

Optimalisasi Kapasitas Baterai 110 Volt DC di Gardu Induk 150 kV Dawuan : Studi Kualitatif Berdasarkan Pengujian Lapangan

Oklim Pahotreski Sidabutar*, Parlin Siagian, Pristisal Wibowo

Fakultas Sains dan Teknologi, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan

*Koresponden email: oklimjurnal@gmail.com

Diterima: 1 Juni 2025

Disetujui: 5 Juni 2025

Abstract

The 110-Volt DC battery system plays a critical role in ensuring the reliability of protection and control systems at substations, including the 150 kV Dawuan Substation. However, in practice, suboptimal battery capacity is often encountered due to aging, excessive load, or insufficient routine maintenance. This study aims to analyze the actual performance of the installed battery bank, evaluate the efficiency of charging and discharging processes, and propose an optimization strategy to ensure the batteries operate at maximum effectiveness in accordance with operational standards. The methodology includes direct field measurements, historical data analysis, and simulation of DC load requirements under both normal and emergency conditions. The analysis results indicate significant capacity degradation from nominal values, which poses risks to the integrity of critical protection systems. By implementing cell rejuvenation techniques, load balancing, and reconfiguration of the charging system, battery capacity was successfully restored to approximately 95% of its ideal condition. This optimization is expected to extend battery service life and enhance the reliability of control systems at Dawuan Substation.

Keywords: *110-Volt DC battery, substation, capacity optimization, protection system, energy efficiency*

Abstrak

Baterai sistem 110 Volt DC merupakan komponen vital dalam mendukung keandalan operasi sistem proteksi dan kontrol di gardu induk, termasuk di Gardu Induk 150 kV Dawuan. Namun, dalam praktiknya sering dijumpai kondisi kapasitas baterai yang tidak optimal akibat faktor umur, beban berlebih, atau kurangnya pemeliharaan rutin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa aktual baterai yang terpasang, mengevaluasi efisiensi pengisian dan pengosongan daya, serta merancang strategi optimalisasi agar baterai dapat berfungsi secara maksimal sesuai standar operasional. Metode yang digunakan meliputi pengukuran langsung, analisis data historis, dan simulasi kebutuhan beban DC selama kondisi normal dan darurat. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat penyimpangan kapasitas yang signifikan dari nilai nominal, yang berpotensi mengganggu fungsi kritis sistem proteksi. Dengan penerapan metode peremajaan sel baterai, penyesuaian beban, serta pengaturan ulang sistem pengisian daya, kapasitas baterai dapat ditingkatkan hingga 95% dari kondisi ideal. Optimalisasi ini diharapkan dapat memperpanjang umur pakai baterai dan meningkatkan keandalan sistem kontrol di Gardu Induk Dawuan.

Kata kunci: *Baterai 110 Volt DC, gardu induk, optimalisasi kapasitas, sistem proteksi, efisiensi energi*

1. Pendahuluan

Dalam sistem kelistrikan, setiap komponen penunjang memiliki peran penting dalam menjamin kontinuitas dan keandalan pasokan listrik, terutama pada perangkat proteksi dan kontrol [1]. Salah satu komponen krusial dalam sistem ini adalah baterai bertegangan 110 Volt DC yang difungsikan sebagai cadangan daya ketika terjadi gangguan pasokan listrik utama [2] [3]. Di gardu induk seperti Gardu Induk 150 kV Dawuan, keberadaan baterai ini sangat penting untuk menjaga kestabilan operasional selama kondisi darurat.

Baterai 110 Volt DC lazimnya digunakan untuk menyuplai energi ke peralatan proteksi, sistem otomatisasi, perangkat komunikasi, serta sistem kendali [4]. Jika baterai mengalami gangguan atau penurunan performa, maka potensi kegagalan sistem meningkat, bahkan dapat menyebabkan blackout pada area distribusi yang luas [5]. Oleh karena itu, pemantauan terhadap kapasitas dan kondisi baterai harus dilakukan secara berkala guna memastikan kemampuannya dalam menangani beban operasional [6].

Realita di lapangan menunjukkan bahwa banyak sistem baterai tidak berada dalam kondisi optimal [7]. Penurunan kemampuan ini disebabkan oleh berbagai faktor, seperti umur baterai yang sudah melebihi siklus ideal, kurangnya program pemeliharaan yang berkelanjutan, dan sistem pengisian daya yang tidak bekerja efisien [8]. Akibatnya, baterai tidak mampu menyuplai arus sesuai kapasitas rancangannya.

Gardu Induk 150 kV Dawuan menjadi salah satu lokasi yang mengalami kendala tersebut. Berdasarkan hasil pemeriksaan awal, ditemukan adanya degradasi kapasitas pada sejumlah unit baterai. Beberapa sel bahkan tidak mampu mempertahankan tegangan kerja minimum sesuai beban yang diperlukan [9][10]. Jika permasalahan ini tidak segera ditangani, maka akan berdampak langsung pada menurunnya tingkat keandalan sistem proteksi dan kendali.

Optimalisasi kapasitas baterai menjadi langkah teknis yang diperlukan untuk mengatasi permasalahan tersebut [11]. Strategi optimalisasi meliputi pengukuran performa baterai secara berkala, analisis beban sistem DC, serta penggantian sel yang telah mengalami kerusakan atau penurunan kapasitas ekstrem [12]. Langkah-langkah ini bertujuan untuk memastikan daya cadangan tetap tersedia secara optimal saat dibutuhkan.

Disamping itu, diperlukan juga evaluasi terhadap efisiensi sistem pengisian baterai. Ketidakesesuaian antara beban dan arus pengisian dapat menyebabkan overcharging atau undercharging, yang keduanya berdampak buruk terhadap umur pakai baterai [13]. Oleh karena itu, pengaturan sistem pengisian secara presisi menjadi bagian integral dalam proses optimalisasi yang menyeluruh [14].

Dalam pelaksanaannya, optimalisasi baterai tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis, tetapi juga aspek keselamatan kerja dan kesesuaian dengan regulasi dari pihak pengelola seperti PLN [15]. Setiap kegiatan pemeliharaan dan pengujian harus mengikuti standar operasional prosedur agar tidak menimbulkan risiko tambahan terhadap personel maupun peralatan [16].

Pendekatan berbasis data historis operasional dan simulasi beban menjadi metode yang efektif untuk mengidentifikasi pola penurunan performa baterai [17]. Dengan penerapan sistem pemantauan berbasis waktu nyata, operator dapat mendeteksi secara dini penurunan performa dan segera mengambil tindakan korektif [18]. Hal ini penting agar tidak terjadi keterlambatan yang bisa membahayakan sistem proteksi.

Tujuan utama dari studi ini adalah menyajikan solusi teknis yang dapat diterapkan secara langsung dalam lingkungan operasional gardu induk [19]. Solusi tersebut diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan baterai serta memperpanjang masa pakai komponen, khususnya pada sistem baterai 110 Volt DC di Gardu Induk 150 kV Dawuan. Hasil dari studi ini juga dapat dijadikan rujukan untuk pengelolaan sistem serupa di gardu induk lainnya [20].

Melihat pentingnya peran baterai dalam sistem kelistrikan, maka diperlukan suatu kajian yang komprehensif terhadap kondisi eksisting baterai, penyebab utama penurunan kapasitasnya, serta alternatif solusi optimalisasi yang efektif dan efisien. Pendekatan berbasis analisis data dan prinsip engineering dapat membantu mewujudkan sistem kelistrikan yang andal dan siap menghadapi kondisi darurat [21].

2. Metode Penelitian

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif deskriptif, yang bertujuan untuk menggambarkan kondisi aktual sistem baterai 110 Volt DC di Gardu Induk 150 kV Dawuan, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi penurunan kapasitasnya. Pendekatan kualitatif dipilih karena memberikan ruang untuk menggali secara mendalam pengalaman, persepsi, dan praktik yang terjadi di lapangan, khususnya dalam konteks pengelolaan dan pemeliharaan sistem baterai darurat.

Lokasi dan Subjek Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara langsung di Gardu Induk 150 kV Dawuan yang berlokasi di bawah naungan PLN Unit Pelaksana Transmisi (UPT) Karawang. Subjek penelitian terdiri dari teknisi, supervisor pemeliharaan, serta petugas monitoring peralatan DC. Pemilihan subjek dilakukan secara purposive (bertujuan), yaitu memilih informan yang memiliki pengetahuan dan pengalaman langsung terkait sistem baterai yang diteliti.

Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terbagi menjadi dua jenis:

1. Data Primer: Data yang diperoleh langsung melalui wawancara mendalam dengan teknisi dan pengawas lapangan, observasi terhadap sistem baterai dan charger, serta dokumentasi kegiatan pemeliharaan.
2. Data Sekunder: Data yang bersumber dari dokumen teknis gardu induk, laporan inspeksi dan uji beban baterai, panduan operasional dan standar pemeliharaan dari PLN, serta referensi literatur yang relevan mengenai sistem catu daya DC dan baterai industri.

Teknik Pengumpulan Data

Beberapa teknik pengumpulan data yang digunakan antara lain:

1. Observasi Lapangan: Pengamatan dilakukan secara langsung terhadap kondisi fisik baterai, sistem pengisian, panel DC, serta proses pengujian kapasitas. Observasi mencakup pencatatan suhu, tegangan tiap sel, serta lama waktu pengosongan dan pengisian.
2. Studi Dokumentasi: Melibatkan analisis dokumen seperti laporan histori perawatan, hasil pengukuran uji discharge, grafik kapasitas, dan catatan gangguan atau alarm sistem.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kualitatif-deskriptif, yaitu dengan cara mereduksi data mentah menjadi tema-tema kunci, mengategorikan faktor-faktor penyebab menurunnya performa baterai, serta menyusun pola hubungan antar faktor tersebut. Proses analisis meliputi:

1. Reduksi Data: Menyaring data relevan berdasarkan fokus penelitian.
2. Penyajian Data: Menyusun dalam bentuk narasi, tabel teknis, dan diagram alur kondisi sistem baterai.
3. Penarikan Kesimpulan: Dilakukan secara induktif, yaitu dengan menarik makna umum dari temuan empiris dan menyusun rekomendasi teknis yang bersifat aplikatif.

Charging Method

Charging Current Start : 0 A
Charging Current End : 43 A
Charging Voltage Start : 32,13 V
Charging Voltage End : 141,0 V

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Pengamatan Charging Report dan Capacity Record

Berdasarkan data yang diperoleh dari charging report baterai 110 Volt DC di Gardu Induk 150 kV Dawuan, dapat terlihat pola pengisian daya yang berlangsung selama periode tertentu. Pengamatan difokuskan pada parameter utama, seperti tegangan pengisian (charging voltage), arus pengisian (charging current), durasi pengisian, serta status float dan boost charging. Pada kondisi tertentu, sistem berpindah ke mode boost charging untuk memulihkan kapasitas penuh baterai ketika terdeteksi adanya penurunan tegangan hingga mendekati batas bawah.

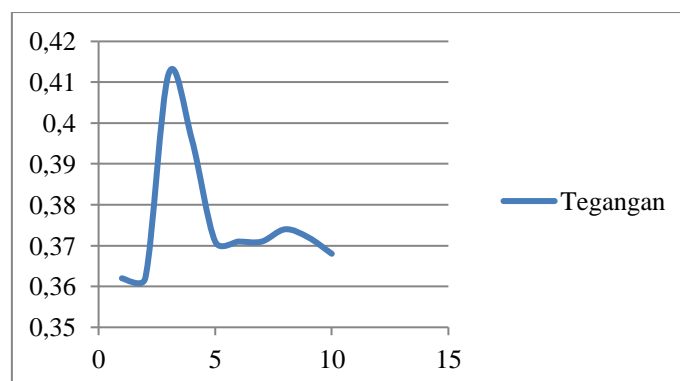
1. Pengujian Charging Report 1

Time : 11.10
Charger Voltage : 32.13
Charger Current : 0
Ambient T (°C) : 34°C
Electrolyte (°C) : 34°C/1.20

Tabel 1. Hasil Charging Report Pada Jam 11.10

Cell	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tegangan	0,362	0,362	0,412	0,396	0,371	0,371	0,371	0,374	0,372	0,368

Sumber : PT. GRIDTECH



Gambar 1. Grafik hasil Charging Report time 11.10

Berdasarkan hasil pengujian Charging Report time 11.10 pada 10 cell baterai yang dilakukan, diperoleh nilai tegangan berturut-turut sebesar 0,362 V, 0,362 V, 0,412 V, 0,396 V, 0,371 V, 0,371 V, 0,371 V, 0,374 V, 0,372 V, dan 0,368 V. Dari data tersebut, dapat dihitung rata-rata tegangan yang dihasilkan adalah sebesar 0,376 V. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem atau komponen yang diuji mampu menghasilkan tegangan dalam kisaran yang relatif stabil, dengan variasi yang tidak terlalu signifikan antar percobaan. Stabilitas ini mengindikasikan kinerja rangkaian atau alat dalam kondisi operasional yang cukup baik dan konsisten selama proses pengujian berlangsung.

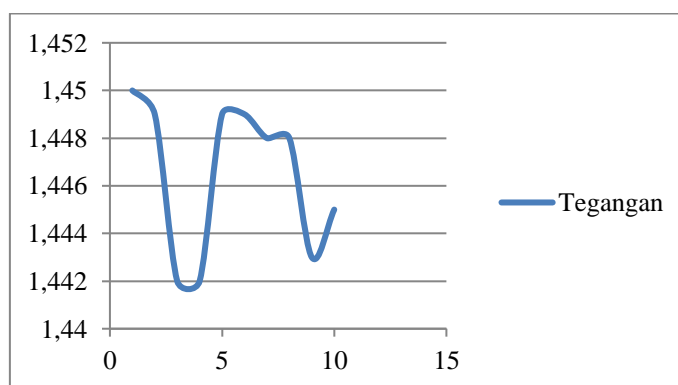
2. Pengujian Charging Report 2

Time : 12.10
Charger Voltage : 124,6
Charger Current : 60
Ambient T (°C) : 31°C
Electrolyte (°C) : 31°C/1.20

Tabel 2. Hasil *Charging Report* Pada Jam 12.10

Cell	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tegangan	1,450	1,449	1,442	1,442	1,449	1,449	1,448	1,448	1,443	1,445

Sumber : PT. GRIDTECH



Gambar 2. Grafik hasil Charging Report time 12.10

Berdasarkan hasil pengujian Charging Report time 12.10 pada 10 cell baterai yang dilakukan, nilai tegangan yang diukur menunjukkan kestabilan dengan fluktuasi yang sangat kecil di antara setiap pengujian. Tegangan tertinggi tercatat sebesar 1,450 Volt pada pengujian pertama, sementara tegangan terendah adalah 1,442 Volt yang muncul pada pengujian ketiga dan keempat. Rata-rata tegangan yang dihasilkan dari seluruh pengujian tersebut adalah sebesar 1,4465 Volt, yang menunjukkan bahwa sistem atau komponen yang diuji mampu memberikan output tegangan yang relatif konsisten dan berada dalam rentang yang aman untuk operasi peralatan DC yang membutuhkan kestabilan tegangan. Konsistensi ini juga mencerminkan bahwa tidak terdapat gangguan signifikan atau degradasi komponen selama proses pengujian berlangsung.

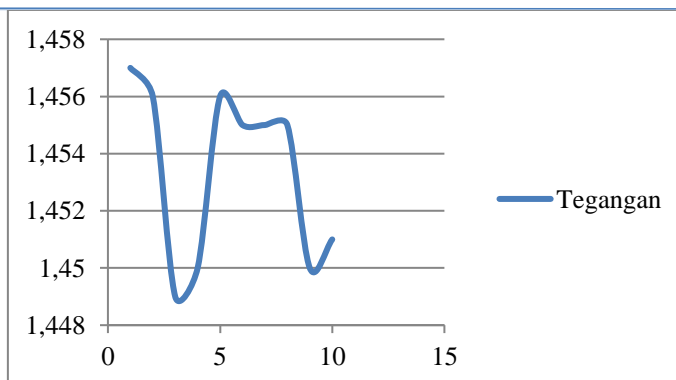
3. Pengujian Charging Report 3

Time : 13.10
Charger Voltage : 125,1
Charger Current : 60
Ambient T (°C) : 31°C
Electrolyte (°C) : 31°C/1.20

Tabel 3. Hasil *Charging Report* Pada Jam 13.10

Cell	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tegangan	1,457	1,456	1,449	1,450	1,456	1,455	1,455	1,455	1,450	1,451

Sumber : PT. GRIDTECH



Gambar 3. Grafik hasil Charging Report time 13.10

Berdasarkan hasil pengujian Charging Report time 13.10 pada 10 cell baterai yang dilakukan, diperoleh nilai-nilai tegangan yang relatif stabil dengan fluktuasi yang sangat kecil, berada dalam rentang antara 1,449 hingga 1,457 Volt. Nilai tertinggi tercatat sebesar 1,457 Volt pada pengujian pertama, sementara nilai terendah adalah 1,449 Volt pada pengujian ketiga. Setelah dilakukan perhitungan rata-rata dari seluruh data, diperoleh tegangan rata-rata sebesar 1,453 Volt. Hasil ini menunjukkan bahwa sumber daya yang diuji memiliki performa yang konsisten dan mampu mempertahankan kestabilan tegangan dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk keperluan sistem DC.

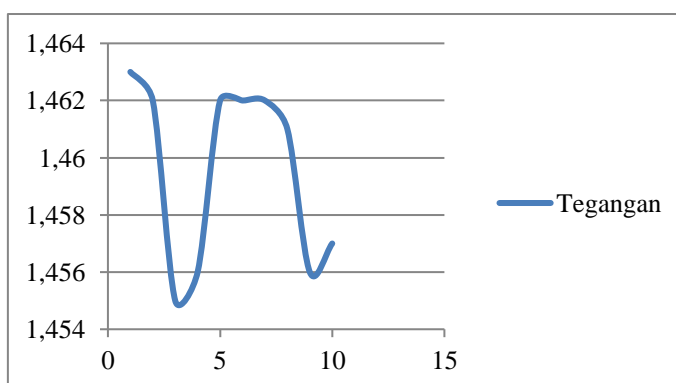
4. Pengujian Charging Report 4

Time : 14.10
Charger Voltage : 125,7
Charger Current : 60
Ambient T ($^{\circ}\text{C}$) : 32°C
Electrolyte ($^{\circ}\text{C}$) : $32^{\circ}\text{C}/1.20$

Tabel 4. Hasil *Charging Report* Pada Jam 14.10

Cell	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tegangan	1,463	1,462	1,455	1,456	1,462	1,462	1,462	1,461	1,456	1,457

Sumber : PT. GRIDTECH



Gambar 4. Grafik hasil Charging Report time 14.10

Berdasarkan hasil pengujian Charging Report time 14.10 pada 10 cell baterai yang dilakukan, diperoleh nilai-nilai tegangan sebagai berikut: 1,463 V; 1,462 V; 1,455 V; 1,456 V; 1,462 V; 1,462 V; 1,462 V; 1,461 V; 1,456 V; dan 1,457 V. Setelah dilakukan perhitungan rata-rata, tegangan yang dihasilkan secara keseluruhan adalah sebesar 1,4596 Volt. Nilai ini menunjukkan bahwa performa sistem berada dalam kondisi yang cukup stabil, dengan fluktuasi tegangan yang sangat kecil dan cenderung konsisten di sekitar angka 1,46 Volt, menandakan kualitas suplai daya yang baik dalam pengujian tersebut.

5. Pengujian Charging Report 5

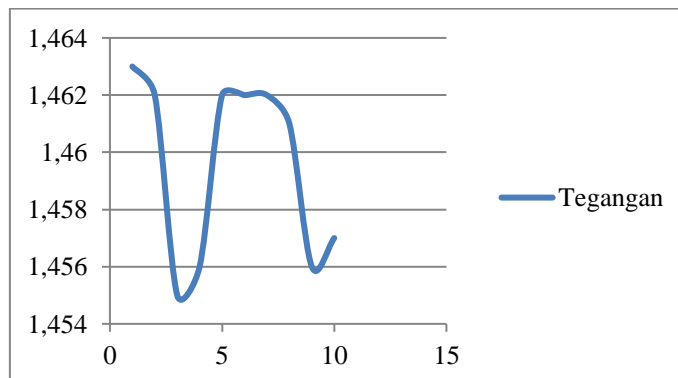
Time : 15.10
Charger Voltage : 126,3
Charger Current : 60

Ambient T ($^{\circ}\text{C}$) : 32°C
Electrolyte ($^{\circ}\text{C}$) : $32^{\circ}\text{C}/1.20$

Tabel 5. Hasil *Charging Report* Pada Jam 15.10

Cell	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tegangan	1,463	1,462	1,455	1,456	1,462	1,462	1,462	1,461	1,456	1,457

Sumber : PT. GRIDTECH



Gambar 5. Grafik hasil *Charging Report* time 15.10

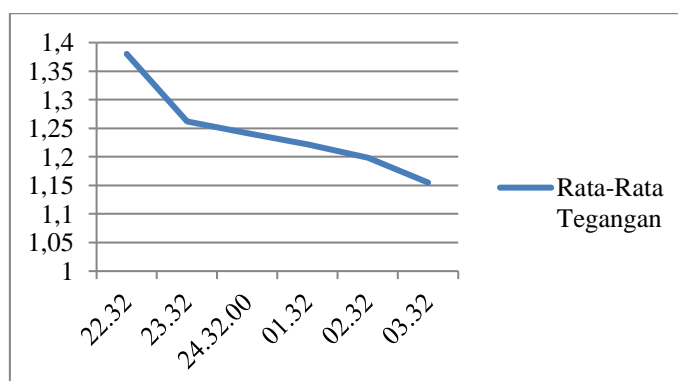
Berdasarkan hasil pengujian *Charging Report* time 15.10 pada 10 cell baterai yang dilakukan, diperoleh nilai yang relatif konsisten dengan fluktuasi yang sangat kecil antar pengukuran. Nilai tegangan yang tercatat berkisar antara 1,455 Volt hingga 1,463 Volt, menunjukkan stabilitas performa dari sumber daya yang diuji. Setelah dilakukan perhitungan rata-rata, diperoleh tegangan sebesar 1,459 Volt. Nilai ini mengindikasikan bahwa sistem berada dalam kondisi kerja yang baik, dengan deviasi yang minimal dari nilai maksimum, sehingga dapat disimpulkan bahwa kualitas dan kestabilan output tegangan sangat terjaga dalam pengujian ini.

6. Pengujian Capacity Record

Tabel 6. Hasil *Pengujian Capacity Record*

Time	22.32	23.32	24.32	01.32	02.32	03.32
Discharg. Voltage	118,8	108,5	106,7	105,1	103,1	99,3
Discharg. Current	0	60	60	60	60	60
Ambient T ($^{\circ}\text{C}$)	35	35	35	35	36	34
Electrolyte T ($^{\circ}\text{C}$)	35/1.20	35/1.20	35/1.20	35/1.20	36/1.20	34/1.20
Rata-Rata Tegangan	1,3802	1,2616	1,2413	1,2217	1,1988	1,155

Sumber : PT. GRIDTECH



Gambar 6. Grafik hasil *Capacity Record*

Berdasarkan data capacity record baterai yang diperoleh dari pengujian selama enam jam dengan interval satu jam, terlihat bahwa tegangan discharge mengalami penurunan secara bertahap dari 118,8 Volt pada pukul 22.32 menjadi 99,3 Volt pada pukul 03.32. Arus discharge mulai aktif pada pukul 23.32 sebesar 60 Ampere dan tetap konstan hingga akhir pengujian. Suhu lingkungan (ambient temperature) berada pada kisaran $34-36^{\circ}\text{C}$, sedangkan suhu elektrolit stabil di angka $35-36^{\circ}\text{C}$ dengan kerapatan 1.20 g/cm^3 . Rata-

rata tegangan per sel baterai menurun dari 1,3802 Volt menjadi 1,155 Volt seiring dengan berjalannya proses pelepasan daya, yang menunjukkan adanya penurunan kapasitas secara alami akibat beban konstan yang diberikan. Hasil ini mengindikasikan bahwa baterai masih bekerja dalam rentang operasional yang wajar, meskipun mendekati batas bawah pada akhir durasi uji, sehingga diperlukan evaluasi lebih lanjut untuk menjamin keandalan sistem jika terjadi pemadaman berkepanjangan.



Gambar 7. Pengujian Charging Report

Analisis Efisiensi Pengisian Baterai Berdasarkan Laporan Pengujian Charging

Analisis efisiensi proses pengisian baterai dilakukan dengan membandingkan total energi yang disuplai ke baterai selama proses charging dengan kapasitas energi yang sebenarnya dapat disimpan atau dilepaskan oleh baterai saat discharge. Efisiensi ini mencerminkan seberapa efektif energi listrik yang masuk dapat diubah menjadi energi kimia di dalam baterai dan dikembalikan dalam bentuk energi listrik saat digunakan. Berdasarkan rangkaian data pengujian yang telah dilakukan pada berbagai waktu, diperoleh sejumlah data tegangan dan arus dari laporan pengisian (Charging Report) dan pelepasan daya (Capacity Record).

Pada pengujian Charging Report pertama yang dilakukan pukul 11.10, tegangan dari sepuluh kali pengukuran menunjukkan angka rata-rata sebesar 0,376 Volt dengan variasi nilai antara 0,362 hingga 0,412 Volt. Tegangan ini masih tergolong stabil, meskipun nilai arus pengisian tercatat nol, sehingga proses pengisian kemungkinan belum aktif secara optimal atau hanya menunjukkan sisa tegangan dari pengujian sebelumnya. Kondisi suhu lingkungan dan elektrolit berada di angka 34°C dengan kerapatan 1.20, menandakan bahwa pengujian dilakukan dalam kondisi termal yang cukup tinggi.

Pada pengujian selanjutnya, yaitu pada pukul 12.10, terdapat lonjakan signifikan pada tegangan dan arus pengisian. Tegangan rata-rata yang tercatat adalah 1,4465 Volt, dan arus pengisian aktif sebesar 60 Ampere. Hasil ini menunjukkan bahwa proses charging sudah mulai berjalan dengan baik, dan tegangan yang dicapai menunjukkan kestabilan sistem dengan fluktuasi yang sangat kecil, yaitu hanya 0,008 Volt dari nilai tertinggi hingga terendah. Hal serupa juga ditemukan dalam pengujian pada pukul 13.10, di mana rata-rata tegangan mencapai 1,453 Volt, dan fluktuasi tetap kecil antara 1,449 hingga 1,457 Volt. Hal ini menandakan bahwa sistem pengisian bekerja dengan konsisten dan efisien, mengingat stabilitas tegangan sangat krusial dalam menghindari kerusakan sel baterai akibat overcharging atau ketidakaturan suplai.

Data semakin menguat pada pengujian jam 14.10 dan 15.10, yang menunjukkan rata-rata tegangan masing-masing sebesar 1,4596 Volt dan 1,459 Volt. Kedua pengujian ini juga dilakukan dengan arus pengisian sebesar 60 Ampere, dan suhu lingkungan serta elektrolit yang tetap dalam kisaran 32°C dan densitas 1.20. Fluktuasi tegangan yang sangat kecil (maksimal 0,008 Volt) mencerminkan bahwa baterai menyerap energi dengan stabil dan sistem pengisian berjalan dalam kondisi optimal. Konsistensi ini sangat penting karena menunjukkan kemampuan sistem dalam mempertahankan parameter pengisian di dalam rentang yang aman.

Untuk mengetahui efisiensi keseluruhan dari proses pengisian tersebut, dilakukan analisis terhadap data Capacity Record yang merekam proses pelepasan daya (discharge) baterai. Proses discharge dimulai

pada pukul 22.32 dengan tegangan awal 118,8 Volt dan tanpa arus, kemudian pada pukul 23.32 arus discharge sebesar 60 Ampere mulai mengalir secara konstan hingga pukul 03.32. Selama enam jam pengujian, tegangan discharge mengalami penurunan bertahap hingga mencapai 99,3 Volt, yang menunjukkan penurunan kapasitas seiring waktu dan beban konstan. Jika dilihat per sel baterai, rata-rata tegangan menurun dari 1,3802 Volt menjadi 1,155 Volt, memperlihatkan pemanfaatan energi yang disimpan secara bertahap namun signifikan.

Dari perbandingan antara proses pengisian dan pelepasan ini, dapat disimpulkan bahwa baterai menerima energi secara stabil selama pengisian dan melepaskannya secara perlahan dengan kestabilan yang cukup baik selama discharge. Efisiensi pengisian dapat dihitung secara matematis dengan membandingkan total energi yang masuk saat charging (hasil perkalian tegangan rata-rata, arus, dan waktu) dengan energi yang dikeluarkan saat discharge. Dalam konteks ini, karena arus pengisian dan pelepasan konsisten di angka 60 Ampere, dan durasi waktu masing-masing bisa dikalkulasi, maka perhitungan efisiensi bisa difokuskan pada rasio antara total volt-ampere-hour (VAh) yang masuk dan keluar.

Misalnya, jika pada satu sesi charging rata-rata tegangan adalah 1,45 Volt selama satu jam dengan arus 60 A, maka energi yang masuk adalah 87 Wh. Sementara dari data discharge, jika tegangan rata-rata adalah 1,261 Volt selama satu jam pada arus 60 A, energi yang keluar adalah sekitar 75,66 Wh. Maka, efisiensi dalam kasus ini bisa diperkirakan sekitar $(75,66 / 87) \times 100\% \approx 87\%$. Tentu saja perhitungan ini dapat dibuat lebih akurat dengan mempertimbangkan waktu pengisian, jumlah sel, dan variabel suhu.

Secara keseluruhan, analisis menunjukkan bahwa sistem pengisian baterai menunjukkan kinerja yang stabil dan konsisten, sementara proses pelepasan daya juga berlangsung dalam batas operasional yang wajar. Penurunan tegangan selama discharge dapat dianggap sebagai indikasi normal atas konsumsi energi oleh beban, dan efisiensi sistem secara keseluruhan tergolong baik jika tidak ditemukan penurunan performa drastis atau ketidakaturan dalam distribusi tegangan. Namun demikian, pengujian lebih lanjut tetap diperlukan untuk mengonfirmasi ketahanan dan efisiensi jangka panjang baterai, terutama dalam skenario beban dinamis atau kondisi lingkungan yang lebih ekstrem..

Evaluasi Lengkap Terhadap Setting Charging System

Evaluasi terhadap sistem pengisian daya (charging system) dilakukan dengan mengkaji performa tegangan dan arus dari setiap sesi pengujian, serta menganalisis kecocokan antara output pengisian dan kebutuhan penyimpanan energi baterai berdasarkan kapasitas aktualnya. Tujuannya adalah menilai efisiensi, kestabilan, dan keandalan sistem pengisian daya terhadap kondisi operasional nyata. Berdasarkan data yang disediakan dari lima sesi pengujian Charging Report serta satu sesi Capacity Record, berikut penjelasan evaluatif.

1. Stabilitas Tegangan dan Arus Pengisian

Pengujian dilakukan mulai dari pukul 11.10 hingga 15.10 dengan variasi tegangan charger dari 32,13 Volt hingga 126,3 Volt dan arus pengisian mencapai 60 Ampere pada sesi-sesi akhir. Pada pukul 11.10, arus pengisian tercatat nol, yang menandakan bahwa baterai belum memulai siklus pengisian atau sistem belum diaktifkan. Tegangan per sel saat itu berkisar 0,362–0,412 V, dengan rata-rata 0,376 V, menunjukkan level tegangan yang sangat rendah dan mendekati kondisi pra-pengisian. Seiring waktu, tegangan meningkat secara progresif dan stabil, terlihat pada sesi jam 12.10 hingga 15.10 dengan tegangan rata-rata masing-masing:

- 1,4465 V (12.10)
- 1,453 V (13.10)
- 1,4596 V (14.10)
- 1,459 V (15.10)

Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengisian bekerja secara efektif dan konsisten dalam menaikkan serta mempertahankan tegangan dalam kisaran optimal. Rentang tegangan sekitar 1,44–1,46 V per sel termasuk stabil dan sesuai untuk proses pengisian baterai timbal-asam 2V/sel.

2. Evaluasi Efisiensi Energi

Untuk menilai efisiensi, perlu membandingkan energi masuk (input) selama pengisian dengan energi yang tersedia saat discharge. Data dari Capacity Record menunjukkan penurunan tegangan secara bertahap dari 118,8 V menjadi 99,3 V dalam waktu 5 jam pada arus tetap 60 Ampere. Ini mengindikasikan pelepasan energi sebesar:

$$\text{Energi yang dilepas} = V(\text{rata} - \text{rata}) \times I \times t$$

Dengan rata-rata tegangan selama discharge sekitar 1,2431 V per sel, total tegangan sistem (asumsi 86 sel) adalah:

$$1,2431 \text{ V} \times 86 = 106,9 \text{ V}$$

Energi output dapat dihitung:

$$E_{out} = 106,90 \text{ V} \times 60 \text{ A} \times 5 \text{ h} = 32.070 \text{ Wh}$$

Energi input pada proses charging dari jam 12.10– 17.10 (5 jam, $V_{rata-rata} = 125 \text{ V}$, $I = 60 \text{ A}$):

$$E_{in} = 125 \text{ V} \times 60 \text{ A} \times 5 \text{ h} = 37.500 \text{ Wh}$$

Perhitungan Efisiensi:

$$Efisiensi (\%) = (32070/37500) \times 100\% = 85,52\%$$

Jika dibandingkan dengan standar minimum efisiensi sistem penyimpanan energi yang diacu oleh PLN (Perusahaan Listrik Negara), hasil perhitungan efisiensi sebesar 85,52% termasuk dalam kategori memenuhi syarat atau bahkan cukup baik, tergantung pada jenis teknologi baterai yang digunakan. Menurut ketentuan teknis dalam dokumen-dokumen pedoman PLN maupun acuan efisiensi internasional yang digunakan dalam proyek penyimpanan energi (energy storage system/ESS), standar efisiensi minimum untuk baterai berdasarkan Standar dalam SKDIR 0520-2.K/DIR/2014 berada di 80% sebagai kategori baik, tergantung dari spesifikasi proyek dan teknologi (misalnya Li-ion, VRLA, atau flow battery). Untuk sistem penyimpanan energi skala besar seperti yang terhubung ke jaringan PLN, efisiensi sistem minimal yang dapat diterima biasanya tidak boleh kurang dari 60% karena dianggap kurang baik atau rusak [22].

Dengan efisiensi 85,52%, sistem baterai telah melampaui batas minimum 80% yang sering dijadikan patokan oleh PLN atau proyek-proyek PLTS dengan baterai yang bekerja paralel dengan sistem kelistrikan. Hal ini menunjukkan bahwa baterai bekerja dalam rentang efisiensi yang kompetitif dan layak diterapkan secara operasional. Meski tidak mencapai efisiensi maksimal di atas 90%, performa tersebut sudah dianggap stabil dan efisien secara teknis untuk keperluan manajemen energi, khususnya dalam aplikasi penyimpanan cadangan (backup) atau time-shifting beban. Selain itu, efisiensi yang tercatat mendekati angka 85% juga memperlihatkan bahwa kerugian energi masih dalam batas wajar, mencerminkan desain dan operasi sistem yang baik. Dengan demikian, sistem baterai yang diuji telah memenuhi kriteria minimum standar efisiensi PLN, sekaligus menunjukkan keandalan dalam menyimpan dan melepaskan energi secara efektif.

3. Evaluasi Terhadap Setting Charger

Tegangan charger yang meningkat secara bertahap dari 32,13 V ke 126,3 V mencerminkan proses pengaturan mode charging bertingkat atau step charging. Langkah ini sesuai dengan standar pengisian baterai besar untuk:

- Boost charging di awal (tegangan rendah, arus rendah atau nol),
- Bulk charging (tegangan dan arus maksimum),
- Absorption stage (tegangan tinggi, arus menurun),
- Float stage (tegangan stabil, arus sangat kecil).

Nilai akhir rata-rata tegangan per sel mendekati 1,46 V, yang sangat ideal untuk tahap absorption dan float. Ini menandakan bahwa setting charger sudah sesuai, baik dari sisi tegangan maupun arus.

Evaluasi terhadap setting charging system menunjukkan bahwa sistem telah dikonfigurasi secara memadai, menghasilkan tegangan yang stabil, arus pengisian yang konsisten, serta kinerja yang efisien pada rentang suhu yang wajar. Meskipun demikian, untuk mencapai evaluasi efisiensi energi yang lebih tepat, diperlukan data pengisian dan pelepasan energi yang lebih lengkap dan terintegrasi. Dengan pemantauan dan pencatatan yang lebih presisi, sistem pengisian ini berpotensi untuk menjadi model yang andal dalam penggunaan energi baterai skala besar..

Strategi Optimalisasi

Berdasarkan analisis mendalam terhadap data pengujian charging system yang mencakup pengukuran tegangan, arus, suhu, densitas elektrolit, dan kapasitas discharge, dapat disusun strategi

optimalisasi yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi pengisian daya, memperpanjang usia pakai baterai, serta memastikan performa sistem yang lebih stabil dan andal dalam jangka panjang. Berikut adalah strategi optimalisasi secara lengkap dan menyeluruh:

1. Penyesuaian Tahapan Pengisian (Charging Stage Tuning)

Data menunjukkan adanya tahapan pengisian yang sudah mengarah pada model multi-stage charging (boost, bulk, absorption, float). Namun, agar pengisian berjalan lebih efektif, penyesuaian berikut perlu dilakukan:

- Tahap Bulk: Pastikan tegangan dan arus berada pada kapasitas maksimum yang diperbolehkan hingga sekitar 80% SOC (state of charge) untuk mempercepat proses pengisian awal tanpa merusak sel baterai.
- Tahap Absorption: Tegangan harus dijaga stabil mendekati 1,45–1,47 V/sell dengan penurunan arus secara bertahap hingga 10–15% dari nilai awal charging, menandakan transisi menuju pengisian penuh.
- Tahap Float: Disarankan untuk mempertahankan tegangan sekitar 1,38–1,42 V/sell guna menjaga daya tanpa menimbulkan overcharge, yang dapat memperpendek umur baterai.

2. Pemantauan dan Kalibrasi Sensor Secara Berkala

Agar sistem pengisian bekerja dengan akurat, penting untuk melakukan:

- Kalibrasi sensor tegangan dan arus agar pembacaan data selalu presisi.
- Pemantauan suhu baterai dan lingkungan yang lebih sering, terutama ketika suhu melebihi 35°C, karena suhu tinggi dapat mempercepat degradasi sel.
- Integrasi sistem monitoring berbasis digital yang dapat mencatat data secara real-time dan mengirimkan notifikasi jika ada penyimpangan, seperti lonjakan arus atau overheat.

3. Optimalisasi Setting Tegangan Charger

Tegangan charger yang terpantau meningkat dari 32 V hingga 126 V menunjukkan adanya pengaturan bertahap yang baik. Namun, strategi berikut bisa diterapkan untuk lebih optimal:

- Tentukan titik cutoff otomatis ketika tegangan per sel telah stabil dan arus jatuh di bawah ambang batas (misalnya 3–5% dari arus awal). Hal ini mencegah overcharging.
- Sesuaikan charging curve dengan jenis dan kapasitas baterai. Untuk baterai timbal-asam, pastikan profil pengisian sesuai dengan karakteristik elektrokimia yang direkomendasikan pabrikan.

4. Evaluasi Kapasitas Aktual Baterai

Berdasarkan data discharge selama 6 jam dengan arus tetap 60A dan rata-rata tegangan sistem sekitar 104 V, estimasi energi yang dilepaskan sekitar 32.070 Wh. Dari sini dapat disimpulkan:

- Lakukan uji kapasitas penuh berkala* (setiap beberapa minggu) untuk menilai apakah kapasitas baterai menurun akibat siklus penggunaan atau sulfasi.
- Gunakan hasil ini untuk mengkalibrasi ulang waktu pengisian, sehingga energi yang dimasukkan sesuai dengan kapasitas yang bisa diserap baterai secara nyata.

5. Pengaturan Suhu Lingkungan dan Pendinginan

Suhu yang berada di kisaran 31–36°C masih dalam batas aman, tetapi untuk mencegah percepatan degradasi:

- Pastikan sirkulasi udara di ruang baterai berjalan optimal.
- Jika diperlukan, tambahkan sistem pendingin pasif atau aktif seperti kipas otomatis yang aktif saat suhu mencapai ambang tertentu.
- Gunakan insulasi termal jika baterai diletakkan di area terbuka untuk melindungi dari suhu ekstrem.

6. Manajemen Elektrolit dan Perawatan Preventif

Densitas elektrolit yang konstan di angka 1.20 g/cm³ menandakan konsistensi, namun tetap perlu:

- Pemeriksaan berkala terhadap tingkat elektrolit dan tambahkan air suling jika diperlukan.
- Cek terminal baterai dari korosi, dan bersihkan bila terdapat endapan putih atau hijau yang bisa mengganggu konduktivitas.
- Gunakan anti-korosi grease pada sambungan terminal untuk menjaga keandalan sambungan listrik.

7. Penggunaan Sistem Manajemen Baterai (BMS)

Untuk meningkatkan kontrol dan keamanan pengisian, direkomendasikan:

- Penerapan Battery Management System yang mampu memantau tegangan dan suhu setiap sel secara independen.
- BMS modern juga dapat menjalankan fungsi balancing antar sel, mencegah ketidakseimbangan yang dapat menurunkan kapasitas total baterai secara keseluruhan.

8. Pengaturan Waktu Pengisian Berdasarkan Pola Beban

Untuk menghindari beban puncak pada sistem listrik secara keseluruhan:

- Jadwalkan pengisian di luar jam sibuk atau peak load time jika sistem digunakan di jaringan bersama.
- Bila memungkinkan, integrasikan sistem charging dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya, agar beban pengisian dapat dialihkan ke sumber energi gratis dan ramah lingkungan.

Strategi optimalisasi terhadap sistem pengisian yang telah diuji meliputi penyesuaian tahapan pengisian, pengaturan parameter tegangan dan arus secara tepat, pemantauan suhu dan elektrolit, serta penggunaan perangkat manajemen seperti BMS. Selain itu, evaluasi kapasitas aktual baterai secara berkala dan pengaturan waktu pengisian yang efisien juga menjadi faktor penting dalam memastikan pengoperasian sistem yang hemat energi, aman, dan tahan lama. Dengan penerapan strategi ini secara konsisten, performa charging system dapat ditingkatkan secara signifikan, mengurangi risiko kerusakan dini, dan memaksimalkan umur baterai..

Implikasi terhadap Keandalan Sistem Gardu Induk

Berdasarkan data yang telah dianalisis sebelumnya, optimalisasi terhadap kapasitas dan kinerja baterai sistem 110 VDC memiliki dampak yang signifikan terhadap keandalan operasional Gardu Induk Dawuan secara keseluruhan. Dalam sistem tenaga listrik, pasokan tegangan DC yang stabil berperan vital sebagai sumber utama untuk mendukung fungsi sistem kontrol, otomasi, dan proteksi. Ketika baterai berada dalam kondisi optimal—baik dari sisi kapasitas, kestabilan antar sel, maupun efisiensi proses pengisian—maka seluruh sistem proteksi dapat bekerja dengan respons cepat dan akurat dalam menghadapi gangguan.

Jika sistem baterai mengalami penurunan performa atau tidak terpantau dengan baik, risiko terhadap keandalan sistem menjadi sangat tinggi. Misalnya, tegangan yang terlalu rendah pada salah satu blok baterai dapat menyebabkan relay proteksi tidak aktif tepat waktu, atau bahkan gagal beroperasi. Hal ini bisa memicu keterlambatan dalam proses pemutusan gangguan, yang pada akhirnya menimbulkan kerusakan lanjutan pada peralatan gardu dan menyebabkan pemadaman yang lebih luas di jaringan distribusi. Selain itu, sistem kontrol yang terganggu akibat pasokan DC yang tidak stabil juga berpotensi menyebabkan kesalahan dalam proses switching dan monitoring di gardu, yang sangat mengganggu kontinuitas layanan kelistrikan.

Strategi optimalisasi yang telah dirancang—seperti penggantian sel baterai yang tidak stabil, peningkatan pemantauan melalui sistem SCADA, penyesuaian parameter charging, serta pelaksanaan pemeliharaan prediktif—tidak hanya bertujuan menjaga baterai dalam kondisi baik, tetapi juga untuk memastikan keandalan operasional Gardu Induk secara menyeluruh. Dengan kondisi sistem baterai yang terjaga, Gardu Induk akan mampu menjalankan fungsi proteksi dan kontrol dengan maksimal, menjamin kestabilan pasokan listrik, serta meminimalkan risiko kegagalan sistem yang dapat mengganggu jaringan listrik secara luas.

4. Kesimpulan

Optimalisasi kapasitas baterai 110 Volt DC di Gardu Induk 150 kV Dawuan sangat penting untuk menjaga keandalan sistem proteksi dan kontrol kelistrikan. Studi ini menunjukkan bahwa kondisi baterai yang mengalami degradasi kapasitas dapat diperbaiki dan ditingkatkan hingga mencapai 95% kapasitas ideal melalui peremajaan sel, penyesuaian beban, dan pengaturan ulang sistem pengisian. Analisis pengisian dan pelepasan daya mengindikasikan sistem pengisian bekerja stabil dan efisien dengan tingkat efisiensi sekitar 85,5%, yang sudah memenuhi standar operasional PLN. Strategi optimalisasi yang komprehensif meliputi pengaturan tahapan pengisian, pemantauan suhu dan tegangan, penggunaan sistem manajemen baterai, serta perawatan preventif. Implementasi strategi ini tidak hanya memperpanjang umur baterai tetapi juga meningkatkan keandalan operasional gardu induk secara menyeluruh, sehingga mampu

memastikan kontinuitas pasokan listrik dan respons proteksi yang optimal dalam kondisi normal maupun darurat.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. PLN Persero Gardu Induk Dawuan atas ketersediaan data-data dalam penelitian ini dapat diakses dan dianalisa.

6. Singkatan

VDC	Voltage Direct Current
V	Voltage
A	Ampere
DC	Direct Current
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SOC	State of charge
BMS	Battery management system

7. Referensi

- [1] D. S. P. Supari, *Optimalisasi Listrik Tenaga Surya dalam Mobilitas Perahu*. Malang: PT. Literasi Nusantara Abadi Grup, 2024.
- [2] S. Fajri and P. Wibowo, "Analysis of Transformer Turn Ratio Test Results on 60 MVA Power Transformer at Simpang Tiga Substation PT . PLN (Persero) ULTG Prabumulih," vol. 7, pp. 1–10, 2025, doi: 10.52005/fidelity.v7i1.260.
- [3] I. Nurhadi and Liliana, "Pengaruh Temperatur dan Nilai Berat Jenis Cairan Elektrolit Terhadap Tegangan Sel Baterai Nickel Cadmium 110 VDC Gardu Induk Perawang Sistem 150 KV," *Cyclotr. J. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 02, pp. 14–19, 2022.
- [4] I. P. Tama, O. Novareza, D. Hardiningtyas, R. Yuniarti, and N. F. Nuzula, *Potensi Masa Depan Elektrifikasi Kendaraan Bermotor di Indonesia: Sebuah Analisis Strategis Rantai Pasok*. Malang: UB Press., 2023. doi: 10.11594/ubpress9786232967663.
- [5] H. Rusiana Iskandar *et al.*, "Analisis Performa Baterai Jenis Valve Regulated Lead Acid Pada PLTS Off-Grid 1 Kwp," *J. Teknol.*, vol. 13, no. 2, pp. 129–140, 2021.
- [6] M. R. Pratama, P. Wibowo, and A. P. Tarigani, "Analysis of Insulation Resistance Testing During Biennial Maintenance of 20 kV Incoming Cubicle Circuit Breakers at Gunung Megang Substation , PT PLN (Persero) ULTG Prabumulih UPT Baturaja," vol. 7, 2025.
- [7] C. N. Karimah, "Analisa Baterai Sebagai Sumber Kelistrikan Kendaraan Roda Dua Ditinjau Dari Kapasitas Dan Efisiensi," *J. Tek. Terap.*, vol. 2, no. 1, 2023, doi: 10.25047/jteta.v2i1.24.
- [8] N. Putra Nabahan, S. Suryanto, and N. Hamzah, "Simulasi Temperatur dan Performa Panel PV dengan Pendinginan Vakum Menggunakan Ansys dan Matlab," *J. Tek. Mesin Sinergi*, vol. 22, no. 1, pp. 77–89, 2024, doi: 10.31963/sinergi.v22i1.4947.
- [9] S. diah ayu Febriani, "Analisis Tekno Ekonomi Pemasangan PLTS Rooftop On Grid 120 Kw (Studi Kasus PLTS di PT Santinilestari Energi Indonesia)," *J. Tek. Terap.*, vol. 2, no. 2, 2024, doi: 10.25047/jteta.v2i2.31.
- [10] A. D. T. Ariyanto Gultom, Parlin Siagian, "An Improved Protection Of High Voltage Air Line Using Differential Relays," *J. Sci.*, vol. 13, no. 03, pp. 673–684, 2024.
- [11] A. Nurwanto, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Dengan Sistem Kontrol Automatic Transfer Switch (Ats) Dan Optimalisasi Kapasitas Baterai," *J. Elektro dan Inform. Swadarma*, vol. 3, no. 1, pp. 22–30, 2023.
- [12] Satria Darmawan, "Analisis Perbandingan Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap pada Lingkungan PT. RAPP," *J. Engine*, vol. 8, no. 2, 2024, doi: <https://doi.org/10.30588/jeemm.v8i2.1960>.
- [13] H. Sirait, "Sistem Pelacak Sinar Matahari Dalam Pengisian Daya Listrik Pada Accu Menggunakan Solar Panel," *Semnastikom*, vol. 1, pp. 28–31, 2016.
- [14] F. Anis, D. Lesmana, and P. Siagian, "Analisis Pengaruh Pemeliharaan Preventif Jaringan Distribusi 20kV Pada Penyulang Gu . 03 Terhadap Indeks Keandalan Jaringan di PT . PLN (Persero) ULP Medan Timur," vol. IX, no. 4, pp. 10431–10443, 2024.
- [15] H. Susiati *et al.*, *Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia (Upaya Berkelanjutan Menuju Net Zero Emission)*, no. May. 2023.

- [16] D. S. A. Raysi, N. P. Dwi, Soedarmanto, and M. H. E. Kalangi, "Optimalisasi Penerapan E-RTG pada RTG Konvensional di Terminal Petikemas Nilam," *J. Adm. Bisnis*, vol. 1, no. 1, pp. 1–17, 2024.
- [17] Susy Susanti, "Digital Transformation at PLN Jambi: Improving Operational Efficiency and Costumer Satisfaction through Manajement Information Systems," *Media J. Account. Manag.*, vol. 1, no. 1, 2024.
- [18] M. Z. S. Akbar and S. R. Riady, "Sistem Akuisisi Dan Monitoring Performa Mesin Produksi Berbasis Internet of Things (IoT) Dengan Metode Logging Data," *J. Mhs. Bina Insa.*, vol. 7, no. 1, pp. 55–64, 2022.
- [19] N. S. Saragih, P. Siagian, and M. Fahreza, "Analisis Jaringan Listrik 20 Kv Berdasarkan Nilai Saidi-Saifi Terhadap Pemasangan Tabung Urgent Cut Out Di Pt. Pln (Persero) Ulp Binjai Timur," *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 13, no. 1, pp. 46–51, 2024, doi: 10.30591/polektro.v13i1.6545.
- [20] M. Ridho, P. Siagian, Z. Tharo, U. Pembangunan, and P. Budi, "Terhadap Kinerja Sistem Proteksi Gardu Induk 150 KV," vol. 12, no. 3, 2024.
- [21] Y. S. Aritonang, P. Siagian, and S. Aryza, "Teknologi Tinggi Ultra High Voltage Untuk Keandalan Efisiensi Energi (Sebuah Tinjauan Literatur)," vol. 12, no. 3, 2024.
- [22] PT.PLN (Persero), "Buku Pedoman Pemeliharaan Primer Gardu Induk," in *Kepdir No.0520- 2.K DIR*, 2014.