

Analisis Umur Baterai Terhadap Kemampuan Menyuplai Sistem DC pada Gardu Induk 150 kV Cawang Lama

¹Nurmiati Pasra, ²Alex Fernandes, ³Kartika Tresya Mauriraya, ⁴Miftahun Fikri, ⁵Andi Atma Dwi Zakiyah

^{1,2,3,4,5} Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN

Email Korespondensi: numiati@itpln.ac.id

Received: June 2026; Revised: July 2026; Published: August 2026

Abstrak

Baterai pada Gardu Induk berfungsi sebagai sumber daya cadangan sistem DC ketika terjadi gangguan atau pemadaman total, sehingga kinerja dan masa layak pakainya perlu dijaga untuk mendukung keandalan operasi gardu induk. Pada Gardu Induk 150 kV Cawang Lama, baterai Unit 1 telah beroperasi lebih dari 10 tahun, tetapi berdasarkan hasil pengujian masih berada dalam kondisi layak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan kapasitas, efisiensi, dan berat jenis baterai serta memprediksi masa layak pakai baterai. Pengujian dilakukan menggunakan metode discharging dengan memanfaatkan data hasil pemeliharaan baterai. Analisis masa layak pakai dilakukan menggunakan regresi linear berganda berdasarkan parameter kinerja baterai yang diperoleh dari hasil pengujian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada tahun 2023 baterai memiliki efisiensi terendah selama periode pengamatan, yaitu sebesar 88,65%. Nilai tersebut masih memenuhi batas efisiensi berdasarkan SPLN sesuai SKDIR 520-2 K/DIR/2014, yaitu lebih dari 80%. Hasil analisis regresi linear berganda menunjukkan estimasi masa layak pakai baterai selama 8,8 tahun ke depan. Hasil prediksi tersebut dapat digunakan sebagai salah satu informasi pendukung dalam perencanaan pemeliharaan dan penggantian baterai. Namun, prediksi perlu diverifikasi melalui pengujian dan pemantauan berkala agar kesesuaiannya dengan kondisi aktual baterai dapat dievaluasi.

Kata kunci: Baterai, Efisiensi, Kapasitas, Berat Jenis, Umur Baterai

Analysis of Battery Life with The Capability of Supplying The DC System at The Old Cawang 150 kV Substation

Abstract

Batteries in substations serve as a backup power source for DC systems during disturbances or total power outages; therefore, maintaining battery performance and service life is essential to support the reliability of substation operations. At the 150 kV Cawang Lama Substation, the Unit 1 battery has been in operation for more than 10 years but remains in an acceptable condition based on the test results. This study aims to analyze changes in battery capacity, efficiency, and specific gravity and to estimate the battery's remaining service life. Battery testing was conducted using the discharging method based on battery maintenance data. Multiple linear regression was applied to estimate the battery's service life using performance parameters obtained from the test results. The results show that in 2023, the battery had the lowest efficiency during the observation period, at 88.65%. This value remained above the efficiency limit specified by the PLN standard under SKDIR 520-2 K/DIR/2014, which is greater than 80%. The multiple linear regression analysis estimated the battery's remaining service life at 8.8 years. This prediction can be used as supporting information for battery maintenance and replacement planning. However, the prediction should be verified through periodic testing and monitoring to evaluate its consistency with the actual battery condition.

Keywords: Battery, Efficiency, Capacity, Specific Gravity, Battery Service Life

How to Cite: Pasra, N. ., Fernandes, A. ., Mauriraya, K. T. ., Fikri, M. ., & Zakiyah, A. A. D. . (2026). Analisis Umur Baterai Terhadap Kemampuan Menyuplai Sistem DC pada Gardu Induk 150 kV Cawang Lama. *Journal of Authentic Research*, 5(3), 6960-6973. <https://journal-center.litpam.com/index.php/jar/article/view/6467>



<https://doi.org/10.36312/jar.v3i2.2025>

Copyright© 2026, Pasra et al.

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.



PENDAHULUAN

Sistem sumber daya arus searah (direct current/DC) merupakan salah satu bagian penting dalam menjaga keandalan operasi Gardu Induk (GI), karena menyediakan catu daya bagi berbagai peralatan kontrol, proteksi, pemantauan, dan pengoperasian peralatan tegangan tinggi. Pada sistem DC GI, sumber utama umumnya berasal dari sistem pemakaian sendiri (PS) melalui charger atau penyearah yang mengubah tegangan arus bolak-balik (alternating current/AC) menjadi tegangan DC, sedangkan baterai berfungsi sebagai sumber cadangan ketika suplai AC atau charger mengalami gangguan maupun ketika sistem dilepas untuk pemeliharaan. Kondisi tersebut menjadikan baterai sebagai salah satu komponen penting dalam menjaga kontinuitas operasi peralatan DC, khususnya ketika terjadi gangguan atau pemadaman total (blackout) (Agned, 2020). IEEE 946-2020 juga menempatkan baterai penyimpan, charger/rectifier, peralatan distribusi, proteksi, kontrol, dan instrumentasi sebagai komponen utama sistem DC untuk aplikasi pembangkitan dan gardu induk. Dengan demikian, kegagalan sumber DC dapat memengaruhi kemampuan peralatan proteksi dan kontrol dalam merespons gangguan pada sistem tenaga listrik.

Pada GI dengan sistem DC 110 V, baterai harus mampu menyediakan energi dan tegangan yang memadai bagi beban DC ketika sumber utama tidak tersedia. Sumber AC dari transformator pemakaian sendiri disalurkan menuju penyearah sehingga menghasilkan tegangan DC yang digunakan untuk memasok beban sekaligus menjaga kondisi pengisian baterai (Lubis, 2019). Dalam kondisi normal, charger dan baterai bekerja dalam sistem suplai DC, sedangkan ketika suplai AC terganggu, baterai mengambil alih penyediaan daya bagi beban-beban penting. Beban tersebut antara lain motor penggerak pemisah dan pemutus tenaga (PMS/PMT), relay proteksi, rangkaian sinyal dan alarm, indikator, serta kumparan trip dan close. Oleh karena itu, keandalan baterai tidak hanya ditentukan oleh kemampuan menyimpan energi, tetapi juga oleh kondisi aktual baterai dan kemampuannya mempertahankan kapasitas ketika dibutuhkan. Literatur internasional mengenai sistem DC gardu induk juga menunjukkan bahwa sistem DC merupakan pemasok daya bagi perangkat proteksi dan kontrol, sehingga pemantauan kondisi serta pengujian baterai menjadi bagian penting dari pemeliharaan sistem.

Keandalan baterai semakin penting seiring bertambahnya umur operasi. Penurunan kondisi baterai dapat menyebabkan berkurangnya kemampuan dalam memasok beban DC, terutama ketika baterai harus bekerja sebagai sumber daya cadangan dalam kondisi gangguan. Oleh sebab itu, pemeliharaan, pengujian, dan evaluasi kondisi baterai perlu dilakukan secara berkala. IEEE 450-2020 secara khusus memberikan rekomendasi mengenai pemeliharaan, pengujian, dan penggantian baterai lead-acid yang digunakan pada aplikasi stasioner, termasuk sebagai sumber daya siaga, serta memberikan dasar untuk menentukan kebutuhan penggantian baterai. Hal ini menunjukkan bahwa umur kalender saja tidak cukup untuk menggambarkan kondisi aktual baterai. Evaluasi berbasis parameter kelistrikan dan kondisi baterai diperlukan untuk mengetahui apakah baterai yang telah lama beroperasi masih mampu memenuhi kebutuhan sistem DC secara andal.

Permasalahan tersebut relevan dengan kondisi sistem DC pada GI 150 kV Cawang Lama. Pada tahun 2019 pernah terjadi blackout yang berkaitan dengan gangguan pada jalur transmisi GI. Salah satu kondisi yang menjadi perhatian adalah baterai pada Unit 1 yang telah melewati umur operasional yang direkomendasikan, yaitu lebih dari 10 tahun, meskipun secara kondisi masih dinilai layak. Umur operasi baterai GI pada praktiknya berada pada kisaran sepuluh hingga lima belas tahun. Semakin bertambahnya umur operasi, semakin diperlukan evaluasi terhadap kemampuan baterai karena proses degradasi dapat menyebabkan penurunan performa dan keandalan serta meningkatkan risiko kegagalan ketika baterai dibutuhkan. Pemeliharaan rutin dapat mempertahankan kondisi operasi, tetapi belum secara langsung memberikan informasi mengenai sisa masa layak baterai. Kondisi tersebut menimbulkan kebutuhan untuk melakukan pengujian dan evaluasi yang tidak hanya melihat kelayakan baterai pada saat pengujian, tetapi juga mengkaji kecenderungan perubahan parameter kinerja dan memperkirakan masa layaknya (Fajaruddin, 2023).

Sejumlah penelitian sebelumnya telah membahas kapasitas dan pemeliharaan baterai sebagai sumber DC pada gardu induk. Pada tahun 2022, Royb Fatkhur Rizal dan Hardhika Dwi Atmaja melakukan penelitian berjudul "*Analisis Checkup Pemeliharaan Battery Capacity Test (BCT) 110 VDC di PT. PLN (Persero) GI 150 kV Jatigedong Jombang*". Penelitian tersebut bertujuan menentukan kapasitas baterai dalam menyediakan tegangan DC bagi peralatan proteksi ketika terjadi gangguan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dalam dua tahun terakhir kapasitas baterai mengalami penurunan dari 240 Ah menjadi 210 Ah, sedangkan efisiensinya menurun dari 80% menjadi 70% (Hardhika, 2022). Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan kapasitas dan efisiensi dapat digunakan sebagai indikator penting dalam mengevaluasi kondisi baterai selama masa operasi.

Penelitian lain dilakukan oleh Selamat Meliala, Muhammad Rijal, dan Taufiq pada tahun 2021 melalui penelitian berjudul "*Studi Kapasitas Baterai 110 Volt DC Unit I pada GI 150 kV Bireuen*". Penelitian tersebut bertujuan mengetahui spesifikasi dan kondisi baterai melalui pengukuran tegangan setiap sel. Hasil pengukuran menunjukkan adanya empat sel baterai yang mengalami kelemahan, yaitu sel 15, 46, 60, dan 66, dengan nilai tegangan masing-masing sebesar -0,38 V, -0,22 V, -0,32 V, dan -0,27 V. Berdasarkan hasil tersebut, peneliti merekomendasikan penggantian baterai untuk mencegah kondisi sel yang lemah memengaruhi kinerja sel lainnya (Meliala et al., 2021).

Pada tahun 2024, Rosdiana, S.T., M.T. dan Ahlul Furkan melakukan penelitian berjudul "*Sistem Pemeliharaan pada Baterai 110 VDC pada GI 150 kV Bayu Lhokseumawe PT PLN (Persero) Banda Aceh*". Penelitian tersebut membahas pemeliharaan baterai sebagai sumber tenaga DC untuk penggerak PMS dan PMT, peralatan proteksi, serta kebutuhan darurat. Hasil pengukuran tegangan per sel menunjukkan adanya penurunan sebesar 1,28 V dari tegangan rata-rata sebesar 1,43 V (Furkan, 2023). Temuan tersebut memperlihatkan bahwa pemeriksaan parameter individual sel diperlukan karena kondisi baterai secara keseluruhan dapat dipengaruhi oleh kondisi sel-sel penyusunnya.

Sementara itu, Muhammad Farisha Istiqlal, Edvin Priatna, dan Sutisna pada tahun 2023 melakukan penelitian berjudul "*Analisa Kapasitas Baterai sebagai Sumber DC pada Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV PT PLN (Persero) Tasikmalaya*". Penelitian tersebut dilakukan untuk menjaga keandalan dan stabilitas sistem arus searah pada GI 500 kV Tasikmalaya. Hasil penelitian menegaskan pentingnya baterai sebagai sumber DC dalam menjaga keandalan gardu induk serta perlunya pemeliharaan berkala untuk mengantisipasi gangguan pada sistem DC dan mempertahankan kinerja baterai (Farisha Istiqlal et al., 2023). Temuan tersebut juga memperlihatkan bahwa evaluasi kapasitas baterai merupakan bagian penting dari upaya mempertahankan keandalan sistem DC.

Meskipun penelitian terdahulu telah membahas kapasitas, tegangan sel, efisiensi, dan pemeliharaan baterai pada berbagai gardu induk, sebagian besar penelitian masih berfokus pada evaluasi kondisi baterai berdasarkan hasil pengukuran dan penentuan kelayakan pada saat pengujian. Kajian yang secara khusus menghubungkan perubahan beberapa parameter hasil pengujian dengan umur operasi baterai serta estimasi sisa masa layaknya pada sistem DC GI 150 kV Cawang Lama masih terbatas. Dengan demikian, terdapat celah penelitian pada aspek pemanfaatan data hasil pengujian baterai sebagai dasar analisis hubungan antara umur operasi dan kemampuan baterai dalam menyuplai sistem DC, sekaligus sebagai dasar untuk memperkirakan masa layak baterai. Pendekatan ini penting karena standar pemeliharaan baterai menekankan perlunya pengujian dan evaluasi kondisi baterai untuk mendukung keputusan pemeliharaan maupun penggantian, bukan semata-mata berdasarkan umur kalender.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pemanfaatan parameter hasil pengujian baterai, yaitu tegangan keseluruhan, tegangan per sel, berat jenis, kondisi larutan elektrolit, dan kapasitas, untuk menganalisis kondisi baterai berdasarkan umur operasinya serta mengembangkan estimasi masa layak menggunakan analisis regresi linier. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan informasi yang lebih terukur mengenai kecenderungan penurunan kinerja baterai dan membantu membedakan antara baterai yang secara umur telah lama beroperasi dengan baterai yang secara kondisi masih mampu mendukung sistem DC. Dengan demikian, penelitian tidak hanya menilai apakah baterai masih layak digunakan, tetapi juga mengkaji hubungan antara karakteristik hasil pengujian dan umur baterai sebagai dasar evaluasi kondisi serta perencanaan pemeliharaan.

Berdasarkan permasalahan dan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh umur baterai terhadap kemampuan menyuplai sistem DC pada GI 150 kV Cawang Lama berdasarkan parameter hasil pengujian baterai. Analisis dilakukan melalui metode *discharging* untuk memperoleh informasi mengenai tegangan keseluruhan, tegangan per sel, berat jenis, kondisi larutan elektrolit, dan kapasitas baterai. Selanjutnya, data hasil pengujian dianalisis menggunakan regresi linier untuk mengidentifikasi hubungan antara parameter baterai dan umur operasi serta memperkirakan masa layak baterai. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar empiris dalam mengevaluasi kondisi baterai

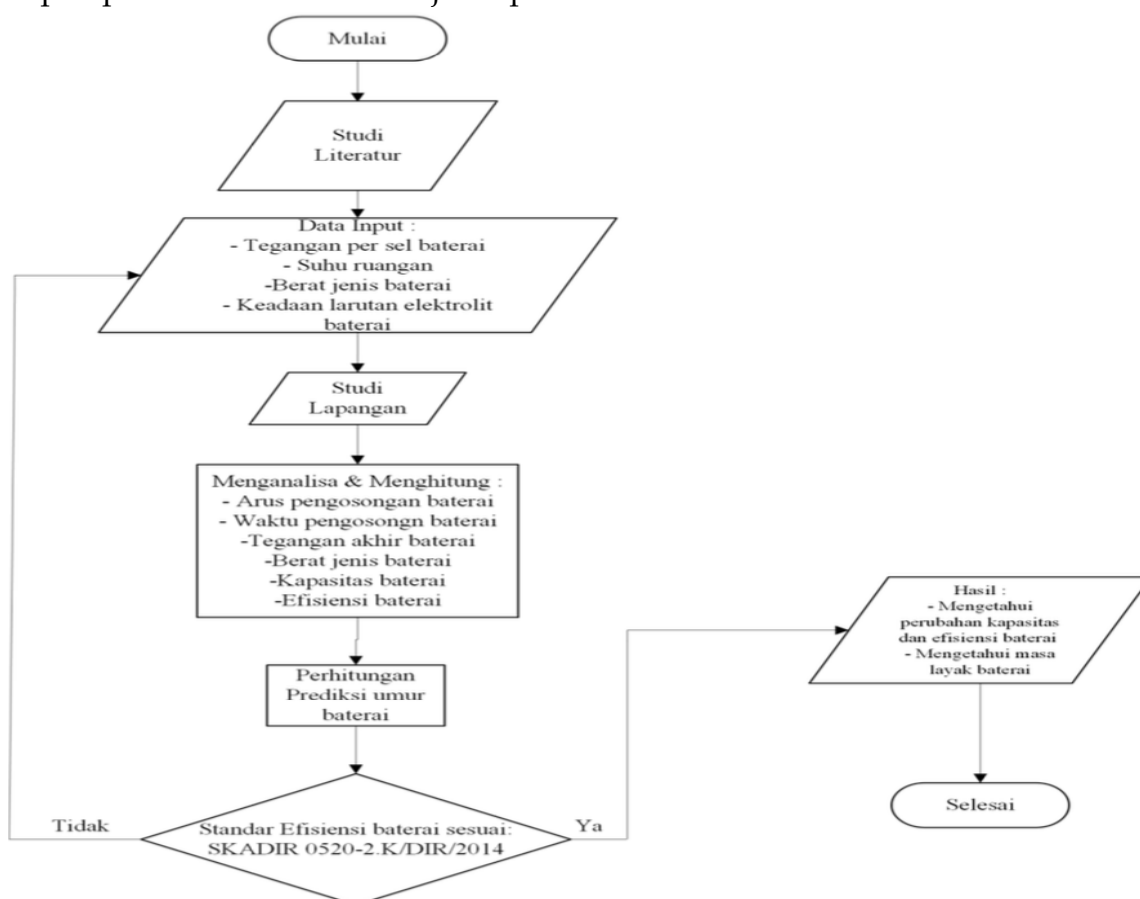
dan mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan serta penggantian baterai pada sistem DC gardu induk.

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Gardu Induk (GI) Cawang Lama yang beralamat di Jalan Cililitan Besar No. 01, Cawang, Cililitan, Jakarta Timur 13640. Fokus penelitian adalah sistem arus searah (DC), khususnya baterai 110 VDC pada Unit 1 yang berfungsi sebagai sumber daya cadangan bagi peralatan sistem DC. Penelitian dilaksanakan selama empat bulan, yaitu April hingga Juli 2024.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan memanfaatkan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh secara langsung melalui kegiatan studi lapangan, wawancara dengan narasumber, dan observasi terhadap kondisi sistem baterai pada GI Cawang Lama. Wawancara dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai keandalan baterai dalam menyuplai sistem DC, sedangkan observasi dilakukan dengan mengamati dan mencatat kondisi serta fakta-fakta yang ditemukan di lapangan. Data sekunder berupa data pemeliharaan baterai dan data spesifikasi baterai yang telah tersedia pada GI Cawang Lama. Data pemeliharaan yang digunakan mencakup data pemeriksaan bulanan dan pemeriksaan dua tahunan.

Tahapan penelitian secara umum meliputi studi literatur, studi lapangan, pengumpulan data, pengolahan data, analisis data, dan penarikan kesimpulan. Alur tahapan penelitian tersebut disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Desain Penelitian

Keterangan: Gambar 1 menunjukkan tahapan penelitian yang dimulai dari studi literatur, dilanjutkan dengan studi lapangan, identifikasi dan pengumpulan data pemeliharaan serta spesifikasi baterai, pengolahan data, analisis parameter kinerja baterai dan prediksi umur baterai menggunakan regresi linier, hingga diperoleh hasil penelitian dan kesimpulan.

Studi literatur dilakukan dengan menelaah jurnal ilmiah, laporan penelitian, dan skripsi yang berkaitan dengan sistem DC pada gardu induk, baterai sebagai sumber DC, pemeliharaan baterai, kapasitas baterai, efisiensi baterai, serta metode prediksi umur baterai. Tahap ini bertujuan membangun landasan teoritis dan mengidentifikasi permasalahan yang relevan dengan kondisi baterai pada GI Cawang Lama.

Setelah studi literatur, dilakukan studi lapangan untuk memperoleh informasi mengenai kondisi aktual sistem baterai. Studi lapangan dilakukan melalui wawancara dengan narasumber dan observasi langsung. Wawancara digunakan untuk memperoleh informasi mengenai pengoperasian dan keandalan baterai dalam menyuplai sistem DC, sedangkan observasi digunakan untuk mengidentifikasi dan mencatat kondisi fisik serta informasi teknis yang berkaitan dengan baterai.

Tahap selanjutnya adalah pengumpulan data. Data yang digunakan meliputi data pemeliharaan baterai secara bulanan, data pemeliharaan dua tahunan, serta data spesifikasi baterai. Data tersebut kemudian diolah untuk memperoleh parameter yang digunakan dalam analisis, meliputi kapasitas baterai, arus, lama penggunaan, efisiensi, dan umur operasi baterai. Pengolahan data dilakukan berdasarkan hasil pengukuran dan data pemeliharaan yang tersedia.

Kapasitas baterai menunjukkan kemampuan baterai dalam menyuplai arus listrik selama periode tertentu dan dinyatakan dalam satuan ampere-hour (Ah). Analisis kapasitas digunakan untuk mengetahui perubahan kemampuan baterai selama masa operasinya. Efisiensi baterai digunakan sebagai salah satu parameter untuk mengevaluasi kinerja baterai. Berdasarkan ketentuan yang digunakan dalam penelitian, baterai dikategorikan memiliki kondisi baik apabila efisiensinya lebih dari 80%, sedangkan baterai dengan efisiensi kurang dari 60% dikategorikan memiliki kondisi buruk dan memerlukan penggantian.

Selain analisis kapasitas dan efisiensi, penelitian ini menggunakan analisis regresi linier berganda untuk memprediksi umur baterai berdasarkan parameter hasil pemeliharaan. Analisis dilakukan dengan menggunakan data parameter baterai yang tersedia untuk mengetahui hubungan antara kondisi baterai dan umur operasinya. Hasil analisis digunakan untuk memperoleh estimasi umur baterai serta melihat kecenderungan perubahan kinerja baterai setelah pemeliharaan.

Tahap akhir penelitian adalah analisis dan interpretasi hasil. Hasil pengolahan data digunakan untuk mengetahui perubahan kapasitas dan efisiensi baterai 110 VDC Unit 1 serta mengevaluasi kondisi baterai berdasarkan parameter yang diperoleh. Selanjutnya, hasil analisis regresi digunakan untuk mengetahui hubungan parameter baterai dengan umur operasi dan memperoleh prediksi umur baterai. Hasil tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam menarik kesimpulan mengenai

kemampuan baterai dalam mendukung suplai sistem DC pada GI 150 kV Cawang Lama.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Baterai

Pada data discharger per sel baterai 110 VDC yang berada di GI Cawang Lama khususnya pada unit 1 terdapat 86 jumlah sel. Data yang digunakan yaitu data pemeliharaan 2 tahunan, yaitu tahun 2013, 2015, 2017, 2019, 2021, dan 2023.

Tabel 1. Nameplat Baterai unit 1 GI Cawang Lama

Merk	UNICAD
Type	KMP200
Jenis baterai	Alkali (Ni-Cd battery)
Kapasitas	200 Ah
Tegangan Baterai	110 VDC
Tegangan setiap sel	1,2 Volt
Jumlah sel baterai	86 Sel
Tahun Operasi	2013- sekarang

Tabel 2. Data pengukuran suhu dan berat jenis baterai dari tahun 2013 - 2023

No	Tahun	Suhu (°C)	Berat Jenis (gr/l)
1.	2013	30	1,216
2.	2015	30	1,210
3.	2017	30	1,200
4.	2019	30	1,275
5.	2021	30	1,220
6.	2023	30	1,199

Perhitungan Baterai

Untuk melakukan pengosongan pada baterai, kita melakukan perhitungan terlebih dahulu sesuai dengan persamaan pada (3.1), yang dimana kapasitasnya sesuai dengan Tabel 1: $I \text{ discharge} = 0,2 \text{ A} \times C = 0.2 \text{ A} \times 200 \text{ Ah} = 40 \text{ A}$. Pada setiap pengosongan pada baterai di setiap tahunnya memiliki arus pengosongan sebesar 40 A.

Untuk mengetahui waktu pengosongan pada pengosongan baterai yaitu melakukan perhitungan sesuai dengan persamaan (3.2) yang dimana kapasitas chargingnya sesuai dengan Tabel 1: $T \text{ stop} = Cc / I \text{ Discharge} = 200 \text{ Ah} / 40 \text{ A} = 5 \text{ Jam}$.

Untuk mengetahui tegangan akhir pada saat melakukan pengosongan baterai yaitu dengan melakukan perhitungan yang dirumuskan sesuai dengan persamaan (3.3) yang dimana jumlah selnya sesuai dengan Tabel 1: $V \text{ stop} = 1 \times n \text{ sel} = 1 \times 86 \text{ sel} = 86 \text{ V}$.

Untuk mengetahui kapasitas baterai dapat dirumuskan sesuai dengan persamaan (3.5):

$$C = I \times t$$

$$40 \text{ A} \times 5 \text{ jam}$$

$$= 200 \text{ Ah.}$$

Untuk mengetahui efisiensi baterai dapat di rumuskan sesuai dengan persamaan (3.6) dan kapasistas chargingnya sesuai dengan Tabel 1:

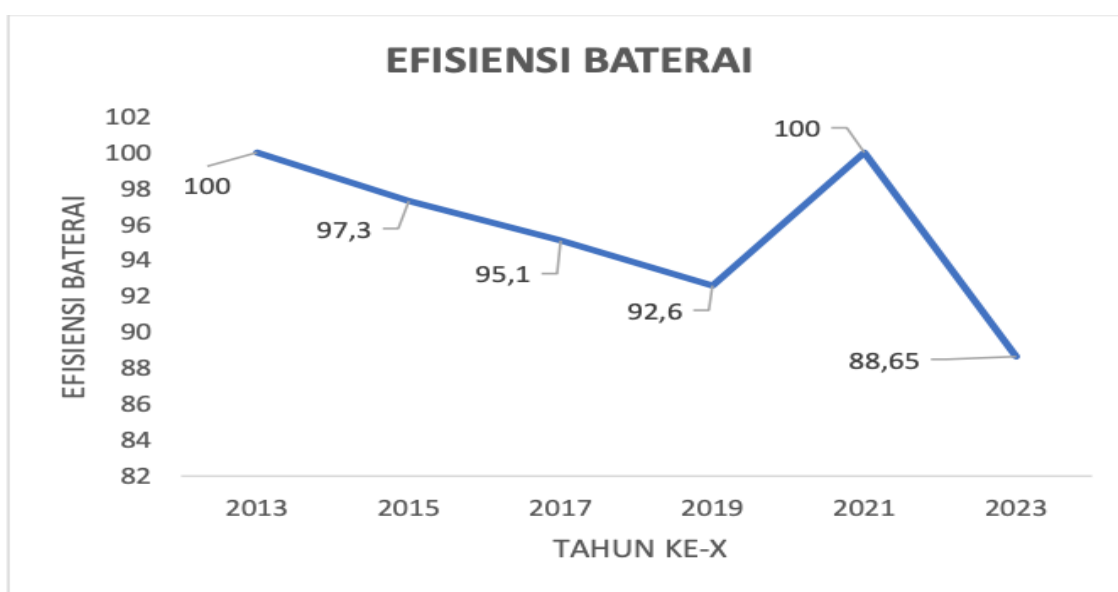
1. Efisiensi baterai pemeliharaan tahun 2013: $\eta = (200 \text{ Ah} / 200 \text{ Ah}) \times 100\% = 100\%$.
2. Efisiensi baterai pemeliharaan tahun 2015: $\eta = (194,6 \text{ Ah} / 200 \text{ Ah}) \times 100\% = 97,3\%$.
3. Efisiensi baterai pemeliharaan tahun 2017: $\eta = (190,2 \text{ Ah} / 200 \text{ Ah}) \times 100\% = 95,1\%$.
4. Efisiensi baterai pemeliharaan tahun 2019: $\eta = (185,3 \text{ Ah} / 200 \text{ Ah}) \times 100\% = 92,6\%$.
5. Efisiensi baterai pemeliharaan tahun 2021: $\eta = (200 \text{ Ah} / 200 \text{ Ah}) \times 100\% = 100\%$.
6. Efisiensi baterai pemeliharaan tahun 2023: $\eta = (177,3 \text{ Ah} / 200 \text{ Ah}) \times 100\% = 88,65\%$.

Untuk mengetahui berat jenis pada baterai yaitu melakukan perhitungan sesuai dengan persamaan (3.4) dan data Tabel 2:

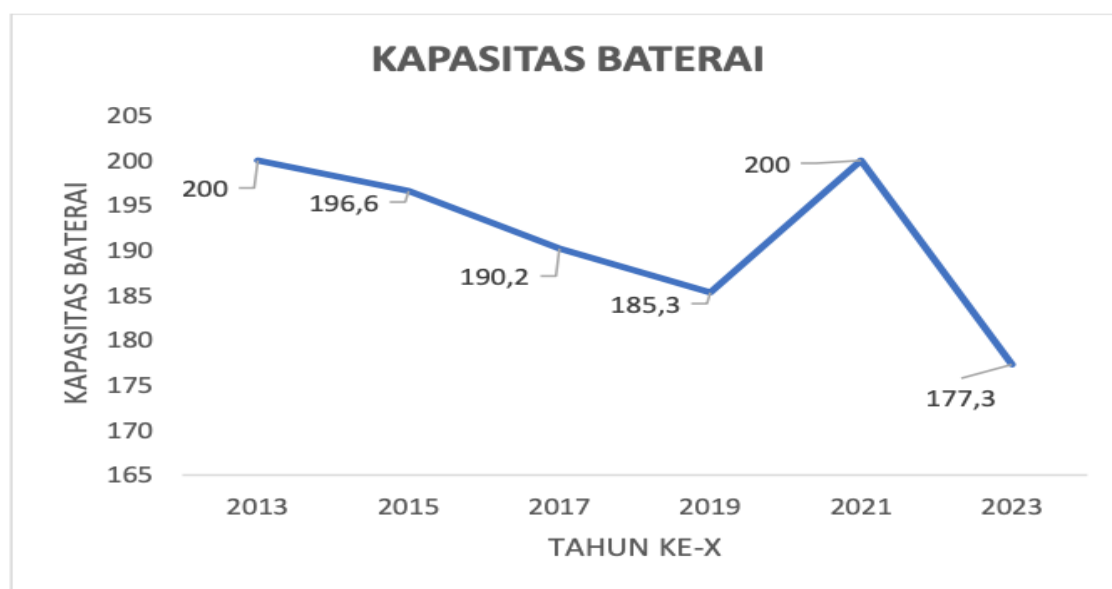
1. Berat jenis baterai pemeliharaan tahun 2013: $1,216 + 0,0005 = 1,2165 \text{ gr/l}$.
2. Berat jenis baterai pemeliharaan tahun 2015: $1,210 + 0,0005 = 1,2105 \text{ gr/l}$.
3. Berat jenis baterai pemeliharaan tahun 2017: $1,200 + 0,0005 = 1,2005 \text{ gr/l}$.
4. Berat jenis baterai pemeliharaan tahun 2019: $1,275 + 0,0005 = 1,2755 \text{ gr/l}$.
5. Berat jenis baterai pemeliharaan tahun 2021: $1,220 + 0,0005 = 1,2205 \text{ gr/l}$.
6. Berat jenis baterai pemeliharaan tahun 2023: $1,210 + 0,0005 = 1,2105 \text{ gr/l}$.

Perubahan Kapasitas dan Efisiensi Baterai

Untuk mengetahui kinerja dari baterai, maka dibutuhkan data perubahan kapasitas dan efisiensi baterai pertahunnya.



Gambar 2. Grafik efisiensi baterai per tahunnya



Gambar 3. Grafik kapasitas baterai per tahunnya

Tabel 3. Perubahan kapasitas dan efesiensi baterai dari tahun 2013-2023

No.	Tahun	Baterai sel nomor yang mengalami drop voltage	Jam	Kapasitas (Ah)	Efisiensi(%)
1.	2013	Semua bagus		200	100
2.	2015	24, 47, 39	4	194,6	97,3
		63	5		
3.	2017	11 & 32	4	190,2	95,1
		8, 72, & 86	5		
4.	2019	34	3	185,3	92,6
		17, 63, & 64	4		
		86	5		
5.	2021	63 & 85	1	200	100
		34	2		
		82	3		
		13 & 56	5		
6.	2023	10, 15, 23 & 41	1	177,3	88,65

Hasil pemeliharaan menunjukkan bahwa kapasitas dan efisiensi baterai Unit 1 GI Cawang Lama mengalami perubahan selama periode pengamatan. Pada tahun 2013, tegangan awal baterai sebelum proses pengosongan berada pada kisaran 1,4 V per sel. Nilai tersebut berada di atas tegangan nominal baterai alkali sebesar 1,2 V pada kondisi tanpa pengisian, sehingga pada awal periode pengamatan baterai masih menunjukkan kondisi operasi yang baik. Selama proses pengosongan dari jam pertama hingga jam kelima belum terlihat adanya penurunan tegangan yang berarti. Kondisi tersebut sejalan dengan kapasitas baterai sebesar 200 Ah dan efisiensi sebesar 100%, yang menunjukkan bahwa pada awal masa operasinya baterai masih mampu mempertahankan kemampuan penyediaan energi secara optimal. Kondisi ini juga dapat dikaitkan dengan fakta bahwa baterai baru dipasang pada gardu induk sehingga proses degradasi akibat penggunaan dalam jangka panjang belum dominan.

Pada periode 2015–2019, kapasitas dan efisiensi baterai menunjukkan kecenderungan menurun. Berdasarkan hasil pemeliharaan, pada periode tersebut ditemukan beberapa sel yang mengalami kerusakan dan kondisi tersebut ditemukan pada sel yang berbeda serta pada waktu pengujian yang berbeda. Penurunan kapasitas dan efisiensi tidak terjadi secara drastis dari satu tahun ke tahun berikutnya, tetapi menunjukkan kecenderungan penurunan seiring bertambahnya umur operasi baterai. Kondisi ini menunjukkan bahwa evaluasi baterai tidak cukup hanya dilakukan berdasarkan nilai kapasitas total, karena penurunan kinerja dapat berkaitan dengan kondisi individual sel yang membentuk satu rangkaian baterai. Sel yang mengalami penurunan kemampuan dapat memengaruhi kemampuan keseluruhan rangkaian dalam mempertahankan tegangan selama proses pengosongan.

Pada tahun 2021 terjadi peningkatan kembali pada kapasitas dan efisiensi baterai. Kondisi tersebut berkaitan dengan tindakan pemeliharaan berupa rekondisi larutan elektrolit yang dilakukan pada baterai. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan parameter kinerja baterai tidak selalu membentuk pola penurunan linear terhadap umur operasi. Tindakan pemeliharaan tertentu dapat memengaruhi kondisi elektrolit dan karakteristik operasi baterai sehingga parameter kapasitas dan efisiensi dapat mengalami peningkatan kembali. Oleh karena itu, umur baterai tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator untuk menentukan kondisi aktual baterai. Kondisi pemeliharaan dan hasil pengujian aktual juga perlu dipertimbangkan dalam mengevaluasi kemampuan baterai.

Pada tahun 2023, kapasitas dan efisiensi kembali mengalami penurunan. Berdasarkan hasil pemeliharaan, terdapat sejumlah sel yang mengalami penurunan tegangan selama proses pengosongan, bahkan terdapat sel yang mengalami drop voltage sejak jam pertama pengujian. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kemampuan sebagian sel dalam mempertahankan tegangan selama proses pengosongan telah menurun. Ketika beberapa sel mengalami penurunan tegangan lebih awal, kemampuan rangkaian baterai secara keseluruhan dalam mempertahankan suplai selama periode pengosongan juga dapat berkurang. Kondisi tersebut menjadi salah satu faktor yang menjelaskan penurunan kapasitas dan efisiensi pada tahun 2023.

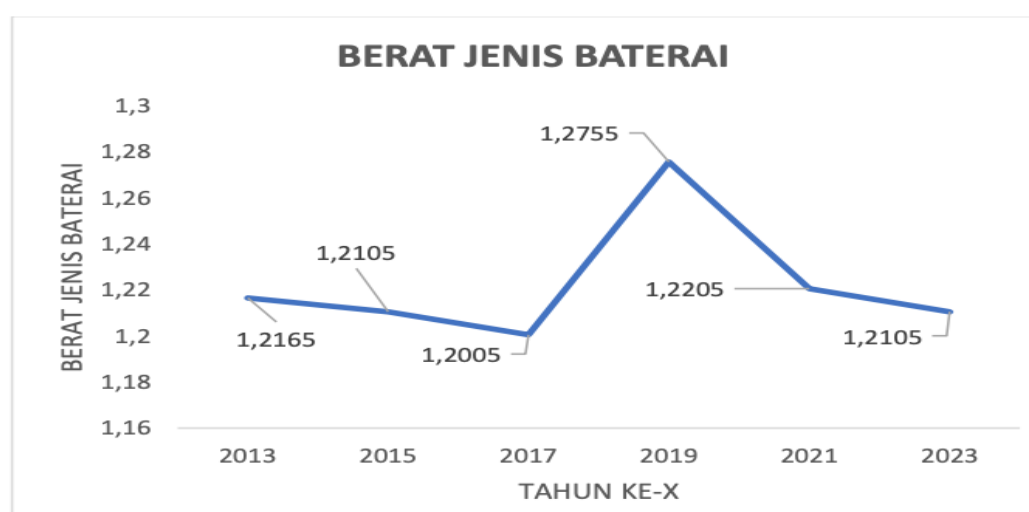
Meskipun tahun 2023 menunjukkan nilai efisiensi terendah, yaitu 88,65%, nilai tersebut masih berada di atas batas efisiensi yang digunakan dalam penelitian. Berdasarkan SPLN sesuai SKDIR 520-2 K/DIR/2014, efisiensi baterai yang memenuhi standar adalah lebih dari 80%. Dengan demikian, berdasarkan parameter efisiensi hasil pengujian, baterai Unit 1 GI Cawang Lama masih memenuhi standar dan belum menunjukkan kondisi yang mengharuskan penggantian berdasarkan parameter tersebut. Namun, umur baterai yang telah melewati batas umur penggantian tetap menjadi faktor yang perlu diperhatikan. Kondisi tersebut menunjukkan adanya perbedaan antara umur kalender dan kondisi aktual baterai: baterai dapat telah melewati umur operasional yang direkomendasikan, tetapi masih menunjukkan parameter kinerja yang memenuhi batas standar. Oleh karena itu, pemantauan dan

pemeliharaan secara berkala diperlukan untuk mengantisipasi penurunan kapasitas dan efisiensi yang lebih besar pada periode berikutnya.

Secara keseluruhan, perubahan kapasitas dan efisiensi dari tahun 2013 hingga 2023 menunjukkan bahwa kinerja baterai dipengaruhi oleh kombinasi umur operasi, kondisi sel, dan tindakan pemeliharaan. Pola peningkatan kembali setelah rekondisi elektrolit pada tahun 2021 menunjukkan bahwa hubungan antara umur dan kinerja baterai tidak sepenuhnya bersifat linear. Temuan ini menjadi dasar penting bagi analisis prediksi umur baterai karena model prediksi perlu mempertimbangkan parameter kondisi baterai, bukan hanya tahun pemasangan atau umur kalender.

Perubahan Berat Jenis Baterai

Selain kapasitas dan efisiensi baterai, berat jenis juga perlu diketahui perubahan per tahunnya agar mengetahui kinerja dari baterai :



Gambar 4. Grafik perubahan berat jenis baterai dari tahun 2013 - 2023

Berdasarkan hasil perhitungan, berat jenis baterai menunjukkan perubahan dari tahun ke tahun. Pada tahun 2013 diperoleh nilai rata-rata sebesar 1,2165 gr/l, kemudian menurun menjadi 1,2105 gr/l pada tahun 2015 dan 1,2005 gr/l pada tahun 2017. Pada tahun 2019 terjadi peningkatan menjadi 1,2755 gr/l. Selanjutnya, nilai berat jenis kembali berubah menjadi 1,2205 gr/l pada tahun 2021 dan 1,2105 gr/l pada tahun 2022. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa berat jenis elektrolit tidak mengalami penurunan secara konsisten seiring bertambahnya umur baterai, tetapi mengalami fluktuasi selama periode pengamatan.

Berdasarkan standar SPLN sesuai SKDIR 520-2 K/DIR/2014 yang digunakan dalam penelitian, nilai berat jenis sebesar 1,19 gr/l menjadi acuan evaluasi. Nilai hasil pengukuran selama periode pengamatan masih berada di atas nilai acuan tersebut. Dengan demikian, berdasarkan parameter berat jenis, kondisi elektrolit baterai masih memenuhi standar yang digunakan dalam penelitian. Namun, pemenuhan nilai standar berat jenis tidak dapat diinterpretasikan secara terpisah dari parameter lainnya. Evaluasi kondisi baterai tetap perlu mempertimbangkan kapasitas, efisiensi, tegangan sel, dan respons baterai selama proses pengosongan.

Perubahan berat jenis memiliki keterkaitan dengan kondisi elektrolit dan kemampuan baterai dalam melakukan proses elektrokimia. Berat jenis yang berada pada kondisi sesuai standar menunjukkan bahwa konsentrasi elektrolit berada pada rentang yang dapat mendukung proses kerja baterai. Sebaliknya, berat jenis yang terlalu rendah menunjukkan konsentrasi elektrolit yang lebih lemah sehingga dapat berkaitan dengan penurunan kemampuan baterai dalam menyediakan energi. Sementara itu, berat jenis yang terlalu tinggi juga perlu diperhatikan karena menunjukkan konsentrasi elektrolit yang lebih tinggi dari kondisi yang diharapkan. Oleh karena itu, nilai berat jenis perlu dievaluasi berdasarkan rentang standar dan bersama-sama dengan parameter kinerja lainnya, bukan hanya berdasarkan kecenderungan naik atau turun.

Fluktuasi berat jenis yang terjadi selama periode pengamatan juga dapat membantu menjelaskan perubahan kapasitas dan efisiensi baterai. Pada tahun 2021, misalnya, peningkatan kembali kapasitas dan efisiensi setelah dilakukan rekondisi larutan elektrolit menunjukkan bahwa kondisi elektrolit merupakan salah satu aspek yang berhubungan dengan kinerja baterai. Namun, hubungan tersebut tidak dapat dipandang sebagai hubungan sebab-akibat tunggal karena kinerja baterai juga dipengaruhi oleh kondisi sel, umur operasi, dan hasil pemeliharaan. Dengan demikian, berat jenis lebih tepat digunakan sebagai salah satu parameter pendukung dalam mengevaluasi kondisi baterai.

Jika dikaitkan dengan hasil tahun 2023, nilai efisiensi yang masih mencapai 88,65% dan berat jenis yang masih berada di atas batas standar menunjukkan bahwa baterai belum dapat dinyatakan tidak layak hanya berdasarkan kedua parameter tersebut. Akan tetapi, adanya sel yang mengalami drop voltage sejak awal proses pengosongan menunjukkan bahwa terdapat indikasi penurunan kondisi pada tingkat sel. Hal ini memperlihatkan pentingnya menggabungkan parameter berat jenis dengan hasil pengujian tegangan sel, kapasitas, dan efisiensi dalam menilai kemampuan baterai menyuplai sistem DC.

Secara keseluruhan, hasil pengamatan menunjukkan bahwa berat jenis baterai mengalami fluktuasi selama periode 2013–2023, sementara nilai kapasitas dan efisiensi juga mengalami perubahan yang tidak sepenuhnya mengikuti pola linear. Kondisi tersebut memperkuat kebutuhan untuk melakukan analisis menggunakan beberapa parameter secara bersamaan. Dengan demikian, prediksi umur baterai sebaiknya tidak hanya didasarkan pada umur operasi, tetapi juga mempertimbangkan indikator kondisi baterai yang diperoleh dari hasil pemeliharaan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, kapasitas dan efisiensi baterai 110 VDC Unit 1 GI Cawang Lama mengalami perubahan selama periode pengamatan. Kapasitas baterai berturut-turut sebesar 200 Ah, 196,6 Ah, 190,2 Ah, 185,3 Ah, 200 Ah, dan 177,3 Ah, sedangkan efisiensinya sebesar 100%, 97,3%, 95,1%, 92,6%, 100%, dan 88,65%. Penurunan kinerja terjadi secara bertahap, sedangkan peningkatan pada tahun 2021 berkaitan dengan penggantian sel baterai sehingga kapasitas dan efisiensi kembali

mencapai 200 Ah dan 100%. Pada tahun 2023, baterai menunjukkan nilai kapasitas dan efisiensi terendah selama periode pengujian, tetapi efisiensi sebesar 88,65% masih memenuhi standar SPLN sesuai SKDIR 520-2 K/DIR/2014, yaitu lebih dari 80%. Dengan demikian, berdasarkan hasil pengujian tersebut baterai masih memenuhi standar kinerja, tetapi kondisi sel dan umur operasi perlu menjadi perhatian dalam pemeliharaan.

Hasil prediksi menggunakan regresi linear berganda menunjukkan estimasi masa layak pakai baterai selama 8,8 tahun ke depan. Hasil prediksi tersebut perlu dipahami sebagai estimasi berdasarkan pola data yang digunakan dalam penelitian dan tidak dapat dijadikan satu-satunya dasar untuk menentukan masa penggantian baterai. Verifikasi dan pengujian berkala tetap diperlukan untuk mengevaluasi kesesuaian hasil prediksi dengan kondisi aktual baterai. Oleh karena itu, pemeliharaan rutin, pemantauan kondisi sel, serta evaluasi kapasitas dan efisiensi perlu dilakukan secara berkala untuk mempertahankan keandalan baterai dalam menyuplai sistem DC.

REFERENSI

- Agned, R. (2020). Studi kapasitas baterai 110 VDC pada Gardu Induk 150 kV Bangkinang. *JOM FTEKNIK*, 3(2).
- Fajaruddin, M. (2023). Pemeliharaan baterai pada Gardu Induk GIS Listrik Medan. *Circle Archive Teknik*, 1(2), 1-10.
- Farisha Istiqlal, M., Priatna, E., & Sutisna. (2023). Analisa kapasitas baterai sebagai sumber DC pada Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV PT PLN (Persero) Tasikmalaya. *Journal of Energy and Electrical Engineering (JEEE)*, 4(2), 67-74.
- Furkan, A. (2023). Sistem pemeliharaan pada baterai 110 VDC pada Gardu Induk 150 kV Bayu Lhokseumawe PT PLN (Persero) Banda Aceh. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik*, 4(1), 1-13.
- Hardhika, H. D. A. (2022). Analisis checkup pemeliharaan Battery Capacity Test (BCT) 110 VDC di PT PLN (Persero) Gardu Induk 150 kV Jatigedong Jombang. *ALINIER: Journal of Artificial Intelligence & Applications*, 3(2), 1-8.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2020). *IEEE Std 946-2020: IEEE recommended practice for design of DC auxiliary power systems for generating stations and substations*. IEEE.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2021). *IEEE Std 450-2020: IEEE recommended practice for maintenance, testing, and replacement of vented lead-acid batteries for stationary applications*. IEEE.
- Li, Q., Liu, G., Zhang, J., Su, Z., Hao, C., He, J., & Cheng, Z. (2021). The prediction of capacity trajectory for lead-acid battery based on steep drop curve of discharge voltage and Gaussian process regression. *Electronics*, 10(19), 2425. <https://doi.org/10.3390/electronics10192425>
- Lubis, S. N. (2019). Kegagalan proteksi pada Gardu Induk 150 kV akibat suplai tegangan DC. *Sinusoida*, 19(2), 02-10.
- Meliala, S., Rijal, M., & Taufiq, T. (2021). Studi kapasitas baterai 110 Volt DC Unit I pada Gardu Induk 150 kV Bireuen. *Jurnal Energi Elektrik*, 10(2), 02-09.

- Pang, X., Zhong, S., Wang, Y., Yang, W., Zheng, W., & Sun, G. (2022). A review on the prediction of health state and serving life of lithium-ion batteries. *The Chemical Record*, 22(10), e202200131. <https://doi.org/10.1002/tcr.202200131>
- PT PLN (Persero). (2014). *Sistem supply AC/DC: Pedoman pemeliharaan sistem supply AC/DC*. PT PLN (Persero).
- Ramadhan, A. F., Naufal, A., Syafei, F., & Muzakki, D. S. (2024). Studi analisis efisiensi penggunaan baterai di Gas Insulated Substation Waru. *Journal of Energy and Electrical Engineering (JEE)*, 5(2).
- Rifa'i, A. M., & Jatmiko. (2019). *Analisis kebutuhan kapasitas baterai 110 Volt DC Gardu Induk 150 kV Bawen*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- von Bülow, F., & Meisen, T. (2023). A review on methods for state of health forecasting of lithium-ion batteries applicable in real-world operational conditions. *Journal of Energy Storage*, 57, 105978. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105978>