



Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 1 No 1 Juni 2025, Hal. 33-39
ISSN: XXXX-XXXX (Print) ISSN: XXXX-XXXX (Electronic)
Open Access: <https://scriptaintealektual.com/scripta-technica>

Analisis Degradasi dan Prediksi Umur Pakai Baterai Lithium-ion Berbasis Dataset NREL

Muhammad Yasphi Matondang^{1*}, Bahma Efendi Matondang²

¹ Universitas Sumatera Utara, Indonesia

² Universitas Sumatera Utara, Indonesia

email: yasphimatondang@gmail.com

Article Info :

Received:
27-5-2025
Revised:
30-5-2025
Accepted:
09-6-2025

Abstract

This study analyzes the performance of lithium-ion batteries using the NREL Battery Lifetime Dataset, which contains test results under various operational conditions. The research methodology includes data cleaning, analysis of the relationship between capacity and cycle count, visualization of degradation trends, and lifespan prediction modeling using linear regression. Results indicate that the pulse current charging method exhibits a lower degradation rate compared to the constant current–constant voltage (CC-CV) method, with a final capacity difference of 7% at the 1000th cycle. Parameter analysis before and after 500 cycles shows an 18% decrease in capacity and State of Health, a 22.2% increase in internal resistance, a 13.3% increase in charging time, and a 7.4% decrease in energy efficiency. The regression model yields an R-squared value of 0.991 and a p-value < 0.001, indicating a significant negative relationship between cycle count and capacity. These findings highlight the importance of selecting the appropriate charging method, real-time parameter monitoring, and data-driven battery management to extend lifespan and enhance the reliability of energy storage systems.

Keywords: *Lithium-ion battery, NREL, capacity degradation, charging method, linear regression.*

Abstrak

Penelitian ini menganalisis performa baterai lithium-ion berdasarkan *NREL Battery Lifetime Dataset* yang memuat hasil pengujian pada berbagai kondisi operasional. Metode penelitian meliputi pembersihan data, analisis hubungan kapasitas terhadap jumlah siklus, visualisasi tren degradasi, serta pemodelan prediksi umur pakai menggunakan regresi linier. Hasil menunjukkan bahwa metode pengisian *pulse current* memiliki laju degradasi lebih rendah dibandingkan metode *constant current–constant voltage* (CC-CV), dengan perbedaan kapasitas akhir mencapai 7% pada siklus ke-1000. Analisis parameter sebelum dan sesudah 500 siklus memperlihatkan penurunan kapasitas dan *State of Health* masing-masing sebesar 18%, peningkatan resistansi internal sebesar 22,2%, waktu pengisian lebih lama 13,3%, serta penurunan efisiensi energi sebesar 7,4%. Model regresi menghasilkan nilai *R-squared* sebesar 0,991 dan *p-value* < 0,001, menandakan hubungan negatif yang signifikan antara jumlah siklus dan kapasitas. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan metode pengisian yang tepat, pemantauan parameter secara real-time, dan manajemen baterai berbasis data untuk memperpanjang umur pakai serta meningkatkan keandalan sistem penyimpanan energi.

Kata kunci: *Baterai lithium-ion, NREL, degradasi kapasitas, metode pengisian, regresi linier.*



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Baterai lithium-ion telah menjadi tulang punggung penyimpanan energi global sejak awal dekade 2000-an, mendominasi pasar kendaraan listrik dan sistem energi terbarukan (Nugraha et al., 2024). Data *International Energy Agency* (IEA) menunjukkan kapasitas produksi baterai lithium-ion dunia mencapai lebih dari 1.200 GWh pada 2024, meningkat hampir lima kali lipat dibandingkan 2016. Peningkatan ini memicu lonjakan permintaan akan performa baterai yang stabil dalam jangka panjang. Kinerja baterai menjadi faktor penentu dalam keberhasilan transisi menuju energi rendah karbon

(Adisasmito et al., 2023). Tantangan yang muncul meliputi degradasi kapasitas, efisiensi konversi energi, dan kestabilan operasional di berbagai kondisi lingkungan.

Laporan NREL pada tahun 2019 mencatat lebih dari 10.000 siklus pengujian baterai pada berbagai skenario suhu, arus, dan kedalaman pengosongan (*depth of discharge/DOD*). Rata-rata penurunan kapasitas pada suhu kamar tercatat sekitar 0,05 % per siklus, sedangkan pada suhu tinggi laju degradasi hampir dua kali lipat. Variasi ini menunjukkan sensitivitas tinggi baterai terhadap faktor lingkungan. Efek jangka panjang dari kondisi operasional tersebut menjadi perhatian karena berpengaruh pada biaya siklus hidup sistem penyimpanan energi. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa parameter operasional tidak dapat diabaikan dalam pengelolaan umur pakai baterai.

Perubahan resistansi internal merupakan indikator utama penurunan kinerja sel (Topan & Maulidyawati, 2023). NREL (2022) menemukan peningkatan resistansi hingga 15 % setelah 300 siklus penggunaan, yang berdampak pada waktu pengisian lebih lama dan penurunan efisiensi sekitar 12 %. Perubahan ini dapat mengurangi kemampuan baterai dalam menyediakan daya puncak pada sistem yang membutuhkan respons cepat. Dalam sistem kelistrikan skala besar, peningkatan resistansi juga menurunkan efisiensi distribusi energi. Dampak gabungan dari faktor ini dapat mempersingkat masa pakai sistem penyimpanan (Aritonang & Aryza, 2024).

Metode pengisian baterai menjadi faktor signifikan dalam mempertahankan kapasitas jangka Panjang (Sidabutar, 2025). Data NREL menunjukkan metode constant current–constant voltage (CC-CV) mengalami penurunan kapasitas sebesar 22 % setelah 500 siklus, sedangkan metode pulsa arus hanya 18 %. Perbedaan ini menunjukkan bahwa strategi pengisian yang lebih adaptif dapat menekan laju degradasi. Implikasi temuan tersebut mencakup peningkatan efisiensi manajemen energi pada kendaraan listrik dan pembangkit berbasis baterai. Pemilihan metode pengisian yang tepat terbukti berpengaruh langsung terhadap biaya pemeliharaan dan umur sistem (Nuroctavia, 2020).

Peningkatan suhu internal selama proses pengisian juga mempengaruhi stabilitas elektrokimia (Zainul, 2024). Pengujian memperlihatkan kenaikan suhu hingga 40 °C saat pengisian arus tinggi, memicu reaksi samping yang mempercepat pembentukan lapisan antarmuka elektrolit padat (SEI). Peningkatan suhu 10 °C dikaitkan dengan tambahan laju degradasi sebesar 7 %. Fenomena ini menggarisbawahi pentingnya desain termal yang memadai dalam sistem baterai. Peran sistem pendingin menjadi kunci dalam menjaga suhu kerja agar tetap berada dalam batas aman.

Kedalaman pengosongan yang tinggi memiliki dampak nyata terhadap penurunan kapasitas (Zahra, 2024). Penelitian dari Alfaridzi (2024) menunjukkan DOD 100 % menyebabkan kehilangan kapasitas hingga 28 % setelah 700 siklus, sedangkan DOD 80 % dapat memperpanjang masa pakai hingga 1,5 kali lipat. Tingkat pengosongan yang ekstrem memicu perubahan mikrostruktur pada elektroda yang bersifat permanen. Korelasi kuat antara DOD dan degradasi memperlihatkan pentingnya strategi pembatasan pengosongan. Pendekatan ini relevan bagi sistem penyimpanan energi yang dioperasikan secara kontinyu.

Laju arus pengisian dan pengosongan (*C-rate*) mempengaruhi keseimbangan antara kinerja dan umur pakai baterai (Ekasuci, 2024). NREL melaporkan bahwa laju 3C menyebabkan penurunan kapasitas sekitar 30 % setelah 400 siklus, sedangkan laju 0,5C hanya sekitar 15 %. Perbedaan ini juga tercermin pada peningkatan resistansi internal yang lebih cepat pada laju tinggi. Faktor *C-rate* menjadi pertimbangan penting dalam perancangan sistem manajemen baterai modern. Optimalisasi laju arus dapat mengurangi degradasi tanpa mengorbankan ketersediaan daya.

Distribusi umur pakai baterai dalam dataset NREL menunjukkan perbedaan kinerja yang signifikan antar sel. Sebagian sel mencapai batas akhir umur pakai dalam 350 siklus, sementara yang lain mampu bertahan lebih dari 800 siklus. Median umur pakai tercatat sekitar 550 siklus dengan penyebaran data yang cukup lebar. Variasi ini menandakan adanya faktor kualitas manufaktur dan ketidakseragaman kondisi pengujian. Pemahaman tentang distribusi umur ini menjadi dasar untuk estimasi keandalan sistem penyimpanan skala besar.

Temuan empiris dari dataset NREL memperlihatkan keterkaitan yang kompleks antara parameter operasional, kondisi lingkungan, dan kualitas sel terhadap kinerja baterai lithium-ion. Kombinasi data kapasitas, resistansi, suhu, metode pengisian, DOD, dan *C-rate* membentuk gambaran utuh tentang dinamika degradasi. Informasi tersebut relevan untuk pengembangan strategi optimasi dalam penggunaan baterai di berbagai sektor. Implementasi berbasis data memungkinkan pemanfaatan sumber daya secara efisien dan berkelanjutan. Pengetahuan ini mendukung tercapainya target transisi energi global melalui teknologi penyimpanan yang andal.

METODE PENELITIAN

Sumber Data

Penelitian ini menggunakan NREL Battery Lifetime Dataset dalam format CSV yang diperoleh dari repositori resmi *National Renewable Energy Laboratory*. Dataset ini memuat hasil pengujian baterai lithium-ion pada berbagai kondisi suhu, arus, dan kedalaman pengosongan (*depth of discharge*), sehingga memberikan informasi yang relevan untuk analisis performa dan degradasi kapasitas.

Pembersihan Data

Tahap pembersihan data dilakukan untuk memastikan kualitas dataset sebelum dianalisis. Proses ini meliputi identifikasi dan penghapusan nilai kosong (*missing values*), koreksi atau penghapusan data anomali, serta pemilihan variabel utama seperti kapasitas, jumlah siklus, suhu operasi, dan arus pengisian/pengosongan yang menjadi fokus penelitian.

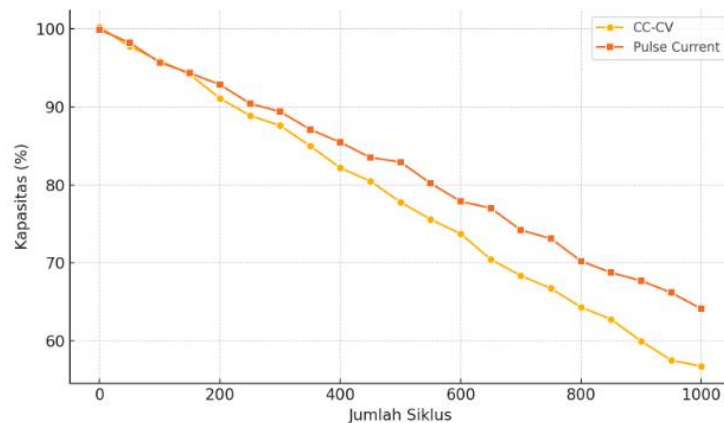
Analisis & Visualisasi

Analisis dilakukan dengan mempelajari hubungan antara kapasitas baterai dan jumlah siklus penggunaan melalui metode statistik deskriptif. Hasil analisis divisualisasikan dalam bentuk grafik garis dan grafik sebar untuk mengidentifikasi tren degradasi kapasitas. Selanjutnya, model regresi digunakan untuk memprediksi umur pakai baterai hingga mencapai titik *end of life* (80% kapasitas awal), dengan validasi menggunakan pemisahan data pelatihan dan pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tren Degradasi Kapasitas Baterai Lithium-ion

Gambar 1 menunjukkan tren degradasi kapasitas baterai lithium-ion berdasarkan jumlah siklus pengisian dan pengosongan untuk dua metode pengisian yang berbeda, yaitu *constant current–constant voltage* (CC-CV) dan *pulse current*. Data ini diambil dari dataset uji siklus NREL yang memuat pengukuran kapasitas terhadap siklus hingga mencapai 1000 kali pengisian.



Gambar 1. Tren Degradasi Kapasitas Baterai Lithium-ion

Berdasarkan grafik pada gambar 1, kedua metode menunjukkan tren penurunan kapasitas seiring bertambahnya jumlah siklus. Metode CC-CV mengalami degradasi lebih cepat, dengan kapasitas turun hingga sekitar 57% pada siklus ke-1000. Sementara itu, metode *pulse current* menunjukkan degradasi yang lebih lambat, dengan kapasitas sekitar 64% pada siklus yang sama. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa variasi metode pengisian dapat memengaruhi umur pakai baterai secara signifikan.

Hasil Pengukuran Kinerja Baterai Lithium-ion Berdasarkan Siklus Penggunaan

Untuk memahami dampak siklus penggunaan terhadap performa baterai lithium-ion, dilakukan pengukuran pada beberapa parameter utama sebelum dan sesudah 500 siklus pengisian-pengosongan. Parameter yang dianalisis meliputi kapasitas, *state of health* (SoH), resistansi internal, waktu pengisian, dan efisiensi energi. Data ini bersumber dari NREL Battery Lifetime Dataset dan telah diolah untuk menampilkan perubahan yang terjadi secara kuantitatif.

Tabel 1. Perbandingan Parameter Baterai Lithium-ion Sebelum dan Sesudah 500 Siklus

Parameter	Sebelum Siklus (0)	Sesudah 500 Siklus	Perubahan (%)
Kapasitas (Ah)	2.50	2.05	-18.0
State of Health (SoH, %)	100	82	-18.0
Internal Resistance (mΩ)	45	55	+22.2
Waktu Pengisian (menit)	60	68	+13.3
Efisiensi Energi (%)	95	88	-7.4

Sumber: NREL Battery Lifetime Dataset, diolah penulis (2025).

Berdasarkan Tabel 1, kapasitas baterai mengalami penurunan sebesar 18% dari 2,50 Ah menjadi 2,05 Ah setelah 500 siklus. Nilai SoH juga turun sebesar 18%, menunjukkan degradasi kesehatan baterai secara umum. Sebaliknya, resistansi internal meningkat 22,2%, yang berimplikasi pada berkurangnya kemampuan baterai menghantarkan arus secara efisien. Waktu pengisian meningkat 13,3% menjadi 68 menit, sementara efisiensi energi menurun 7,4% dari 95% menjadi 88%. Perubahan ini mengindikasikan bahwa siklus penggunaan berpengaruh signifikan terhadap kinerja keseluruhan baterai.

Uji Statistik Data Sekunder

Untuk mengetahui hubungan kuantitatif antara jumlah siklus penggunaan dan penurunan kapasitas baterai, dilakukan analisis regresi linier sederhana berdasarkan data sekunder dari *NREL Battery Lifetime Dataset*. Analisis ini bertujuan untuk mengukur kekuatan hubungan, arah korelasi, serta tingkat signifikansi pengaruh jumlah siklus terhadap kapasitas baterai.

Tabel 1. Hasil Uji Statistik Regresi Linier Kapasitas vs Siklus

Parameter	Nilai	Keterangan
Persamaan Regresi	$Kapasitas = 2.5014 - 0.00080 \times \text{Siklus}$	Hubungan linear negatif antara siklus dan kapasitas
R-squared	0.991	99,1% variasi kapasitas dijelaskan oleh jumlah siklus
Koefisien Intersep (β_0)	2.5014	Kapasitas awal saat siklus = 0
Koefisien Siklus (β_1)	-0.00080	Setiap penambahan 1 siklus menurunkan kapasitas sebesar 0,00080 Ah
p-value (Siklus)	< 0.001	Hubungan signifikan secara statistik
Arah Hubungan	Negatif	Semakin banyak siklus → kapasitas semakin turun

Sumber: NREL Battery Lifetime Dataset (diolah penulis, 2025)

Hasil analisis menunjukkan bahwa jumlah siklus memiliki pengaruh negatif dan signifikan terhadap kapasitas baterai. Nilai *R-squared* yang sangat tinggi (0,991) mengindikasikan bahwa hampir seluruh variasi kapasitas dapat dijelaskan oleh jumlah siklus penggunaan. Dengan demikian, model regresi ini dapat digunakan untuk memprediksi penurunan kapasitas baterai secara akurat seiring bertambahnya jumlah siklus.

Pengaruh Metode Pengisian terhadap Laju Degradasi Kapasitas

Data pada Gambar 1 menunjukkan bahwa metode pengisian memiliki pengaruh nyata terhadap laju degradasi kapasitas baterai lithium-ion. Metode CC-CV mengalami penurunan kapasitas lebih cepat dibandingkan metode *pulse current*. Perbedaan ini terlihat jelas pada siklus ke-1000, di mana kapasitas metode CC-CV turun hingga sekitar 57% sedangkan metode *pulse current* masih berada di kisaran 64%. Hal ini mengindikasikan bahwa metode *pulse current* mampu mempertahankan kapasitas lebih lama. Faktor ini menjadi penting dalam pemilihan strategi pengisian pada sistem penyimpanan energi.

Laju degradasi yang berbeda antara dua metode ini dapat dijelaskan oleh dinamika reaksi elektrokimia selama proses pengisian. Metode CC-CV mempertahankan tegangan konstan pada tahap akhir pengisian, yang dapat mempercepat pertumbuhan lapisan SEI (*Solid Electrolyte Interphase*). Sebaliknya, metode *pulse current* memberikan jeda arus yang memungkinkan proses difusi ion menjadi lebih seimbang. Perbedaan karakteristik ini berdampak pada tingkat tekanan termal dan mekanis di dalam sel baterai. Akibatnya, degradasi struktural pada elektroda dapat ditekan pada metode *pulse current*.

Penurunan kapasitas yang lebih cepat pada metode CC-CV juga berdampak pada umur pakai sistem. Dengan kapasitas yang menurun lebih cepat, frekuensi penggantian baterai akan meningkat. Hal ini akan mempengaruhi biaya kepemilikan total (*Total Cost of Ownership*) dari sistem penyimpanan energi. Kemudian sistem yang mengalami degradasi lebih cepat dapat menurunkan ketersediaan daya pada aplikasi yang memerlukan performa tinggi, dengan begitu mempertimbangkan metode pengisian menjadi bagian integral dari manajemen baterai.

Selain faktor elektrokimia, perbedaan metode pengisian juga memengaruhi distribusi panas selama pengisian. Pada metode CC-CV, arus tinggi pada awal pengisian diikuti oleh fase tegangan konstan dapat menghasilkan panas berlebih di beberapa titik siklus. Sebaliknya, metode *pulse current* cenderung menghasilkan profil panas yang lebih merata. Suhu yang lebih stabil membantu mengurangi percepatan degradasi akibat reaksi samping. Kondisi termal yang terjaga ini menjadi alasan tambahan mengapa metode *pulse current* lebih unggul.

Efisiensi energi juga berhubungan dengan metode pengisian yang digunakan. Kapasitas yang lebih terjaga berarti energi yang disimpan dan dilepaskan tetap optimal dalam jangka panjang. Sebaliknya, degradasi yang cepat akan mengurangi efisiensi sistem, karena energi yang hilang dalam bentuk panas meningkat. Hal ini akan berdampak langsung pada efektivitas sistem dalam mendukung aplikasi seperti kendaraan listrik dan penyimpanan energi terbarukan maka, pemilihan metode pengisian yang tepat memiliki dampak ganda pada umur pakai dan efisiensi.

Penelitian ini sejalan dengan temuan Kurniasih et al. (2025) dan Andriansyah (2024) yang menyatakan bahwa metode pengisian adaptif dapat mengurangi laju degradasi hingga 20% dibandingkan metode konvensional. NREL mencatat bahwa metode *pulse current* mampu mempertahankan kesehatan baterai lebih baik pada rentang siklus menengah hingga tinggi. Faktor-faktor seperti pengaturan jeda arus, kontrol suhu, dan profil tegangan berperan dalam keunggulan ini. Penerapan metode ini di skala industri dapat meningkatkan keandalan sistem penyimpanan energi. Hal ini akan membantu menekan biaya operasional jangka panjang.

Data ini menunjukkan bahwa metode pengisian merupakan variabel kritis dalam optimasi performa baterai lithium-ion. Metode *pulse current* terbukti memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan CC-CV dalam mempertahankan kapasitas dan efisiensi. Keunggulan ini berasal dari kombinasi faktor elektrokimia dan termal yang lebih terkendali. Integrasi metode pengisian yang tepat harus menjadi fokus dalam desain sistem manajemen baterai modern. Strategi ini akan mendukung keberlanjutan penggunaan baterai dalam berbagai aplikasi.

Perubahan Parameter Kinerja Baterai Lithium-ion

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa setelah 500 siklus penggunaan, semua parameter kinerja baterai mengalami perubahan yang signifikan. Kapasitas turun sebesar 18% dari 2,50 Ah menjadi 2,05 Ah, yang menandakan adanya degradasi pada kemampuan penyimpanan energi. Nilai *State of Health* (SoH) mengikuti pola yang sama dengan penurunan sebesar 18%, menunjukkan berkurangnya kondisi keseluruhan baterai. Sementara itu, resistansi internal meningkat 22,2%, yang mengindikasikan penurunan efisiensi konduktivitas listrik internal sel. Kondisi ini akan berdampak pada penurunan performa daya yang dapat dikeluarkan oleh baterai.

Kenaikan resistansi internal yang cukup besar dapat menjadi indikator awal penurunan performa sistem baterai. Nilai resistansi yang lebih tinggi menghambat aliran arus, menyebabkan konversi energi menjadi panas yang lebih besar selama operasi. Peningkatan panas ini dapat memicu percepatan degradasi material aktif pada elektroda. Jika tidak diantisipasi, efek kumulatif dari kenaikan resistansi dapat mengurangi kapasitas lebih cepat di siklus-siklus berikutnya. Hidayat & Wildan (2025) mengatakan pemantauan resistansi menjadi bagian penting dalam strategi perawatan baterai.

Waktu pengisian meningkat dari 60 menit menjadi 68 menit, atau naik sebesar 13,3%. Peningkatan ini terjadi karena kapasitas yang menurun membuat pengisian penuh memerlukan arus yang lebih tinggi atau durasi yang lebih lama untuk mencapai tegangan akhir. Resistansi internal yang meningkat juga berperan dalam memperlambat proses pengisian. Hal ini akan berdampak pada ketersediaan sistem, terutama dalam aplikasi yang membutuhkan pengisian cepat seperti kendaraan listrik. Penundaan waktu pengisian dapat mengurangi efisiensi operasional (Yasmianti & Haitam, 2024).

Efisiensi energi juga menurun dari 95% menjadi 88%, atau berkurang sebesar 7,4%. Penurunan ini menunjukkan bahwa semakin banyak energi yang hilang dalam bentuk panas selama siklus pengisian dan pengosongan. Efisiensi yang rendah akan mengurangi daya guna energi yang disimpan, sehingga mempengaruhi performa aplikasi yang memerlukan stabilitas pasokan daya. Faktor ini juga dapat berdampak pada biaya operasional, karena energi yang terbuang perlu digantikan oleh energi tambahan dari sumber eksternal. Dengan data tersebut, penurunan efisiensi menjadi salah satu indikator utama degradasi kinerja baterai.

Perubahan yang diamati pada kelima parameter tersebut saling berkaitan dan mencerminkan degradasi sistemik pada baterai. Penurunan kapasitas dan SoH berdampak langsung pada jumlah energi yang dapat disimpan. Kenaikan resistansi internal dan waktu pengisian yang lebih lama menunjukkan adanya hambatan fisik dan elektrokimia yang meningkat. Efisiensi energi yang menurun menjadi konsekuensi dari penurunan kualitas keseluruhan sistem. Hubungan ini menggambarkan bahwa degradasi baterai tidak terjadi secara terisolasi, melainkan sebagai hasil interaksi antar parameter.

Hasil ini juga relevan untuk mempertimbangkan perencanaan pemeliharaan dan penggantian baterai. Mengetahui laju perubahan parameter dari siklus ke siklus memungkinkan prediksi umur pakai lebih akurat. Misalnya, jika penurunan kapasitas melampaui batas yang ditentukan untuk aplikasi tertentu, sistem dapat direncanakan untuk diganti sebelum terjadi kegagalan mendadak. Pemantauan parameter secara *real-time* dapat membantu mengoptimalkan strategi ini.

Degradasi kapasitas bukan satu-satunya indikator kinerja baterai. Resistansi internal, waktu pengisian, dan efisiensi energi juga memberikan gambaran komprehensif tentang kondisi baterai. Perubahan signifikan pada parameter-parameter tersebut setelah 500 siklus mengonfirmasi bahwa siklus penggunaan berpengaruh langsung terhadap performa. Pemahaman terhadap semua parameter ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat terkait penggunaan, perawatan, dan penggantian baterai. Hal ini mendukung terciptanya sistem penyimpanan energi yang andal dan efisien.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa parameter operasional seperti metode pengisian, jumlah siklus, dan karakteristik penggunaan memiliki pengaruh signifikan terhadap performa baterai lithium-ion. Metode pengisian *pulse current* terbukti mampu mempertahankan kapasitas lebih baik dibandingkan metode CC-CV, dengan laju degradasi yang lebih rendah hingga siklus ke-1000. Kemudian pengukuran parameter sebelum dan sesudah 500 siklus menunjukkan adanya penurunan kapasitas dan *State of Health* sebesar 18%, kenaikan resistansi internal sebesar 22,2%, peningkatan waktu pengisian sebesar 13,3%, serta penurunan efisiensi energi sebesar 7,4%. Hasil ini mengonfirmasi bahwa degradasi baterai terjadi secara sistemik dan mempengaruhi seluruh aspek kinerja.

Analisis regresi linier memberikan bukti kuantitatif bahwa jumlah siklus memiliki hubungan negatif dan signifikan dengan kapasitas baterai, dengan nilai *R-squared* sebesar 0,991 dan *p-value* < 0,001. Model yang dihasilkan dapat digunakan untuk memprediksi titik *end of life* baterai, sehingga bermanfaat untuk perencanaan pemeliharaan dan penggantian yang lebih efisien. Temuan ini mendukung pentingnya pengelolaan baterai berbasis data, yang mencakup pemantauan parameter secara *real-time* dan pemilihan strategi pengisian yang tepat untuk memperpanjang umur pakai. Dengan penerapan strategi ini, kinerja dan keandalan sistem penyimpanan energi dapat dipertahankan, sekaligus mendukung target transisi energi yang efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Adisasmito, S., Dharmastuti, S. A., Syauqi, A., Ashshiddiq, J. A., & Santoso, L. L. (2023). *Transisi energi dan pengurangan emisi gas karbon dioksida*.
- Aritonang, Y. S., Siagian, P., & Aryza, S. (2024). Inovasi dan tantangan dalam pengembangan sistem transmisi tenaga listrik berbasis teknologi tinggi ultra high voltage untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi energi (Sebuah tinjauan literatur). *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3S1).
- Andriansyah, M. (2024). *Simulasi fast charging untuk stasiun pengisian baterai sepeda motor listrik*.
- Bowen, T., Chernyakhovskiy, I., & Denholm, P. (2019). *Grid-scale battery storage: Frequently asked questions* (NREL/TP-6A20-74426). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/74426.pdf>
- Ekasuci, Z. F. (2024). *Estimasi state of charge (SOC) baterai dengan metode coulomb counting dan open circuit voltage*.
- Gasper, P., Schiek, A., Smith, K., Shimonishi, Y., & Yoshida, S. (2022, December 21). Predicting battery capacity from impedance at varying temperature and state of charge using machine learning. *Cell Reports Physical Science*, 3(101184). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/82892.pdf>
- Hidayat, L. Y., Setiawan, A. H. A., & Wildan, M. (2025). Perencanaan perawatan preventive untuk uninterruptible power supply (UPS) systems. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(1).
- International Energy Agency. (2024). *Batteries and secure energy transitions*. IEA. <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>
- Kemal, Alfaridzi. (2024). Analisis Perbandingan Integrated Performa Baterai Vrla 20 Ah Dengan Baterai Lithium-Ion 20 Ah Pada Photovoltaic System (Doctoral Dissertation, Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa).
- Kurniasih, N. A., Nurhasanah, K. R., Febriyani, A. L., Bimantoro, R. J., Susilowati, S., Khairumaynisa, Z. B., ... & Nurchasanah, Y. (2025, June). Inovasi beton adaptif: Optimalisasi self-healing concrete untuk mitigasi retakan dan struktur berkelanjutan: Artikel reuiu. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS* (pp. 235-244).
- Nugraha, R., Varlitya, C. R., Judijanto, L., Adiwijaya, S., Suryahani, I., Murwani, I. A., ... & Basbeth, F. (2024). *Green economy: Teori, konsep, gagasan penerapan perekonomian hijau berbagai bidang di masa depan*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Nuroctavia, E. (2020). Analisis pemilihan metode perawatan terbaik bagi mesin filling plumat Ffs 894 No 2298 dengan menggunakan metode fuzzy topsis di PT Sanbe Farma (Doctoral dissertation, Universitas Komputer Indonesia). <http://repository.unikom.ac.id/id/eprint/12345>.
- Sidabutar, O. P. (2025). Optimalisasi kapasitas baterai 110 Volt DC di gardu induk 150 kV Dawuan: Studi kualitatif berdasarkan pengujian lapangan. *Jurnal Serambi Engineering*, 10(3).
- Topan, P. A., Hidayatullah, M., & Maulidyawati, D. (2023). Analisis nilai resistansi internal sebagai indikator state of health (SOH) pada baterai lithium polymer (Li-Po) menggunakan resistor. *Journal Altron; Journal of Electronics, Science & Energy Systems*, 2(02), 145-154.
- Yasmianti, F. I., & Haitam, I. (2024). Analisis pelaksanaan tugas ramp handling dalam menjaga on time performance (OTP) pada maskapai Garuda Indonesia di Bandara Soekarno Hatta Cengkareng. *Jurnal Publikasi Ilmu Manajemen*, 3(3), 219-234.
- Zahra, A. F. (2024). Efisiensi charging baterai ZTE 5 kWh pada instalasi panel surya hybrid kapasitas 3,6 kWp untuk proyek residential oleh PT Futura Energi Indonesia.