleh skor terendah (2,39); meskipun mencapai nilai maksimum pada kapasitas (1,00),

rendahnya nilai pada densitas energi, densitas daya, dan efisiensi energi (masing-masing 0,00) membuat area radarnya paling kecil secara keseluruhan. Urutan performa keseluruhan NMC > LCO > NCA > LFP ini sesuai dengan karakteristik umum material katoda pada literatur terdahulu (Mekdour et al., 2025; Tran et al., 2021), dan memberikan acuan kuantitatif bagi pemilihan kimia baterai: NMC untuk aplikasi berorientasi densitas energi/daya, LCO untuk aplikasi yang mengutamakan stabilitas termal dan retensi, sedangkan LFP lebih sesuai ketika faktor keselamatan menjadi prioritas utama di luar ketujuh parameter performa yang dinilai di sini.



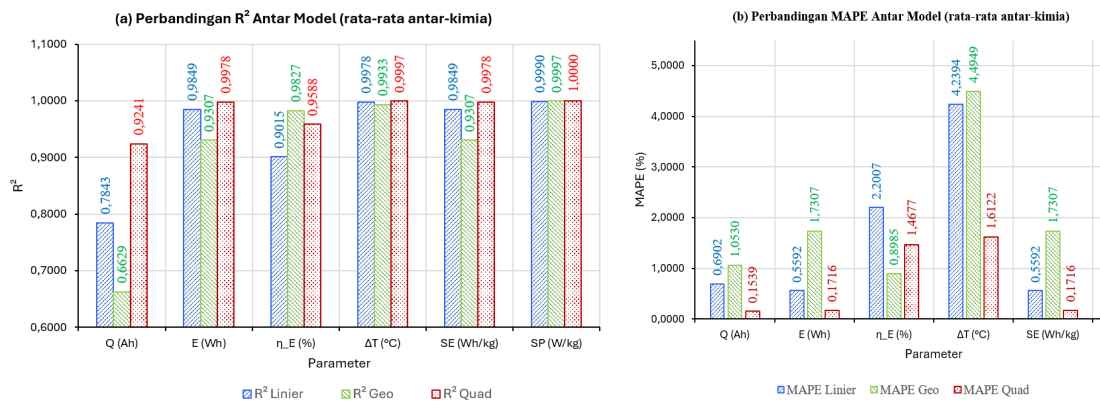
Gambar 8. Radar skor performa sel baterai menggunakan metode SAW.

Sumber: Hasil pengolahan data pengujian menggunakan Microsoft Excel, 2026.

Pemodelan Regresi

Hubungan antara discharge rate dan parameter performa dievaluasi menggunakan model linier, geometrik, dan kuadratik, dengan kesesuaian dinilai melalui R^2 dan MAPE (Chen & Chen, 2022; Chicco et al., 2021). Pada parameter kapasitas (Q), model kuadratik memberikan kesesuaian terbaik untuk LFP, NMC, dan NCA ($R^2 > 0,989$; MAPE < 0,16%), sedangkan untuk LCO model geometrik lebih representatif ($R^2 = 0,768$). Pada energi discharge (E) dan densitas energi (SE), ketiga model menghasilkan R^2 tinggi ($>0,89$), dengan model kuadratik memberikan MAPE terendah. Pada efisiensi energi (ηE), model geometrik konsisten terbaik untuk seluruh kimia (R^2 0,975–0,985). Pada kenaikan temperatur (ΔT), seluruh model mencapai R^2 di atas 0,987, dengan model kuadratik paling akurat untuk sebagian besar kimia, meskipun nilai MAPE relatif lebih besar dibandingkan parameter lain (hingga 6,93% pada

model linier LFP), mengindikasikan variabilitas respon termal yang lebih kompleks dibandingkan parameter elektrokimia. Secara keseluruhan, dominasi model kuadratik dan geometrik dibandingkan model linier menegaskan bahwa hubungan antara discharge rate dan performa baterai lithium-ion bersifat non-linier, konsisten dengan mekanisme polarisasi dan resistansi internal yang meningkat secara tidak proporsional pada arus tinggi (Wang et al., 2024).



Gambar 9. Perbandingan rata-rata (a) R² dan (b) MAPE tiga model regresi (linier, geometrik, kuadratik).

Sumber: Hasil pengolahan data pengujian menggunakan Microsoft Excel, 2026.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Studi eksperimental komparatif ini menunjukkan bahwa variasi discharge rate (0,5C–3C) memengaruhi keempat kimia baterai lithium-ion silinder komersial secara tidak seragam. Kapasitas discharge relatif stabil (penurunan 2,3–8,9%), sedangkan energi discharge menurun lebih signifikan (14–21%) akibat penurunan tegangan kerja pada arus tinggi, menegaskan energi sebagai indikator performa yang lebih sensitif dibandingkan kapasitas. Efisiensi energi menurun dari kisaran 83–94% menjadi 65–80%, dan respon termal meningkat non-linier hingga melampaui batas operasi aman 60°C pada NMC (72,3°C) dan NCA (72,8°C) pada 3C. Evaluasi melalui metode Simple Additive Weighting menghasilkan urutan performa keseluruhan NMC > LCO > NCA > LFP, sedangkan pemodelan regresi menunjukkan bahwa hubungan discharge rate terhadap performa sel baterai bersifat non-linier, direpresentasikan terbaik oleh model kuadratik untuk kapasitas, energi, dan kenaikan temperatur, serta model geometrik untuk efisiensi energi.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada cakupan pengujian yang hanya mencakup satu rangkaian variasi discharge rate tanpa pengujian aging jangka panjang. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas cakupan pengujian *aging* siklus dan kalender dengan jumlah sampel yang lebih banyak per kimia baterai, mengkaji pengaruh temperatur ambien dan kelembapan secara terkontrol.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT PLN (Persero) Pusat Pemeliharaan Listrik UP2W III, Bandung, atas dukungan fasilitas laboratorium dan instrumen pengujian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Ignatius Rendroyoko atas arahan dan bimbingannya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR REFERENSI

- Alldatasheet. (n.d.). *ICR18650-26J datasheet*. Samsung SDI. Retrieved May 2, 2026, from <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/download/1492276/SAMSUNG/ICR18650-26J.html>
- Andrenacci, N., Pasquali, M., Vellucci, F., & Venanzoni, A. (2024). Estimation procedure for the degradation of a lithium-ion battery pack. *Batteries*, 10(7), Article 234. <https://doi.org/10.3390/batteries10070234>
- Barcellona, S., & Piegari, L. (2020). Effect of current on cycle aging of lithium ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 29, Article 101310. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101310>
- Bašić, H., Bobanac, V., & Pandžić, H. (2023). Determination of lithium-ion battery capacity for practical applications. *Batteries*, 9(9), Article 459. <https://doi.org/10.3390/batteries9090459>
- Beard, K. W. (Ed.). (2019). *Linden's handbook of batteries* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Chen, H. Y., & Chen, C. (2022). Evaluation of calibration equations by using regression analysis: An example of chemical analysis. *Sensors*, 22(2), Article 447. <https://doi.org/10.3390/s22020447>
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE, and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, Article e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
- Evro, S., Ajumobi, A., Mayon, D., & Tomomewo, O. S. (2024). Navigating battery choices: A comparative study of lithium iron phosphate and nickel manganese cobalt battery technologies. *Future Batteries*, 4, Article 100007. <https://doi.org/10.1016/j.fub.2024.100007>
- Heenan, T. M. M., et al. (2020). An advanced microstructural and electrochemical datasheet on 18650 Li-ion batteries with nickel-rich NMC811 cathodes and graphite-silicon

- anodes. *Journal of the Electrochemical Society*, 167(14), Article 140530. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abc4c1>
- Hioki E.E. Corporation. (2018). *GENNECT One user's manual* (Rev. 22).
- International Electrotechnical Commission. (2017). *IEC 61960-3:2017: Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes—Part 3: Prismatic and cylindrical lithium secondary cells and batteries made from them*. IEC.
- International Energy Agency. (2025). *Global EV outlook 2025: Expanding sales in diverse markets*. IEA.
- Jeon, M., Lee, E., Park, H., Yoon, H., & Keel, S. (2022). Effect of thermal abuse conditions on thermal runaway of NCA 18650 cylindrical lithium-ion battery. *Batteries*, 8(10), Article 196. <https://doi.org/10.3390/batteries8100196>
- Jones, C. M., Sudarshan, M., García, R. E., & Tomar, V. (2023). Direct measurement of internal temperatures of commercially-available 18650 lithium-ion batteries. *Scientific Reports*, 13(1), Article 14580. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41718-w>
- Kuntz, P., et al. (2021). Identification of degradation mechanisms by post-mortem analysis for high power and high energy commercial Li-ion cells after electric vehicle aging. *Batteries*, 7(3), Article 48. <https://doi.org/10.3390/batteries7030048>
- Li, X., et al. (2019). Degradation mechanisms of high capacity 18650 cells containing Si-graphite anode and nickel-rich NMC cathode. *Electrochimica Acta*, 297, 1109–1120. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.11.194>
- Liu, Y., Zhang, L., Huang, X., Hao, M., & Huang, X. (2024). Laser-induced thermal runaway dynamics of cylindrical lithium-ion battery. *Journal of Energy Storage*, 86, Article 111337. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111337>
- Madani, S. S., Schaltz, E., & Kær, S. K. (2019). Effect of current rate and prior cycling on the coulombic efficiency of a lithium-ion battery. *Batteries*, 5(3), Article 57. <https://doi.org/10.3390/batteries5030057>
- Mekdour, K., Reddy, A. K. M. R., Dawkins, J. I. G., Selva, T. M. G., & Zaghib, K. (2025). Comparative analysis of cell design: Form factor and electrode architectures in advanced lithium-ion batteries. *Batteries*, 11(12), Article 450. <https://doi.org/10.3390/batteries11120450>
- Nebel, C., Steger, F., & Schweiger, H. G. (2017). Discharge capacity of energy storages as a function of the discharge current—Expanding Peukert's equation. *International Journal of Electrochemical Science*, 12(6), 4940–4957. <https://doi.org/10.20964/2017.06.51>
- Neware Technology Ltd. (n.d.). *Specifications CE-6000 series battery testing system*. <https://www.neware.com.cn>
- Parschau, A., Degler, D., Fill, A., Birke, K. P., & Allmendinger, F. (2023). Cycle tests on the influence of different charging currents—A case study on different commercial, cylindrical lithium-ion cells. *Batteries*, 9(2), Article 83. <https://doi.org/10.3390/batteries9020083>
- Popović, O., Rupar, V., Praštalo, Ž., Aleksandrović, S., & Milisavljević, V. (2024). Testing of NMC and LFP Li-ion cells for surface temperature at various conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 61, Article 104930. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104930>

- Qu, J. G., Jiang, Z. Y., & Zhang, J. F. (2022). Investigation on lithium-ion battery degradation induced by combined effect of current rate and operating temperature during fast charging. *Journal of Energy Storage*, 52, Article 104811. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104811>
- Samsung SDI. (2015). *Specification of product for lithium-ion rechargeable cell, model: INR18650-35E*.
- Schmitt, J., Rehm, M., Karger, A., & Jossen, A. (2023). Capacity and degradation mode estimation for lithium-ion batteries based on partial charging curves at different current rates. *Journal of Energy Storage*, 59, Article 106517. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106517>
- Tran, M. K., Dacosta, A., Mevawalla, A., Panchal, S., & Fowler, M. (2021). Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA. *Batteries*, 7(3), Article 51. <https://doi.org/10.3390/batteries7030051>
- Vafaei, N., Ribeiro, R. A., & Camarinha-Matos, L. M. (2022). Assessing normalization techniques for simple additive weighting method. *Procedia Computer Science*, 199, 1229–1236. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.156>
- Volt. (n.d.). *LG Chem INR18650-MJ1 lithium-ion battery cell datasheet and models*. https://voltt.aboutenergy.io/cell-library/LG-Chem_INR18650-MJ1
- Wang, X., Chen, Y., Chen, L., Liu, S., Zhu, Y., & Deng, Y. (2024). The impact of wide discharge C-rates on the voltage plateau performance of cylindrical ternary lithium-ion batteries. *Energies*, 17(14), Article 3488. <https://doi.org/10.3390/en17143488>
- Wintonic. (n.d.). *IFR26650 3500mAh 3.2V—Product specification*. Retrieved May 2, 2026, from <https://wintonic.com/en/product-44282-53344-183100.html>