EVALUASI KINERJA BATERAI BERUSIA 10 TAHUN MENGGUNAKAN DATA PENGUKURAN DI GARDU INDUK 150 KV JEPARA

[1] Ahmad Shofa, [2] Muhammad Rizky Adi

[1,2,] Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri,Universitas Islam Sultan

Agung, Semarang, Indonesia

Email: AhmadShofa3456@std.unissula.ac.id

Abstract— Batteries serve as a crucial backup direct current (DC) source in substations, especially during power outages (blackouts). The reliability and lifespan of these batteries are critical factors in ensuring the continuous operation of the system. This study analyzes the performance of 110 VDC NiCd (Nickel-Cadmium) alkaline batteries at the Jepara 150 kV Substation, which have been in operation for over 10 years. This research is relevant given that the replacement criteria for substation batteries typically range from 10-15 years.

This study employs a comparative method using discharging data collected in 2018 and 2020. The results show that while the battery's efficiency remains stable at 99.41%—which is still considered good and above the standard (>80%)—several key parameters have degraded. The battery is still capable of supplying the load for 16.9 hours. However, its specific gravity value has decreased to 1.1305 kg/l, which is below the standard (1.17-1.19 kg/l). Furthermore, the total battery voltage in 2020 was measured at 85.8 V, a drop of 2.1 V from 2018.

Further analysis found that this voltage drop was caused by the presence of "dropped" battery cells. In the 2018 discharge test, there were two cells with voltages below the minimum limit. This number increased to five cells in the 2020 test. If this condition is left unaddressed, it is predicted that the battery's voltage and efficiency will continue to decline in the coming years, which could impact the overall system reliability. Thus, although its efficiency remains good, the degradation of critical parameters such as specific gravity and cell voltage indicates that the battery's quality is beginning to decline.

Keywords—Battery, Substation, Performance, Discharge, Efficiency, Specific Gravity, Voltage.

1. PENDAHULUAN

Keandalan pasokan listrik adalah faktor krusial dalam mendukung aktivitas sosial dan industri modern. Untuk memastikan keandalan ini, PT. PLN (Persero) secara rutin melakukan pemeliharaan pada peralatan sistem tenaga, terutama di gardu induk, yang berfungsi sebagai sub-sistem vital dalam distribusi listrik. Di gardu-gardu ini, sumber daya arus searah (DC) berfungsi sebagai cadangan untuk peralatan kontrol dan proteksi, memastikan operasi yang berkelanjutan selama gangguan pada sistem arus bolak-balik (AC), seperti pemadaman listrik total (blackout). Baterai, sebagai komponen kunci dari sistem DC, memainkan peran penting dalam menjamin ketersediaan daya cadangan ini. Oleh karena itu, kondisi baterai harus selalu optimal untuk menjaga keandalan keseluruhan sistem gardu induk.

ISSN xxxx-xxxx (online) DOI 10.30659/pulse-jeib

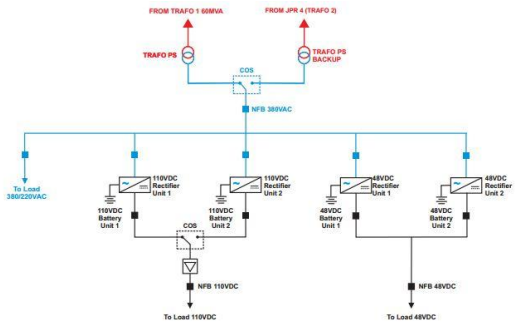
Penelitian sebelumnya telah menyoroti pentingnya evaluasi kinerja baterai. Misalnya, sebuah studi oleh Anastasya Fitri Silvana (2019) menunjukkan penurunan kapasitas dan efisiensi baterai dengan proses pelepasan, sementara Muh Hasan Rifai (2019) menganalisis persyaratan kapasitas baterai untuk memastikan pasokan daya yang memadai selama pemadaman. Penelitian Ibnu Salam (2019) juga mengukur efisiensi baterai komunikasi di gardu induk dan menemukan bahwa sebagian besar masih di atas standar. Namun, ada celah dalam penelitian yang secara khusus menganalisis degradasi baterai alkali nikel-kadmium (NiCd) yang telah beroperasi melampaui masa ekonomisnya. Gardu Induk 150 kV Jepara menjadi studi kasus yang menarik, karena salah satu unit baterai 110 VDC-nya telah beroperasi selama lebih dari 10 tahun, mendekati kriteria penggantian yang ditetapkan oleh PLN yaitu 10-15 tahun.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan melakukan analisis mendalam terhadap kinerja baterai 110 VDC NiCd yang berusia lebih dari 10 tahun di Gardu Induk 150 kV Jepara. Dengan membandingkan data pelepasan dari tahun 2018 dan 2020, studi ini akan mengidentifikasi parameter kinerja mana yang telah mengalami degradasi. Secara spesifik, penelitian ini akan: [1] menganalisis perubahan pada parameter-parameter kritis seperti tegangan, berat jenis, dan efisiensi; [2] mengevaluasi kemampuan baterai dalam menyuplai beban selama pemadaman; [3] menentukan kelayakan operasional baterai untuk penggunaan di masa depan; dan [4] mengidentifikasi potensi risiko dan dampak yang mungkin timbul jika baterai terus dioperasikan tanpa penggantian. Temuan dari studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan kepada PT. PLN (Persero) dan para pemangku kepentingan lainnya dalam membuat keputusan yang terinformasi mengenai pemeliharaan dan penggantian baterai gardu induk.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan model analisis data sekunder. Studi ini memanfaatkan data pemeliharaan yang sudah ada dari Gardu Induk 150 kV Jepara, secara khusus berfokus pada hasil uji pelepasan baterai dari tahun 2018 dan 2020. Dengan menganalisis dan membandingkan dua set data ini, studi ini bertujuan untuk menghitung dan mengevaluasi parameter-parameter kunci baterai terhadap standar yang berlaku yang ditetapkan oleh PT. PLN (Persero). Metode ini menyediakan dasar yang jelas dan objektif untuk menilai kinerja jangka panjang dan degradasi sistem baterai.

Objek dari penelitian ini adalah unit bank baterai 110 VDC, Unit 2, yang terletak di Gardu Induk 150 kV Jepara. Sistem baterai ini merupakan jenis alkali Nikel-Kadmium (NiCd), yang terdiri dari 81 sel individu.



Gambar 2.1 SLD of the Jepara Substation DC System.

Diagram Garis Tunggal (SLD) pada Gambar 2.1 menyajikan gambaran vital dari sistem tenaga DC di Gardu Induk 150 kV Jepara. Diagram ini memperlihatkan sistem bus ganda dengan dua sumber daya utama: pasokan 380 VAC dari "TRAFO 1

ISSN xxxx-xxxx (online) DOI 10.30659/pulse-jeib

60MVA" dan pasokan cadangan dari "TRAFO PS BACKUP."

Diagram ini menampilkan dua subsistem DC yang terpisah, yaitu sistem 110 VDC dan 48 VDC, masing-masing dilengkapi dengan penyearah dan unit baterai sendiri untuk redundansi. Fokus penelitian ini adalah sistem 110 VDC, secara khusus "Baterai Unit 2". Unit ini, yang terdiri dari 81 sel Nikel-Kadmium (NiCd), terhubung secara paralel dengan penyearahnya ke bus 110 VDC umum.

Dalam operasi normal, penyearah menyuplai beban dan secara bersamaan mengisi daya baterai. Jika terjadi pemadaman listrik atau kegagalan penyearah, sakelar pindah (change-over switch/COS) akan aktif secara otomatis, memungkinkan baterai untuk segera menyuplai daya yang stabil dan berkelanjutan ke beban 110 VDC yang krusial, termasuk sirkuit proteksi dan kontrol. Diagram ini secara visual menegaskan peran penting baterai dalam memastikan operasi tanpa gangguan dan keandalan sistem, sehingga menyoroti pentingnya analisis kinerja yang disajikan dalam studi ini.

2.1. Sistem Riset

Penelitian ini dilakukan melalui metodologi sistematis empat tahap. Tahap pertama adalah pengumpulan data, di mana catatan pemeliharaan historis dari uji pelepasan baterai pada tahun 2018 dan 2020 dikumpulkan. Data mentah ini mencakup parameter-parameter penting seperti tegangan per sel, tegangan total, berat jenis, suhu, dan kapasitas yang dilepaskan. Tahap kedua, pemrosesan data, mengonversi data yang terkumpul menjadi metrik yang lebih berarti, seperti berat jenis yang telah dikoreksi dan efisiensi baterai keseluruhan. Tahap ketiga, analisis, berfokus pada perbandingan data yang telah diproses dari tahun 2018 dan 2020 dengan standar operasional PT. PLN untuk mengidentifikasi adanya degradasi kinerja yang signifikan. Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan, di mana hasil analisis disintesis untuk menentukan kondisi teknis baterai saat ini, kelayakan operasionalnya di masa depan, dan untuk memberikan rekomendasi apakah baterai perlu terus digunakan atau diganti di gardu induk.

The detailed specifications of the battery bank used in this study are presented in Table 2.1.

Table 2.1. Battery Specifications

Specification	Details
Brand	Friwo
Type	TS. 275
Manufacturing Country	Germany
Battery Type	Alkaline Nickel-Cadmium
Capacity	170 Ah
Battery Voltage	110 VDC
Voltage Per Cell	1.2 V
Number of Cells	81 Cells
Year of Operation	2009

Spesifikasi bank baterai 110 VDC Unit 2 dirinci dalam Tabel 2.1. Baterai ini merupakan jenis alkali Nikel-Kadmium (NiCd) yang diproduksi oleh Friwo di Jerman. Baterai ini memiliki kapasitas nominal 170 Ah dan tegangan total 110 VDC, yang terdiri dari 81 sel individual dengan tegangan nominal masing-masing 1,2 V. Baterai ini mulai dioperasikan pada tahun 2009, sehingga usianya lebih dari 10 tahun saat studi dilakukan pada tahun 2020. Spesifikasi ini sangat penting untuk memahami parameter desain baterai dan untuk menetapkan patokan yang dapat digunakan untuk membandingkan kinerja terukurnya dalam mengevaluasi kondisi kesehatan dan kelayakan operasionalnya.

The testing procedure, performed during the original maintenance, is outlined in the flowchart below and the subsequent steps. This method provides a standardized approach to data acquisition.

ISSN xxxx-xxxx (online) DOI 10.30659/pulse-jeib

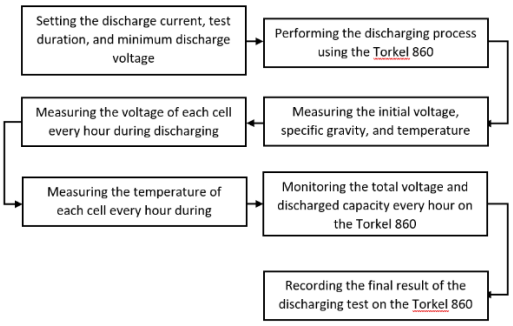


Figure 2.2 Testing Method Flowchart.

Sebelum proses pelepasan, arus pelepasan, durasi uji, dan tegangan pelepasan minimum dikonfigurasi pada unit beban baterai Torkel 860, yang dihitung menggunakan Persamaan 2.4, 2.3, dan 2.1 secara berturut-turut. Uji pelepasan kemudian dimulai dengan Torkel 860. Pada awal uji, tegangan awal, berat jenis, dan suhu diukur. Selanjutnya, pengukuran dilakukan setiap jam, termasuk tegangan setiap sel individual menggunakan multimeter dan suhu menggunakan hidrometer. Secara paralel, tegangan total dan kapasitas yang dilepaskan dipantau pada unit Torkel 860 setiap satu jam. Uji ini diakhiri setelah lima jam atau ketika sistem secara otomatis menghentikan proses, dan tegangan total akhir beserta sisa kapasitas dicatat dari Torkel 860.

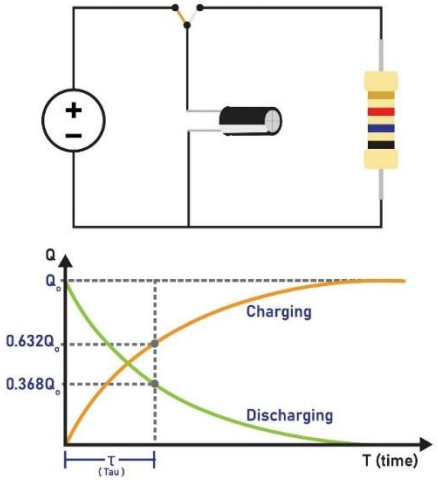
Rencana pengujian untuk pelepasan baterai 110 VDC diuraikan dalam Tabel 2.2. Rencana ini dirancang secara sistematis untuk memastikan pengukuran dan evaluasi kinerja baterai yang akurat terhadap standar operasional yang telah ditetapkan.

Table 2.2. Testing Plan

Test Name	Target
Setting the discharge current, test time, and minimum discharge voltage on the Torkel 860	The discharge current, test duration, and minimum discharge voltage must be configured according to Equation 2.4, Equation 2.3, and Equation 2.1, respectively.
Starting the battery discharge	The discharge process must proceed according to the specified discharge current.
Measuring voltage, specific gravity, and temperature at the start	Each cell voltage should be 1.2 V, the specific gravity between 1.17–1.19 kg/L, and the temperature below 40 °C.
Measuring the voltage of each cell every hour during discharge	Each cell voltage should remain above 1 V.
Monitoring the total voltage and discharged capacity on the Torkel 860 every hour	The total voltage should remain above 81 V, and the discharged capacity should correspond to Equation 2.3 on an hourly basis.
Checking the final discharge results on the Torkel 860	The final total voltage should exceed 81 V, and the final discharged capacity should reach 170 Ah.

Pelaksanaan rencana pengujian ini berhasil menyediakan data komprehensif untuk analisis menyeluruh terhadap kondisi baterai. Pengukuran yang terkumpul kemudian digunakan untuk menghitung indikator kinerja utama, yang memungkinkan penilaian komparatif dengan hasil uji tahun 2018 dan penarikan kesimpulan definitif mengenai kesehatan operasional baterai.

Uji pelepasan baterai dilakukan pada baterai 110 VDC, Unit II, dengan 81 sel, menggunakan unit beban baterai Torkel 860. Pengaturan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4, menghubungkan Torkel 860 ke bank baterai yang akan diuji. Parameter uji—arus pelepasan, waktu uji, dan tegangan pelepasan minimum—dikonfigurasi pada Torkel 860 sebelum uji dimulai.



ISSN xxxx-xxxx (online) DOI 10.30659/pulse-jeib

Figure 2.3 Discharge Circuit.

Rangkaian dasar untuk uji kinerja baterai, seperti yang digambarkan pada Gambar 2.3, terdiri dari unit beban baterai Torkel 860 yang berfungsi sebagai beban elektronik terkendali. Alat ini dihubungkan secara paralel dengan bank baterai yang diuji, Unit II, menggunakan kabel berukuran sesuai. Sebelum uji dimulai, parameter-parameter penting seperti arus pelepasan konstan, waktu uji, dan batas tegangan minimum, diatur dengan tepat pada Torkel 860 agar sesuai dengan rencana pengujian yang telah ditetapkan. Konfigurasi ini memastikan bahwa baterai dikenai profil pelepasan yang terkontrol dan dapat diulang, memungkinkan penilaian kinerjanya secara standar dan valid secara ilmiah. Torkel 860 juga dilengkapi dengan kemampuan pencatatan data untuk memantau dan merekam metrik-metrik kunci sepanjang proses pelepasan, menyediakan data mentah untuk analisis selanjutnya.

Torkel 860 adalah unit beban tiruan (*dummy load*) yang digunakan untuk mensimulasikan beban listrik dalam pengujian pelepasan baterai. Perangkat ini memanfaatkan kombinasi resistor, kapasitor, dan induktor untuk menciptakan beban variabel. Di dalamnya juga terdapat komponen aktif seperti transistor dan MOSFET untuk secara presisi mengatur aliran arus ke beban resistif. Hal ini memungkinkan Torkel 860 untuk mempertahankan arus pelepasan yang konstan dan mengukur kinerja baterai secara akurat di bawah kondisi terkontrol.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. HASIL

Bagian ini menyajikan hasil analisis kinerja baterai berdasarkan data uji pelepasan dari tahun 2018 dan 2020. Temuan-temuan ini kemudian dibahas untuk menentukan kondisi baterai saat ini dan kelayakannya untuk terus digunakan.

Penelitian ini mengumpulkan data yang sudah ada sebelumnya dari catatan pemeliharaan di Gardu Induk 150kV Jepara, yaitu hasil uji pelepasan baterai 110 VDC dari tahun 2018 dan 2020. Objek penelitiannya adalah baterai jenis alkali Nikel-Kadmium (NiCd) yang terdiri dari 81 sel. Analisis dilakukan dengan membandingkan parameter-parameter dari kedua dataset tersebut untuk mengevaluasi kinerja baterai setelah beroperasi lebih dari 10 tahun.

Data berikut dikumpulkan selama uji pelepasan pada tahun 2018 dan 2020, menunjukkan penurunan tegangan selama periode 5 jam.

Uji pelepasan pada tahun 2020 dimulai dengan tegangan total baterai sebesar 112,7 V, sedikit di bawah tegangan awal tahun 2018, dan tegangan sel rata-rata 1,43 V. Selama jam pertama, tegangan total mengalami penurunan signifikan yang diperkirakan hingga 92,3 V. Pada jam kedua, tegangan turun lebih jauh menjadi 90 V, dan pada titik ini, beberapa sel individu mulai mendekati ambang batas tegangan minimum, menandakan adanya tekanan internal. Peristiwa kritis terjadi pada jam ketiga, saat tegangan total 89,6 V, di mana tegangan satu sel anjlok secara drastis ke 0,26 V, sehingga sel tersebut harus segera dikeluarkan dari sistem untuk mencegah kerusakan. Kegagalan dini ini menunjukkan adanya kemunduran signifikan pada keandalan baterai secara keseluruhan. Uji terus berlanjut, dan pada jam keempat, tegangan total turun ke 87,4 V, mendekati batas operasional yang disyaratkan. Uji berakhir pada jam kelima dengan tegangan total 85,8 V, di bawah standar minimum.

ISSN xxxx-xxxx (online) DOI 10.30659/pulse-jeib

Yang paling penting, tegangan empat sel individu (Sel 5, 10, 15, dan 79) telah turun hingga 0,9 V, yang menegaskan kondisi degradasi mereka. Suhu baterai tetap stabil pada 33°C sepanjang uji, yang mengonfirmasi bahwa penurunan kinerja ini diakibatkan oleh degradasi internal, bukan masalah termal.

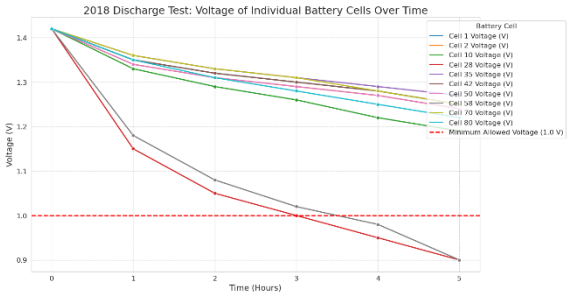


Figure 3.1 Discharge Data for each cell in 2018.

Grafik pada Gambar 3.1 menggambarkan perilaku pelepasan tegangan sel-sel baterai individu selama uji kapasitas tahun 2018. Plot ini menunjukkan tegangan dari sampel sel perwakilan selama periode lima jam, sebuah metrik penting untuk menilai kesehatan baterai di luar kinerja agregat. Mayoritas sel menunjukkan penurunan tegangan yang konsisten dan relatif stabil, dimulai dari rata-rata awal 1,42 V dan berangsur-angsur menurun sepanjang durasi uji. Kurva penurunan yang dapat diprediksi dan non-linear ini adalah karakteristik baterai yang sehat dan menunjukkan proses penuaan yang seragam di sebagian besar sel. Namun, analisis ini menyoroti temuan krusial: tidak semua sel berkinerja seragam. Secara khusus, sel yang diberi label "Sel 28" dan "Sel 58" menunjukkan penurunan tegangan yang jauh lebih cepat dibandingkan dengan sel-sel lainnya. Kedua sel ini jatuh di bawah ambang batas tegangan minimum 1,0 V pada sekitar 3 jam dan 4 jam, dan mengakhiri uji dengan tegangan hanya 0,9 V. Keruntuhan tegangan prematur pada sebagian kecil sel ini menunjukkan kegagalan lokal atau degradasi dalam komponen internalnya, yang dapat disebabkan oleh faktor-faktor seperti ketidakseimbangan elektrolit, sulfasi yang tidak dapat diubah, atau cacat fisik. Meskipun tegangan total sistem baterai secara keseluruhan tetap di atas ambang batas operasional minimum pada tahun 2018, kinerja di bawah standar dari sel-sel individu ini berfungsi sebagai tanda peringatan dini akan adanya kegagalan sistemik yang akan datang. Degradasi bahkan pada sejumlah kecil sel dapat mengkompromikan keandalan keseluruhan rangkaian baterai, karena tegangan total dibatasi oleh tautan terlemah. Oleh karena itu, data dari analisis sel individu ini merupakan indikator yang lebih sensitif terhadap kesehatan baterai jangka panjang daripada pembacaan tegangan total saja.

Uji pelepasan baterai pada tahun 2020 menunjukkan degradasi signifikan, yang menegaskan menurunnya keandalan setelah lebih dari satu dekade beroperasi. Uji dimulai dengan tegangan total 112,7 V, yang dengan cepat turun menjadi 92,3 V dalam satu jam pertama. Penurunan awal ini diikuti oleh penurunan yang lebih bertahap hingga mencapai 89,6 V pada jam ketiga, di mana terjadi kegagalan kritis: tegangan satu sel anjlok hingga 0,26 V, sehingga sel tersebut harus dikeluarkan dari rangkaian. Peristiwa ini menjadi indikator jelas adanya kegagalan komponen internal yang terlokalisasi. Uji berlanjut hingga mencapai tegangan akhir 85,8 V pada jam kelima, yang berada di bawah ambang batas operasional yang disyaratkan. Analisis selanjutnya mengungkapkan bahwa empat sel tambahan juga telah mengalami degradasi hingga 0,9 V, semakin mengonfirmasi penurunan kesehatan sistemik pada baterai. Penting untuk dicatat bahwa suhu baterai tetap stabil pada 33°C sepanjang uji, secara efektif menyingkirkan stres termal sebagai faktor penyebab degradasi tegangan yang diamati.

ISSN xxxx-xxxx (online) DOI 10.30659/pulse-jeib

Temuan ini, bila dibandingkan dengan data tahun 2018, menggarisbawahi laju penurunan kinerja yang dipercepat, menandakan bahwa baterai tidak lagi dapat diandalkan untuk menjaga daya yang stabil dalam aplikasi gardu induk yang kritis dan memerlukan penggantian.

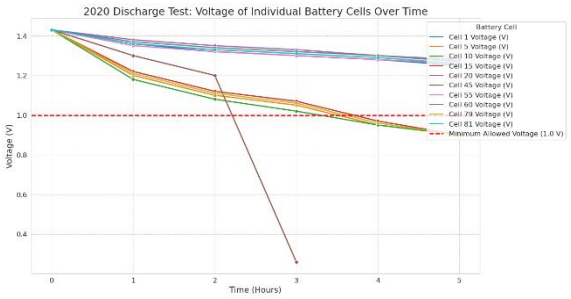


Figure 3.2 Discharge Data for each cell in 2020

Grafik pada Gambar 3.2 menyajikan pandangan terperinci mengenai perilaku tegangan sel individu selama uji pelepasan tahun 2020. Ketika dibandingkan dengan data tahun 2018, grafik ini menunjukkan percepatan yang jelas dalam degradasi. Mayoritas sel mempertahankan kurva pelepasan yang relatif stabil, mirip dengan pola yang diamati pada tahun 2018. Namun, plot ini secara jelas menyoroti peningkatan signifikan dalam jumlah sel yang mengalami degradasi parah.

Peristiwa paling kritis adalah keruntuhan tegangan dramatis pada "Sel 45" pada jam kedua, yang turun dari sekitar 1,2 V menjadi hanya 0,26 V. Kegagalan mendadak ini menunjukkan hilangnya kapasitas secara total, kemungkinan besar karena korsleting internal parah atau kerusakan kimia permanen.

Selain itu, beberapa sel lain—khususnya "Sel 5," "Sel 10," dan "Sel 15"—juga menunjukkan penurunan tegangan yang lebih curam dan lebih cepat dibandingkan sel-sel yang lebih sehat. Sel-sel ini jatuh di bawah ambang batas tegangan minimum yang diizinkan, yaitu 1,0 V, sebelum uji selesai, dan mencapai tegangan akhir 0,9 V. Ini merupakan peningkatan yang mencolok dalam jumlah sel yang gagal dibandingkan dengan uji tahun 2018. Kinerja buruk kolektif dari sel-sel ini secara langsung berkontribusi pada penurunan yang lebih cepat pada tegangan total baterai secara keseluruhan, seperti yang terlihat pada grafik perbandingan tegangan total.

Sebagai kesimpulan, analisis sel individu pada tahun 2020 menjadi bukti yang tak terbantahkan mengenai peningkatan signifikan dalam degradasi internal. Kegagalan Sel 45 dan kerusakan progresif pada beberapa sel lainnya menegaskan bahwa sistem baterai telah bergerak melampaui kondisi penuaan normal dan sekarang mengalami kegagalan komponen yang meluas dan tidak dapat diubah. Kerusakan internal ini secara fundamental melemahkan keandalan sistem, terlepas dari kapasitas totalnya.

Analisis perbandingan hasil uji kapasitas baterai antara tahun 2018 dan 2020 menunjukkan konsistensi yang luar biasa dalam kemampuan penyimpanan energi totalnya. Seperti yang ditunjukkan dalam kedua catatan uji, total kapasitas pelepasan baterai adalah 169 Ah pada kedua tahun tersebut, hanya sedikit di bawah kapasitas nominalnya sebesar 170 Ah. Hal ini menunjukkan bahwa, meskipun usianya sudah tua, baterai mempertahankan persentase kapasitas nominal yang tinggi. Temuan ini merupakan indikator positif yang kuat, menunjukkan bahwa retensi energi baterai belum menjadi masalah kritis. Namun, kapasitas yang stabil ini harus dipertimbangkan bersamaan dengan metrik kinerja lainnya, terutama penurunan signifikan dalam tegangan total dan berat jenis yang diamati selama periode yang sama. Meskipun baterai masih dapat

ISSN xxxx-xxxx (online) DOI 10.30659/pulse-jeib

menyimpan sejumlah besar energi, kemampuannya untuk menyalurkan energi tersebut pada tegangan yang stabil dan memadai terganggu, sebuah perbedaan krusial yang merusak keandalan keseluruhannya untuk aplikasi kritis. Oleh karena itu, konsistensi kapasitas saja tidak menjamin kelayakan baterai untuk terus digunakan.

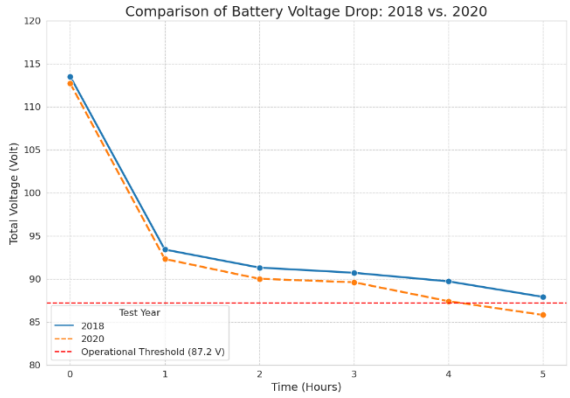


Figure 3.3 Comparative Capacity 2018 vs 2020

Grafik pada Gambar 3.3 menyajikan analisis komparatif yang penting mengenai karakteristik pelepasan tegangan total baterai antara pengujian tahun 2018 dan 2020. Visualisasi ini memberikan bukti kuat tentang percepatan degradasi kinerja baterai.

Pada pengujian tahun 2018, yang diwakili oleh garis biru, tegangan total baterai mengalami penurunan awal yang substansial dari 113,5 V menjadi 93,4 V pada jam pertama. Namun, setelah itu, tegangan turun lebih bertahap dan stabil, mengakhiri uji lima jam pada 87,9 V. Yang terpenting, tegangan akhir ini tetap di atas ambang batas operasional minimum 87,2 V (ditunjukkan oleh garis putus-putus merah), menunjukkan bahwa baterai masih mampu memenuhi fungsi utamanya untuk menyediakan daya cadangan yang stabil.

Sebaliknya, pengujian tahun 2020, yang ditunjukkan oleh garis putus-putus oranye, menunjukkan degradasi kinerja yang jauh lebih parah. Meskipun tegangan awalnya hanya sedikit lebih rendah pada 112,7 V, kurva penurunan tegangan jauh lebih curam sepanjang pengujian. Yang paling mencolok, tegangan total baterai turun di bawah ambang batas operasional 87,2 V pada sekitar jam keempat dan mengakhiri uji pada tegangan akhir 85,8 V.

Grafik komparatif menunjukkan kegagalan fundamental baterai mempertahankan tegangan untuk operasi gardu induk: laju jatuh tegangan tahun 2020 jauh lebih cepat dibanding 2018, menandakan degradasi melampaui ambang risiko sehingga tidak lagi andal. Indikator kesehatan menguatkan hal ini: SG 2018 = 1,2305 kg/L (di atas standar 1,17–1,19 → indikasi overcharge), sedangkan SG 2020 = 1,1305 kg/L (di bawah standar), mencerminkan pengenceran elektrolit yang melemahkan kemampuan menyimpan energi/menjaga tegangan. Meski efisiensi 99,41% dan kapasitas pelepasan ~169 Ah (secara teoritis 16,9 jam pada beban 10 A) tampak tinggi, penurunan SG yang tajam menandakan degradasi internal yang akan mempercepat kemerosotan kinerja.

B. DISKUSI.

Berdasarkan hasil penelitian, baterai yang telah berusia lebih dari 10 tahun ini masih menunjukkan efisiensi tinggi sebesar 99,41%, jauh di atas standar yang disyaratkan (>80%). Namun, analisis data pelepasan mengungkapkan beberapa tren yang mengkhawatirkan. Pertama, sejumlah besar sel individu mengalami degradasi tegangan, dengan beberapa sel turun di bawah tegangan minimum 1 V. Ini adalah indikator jelas menurunnya kualitas baterai, yang jika berlanjut akan memengaruhi efisiensi dan kinerja keseluruhan. Kedua, pembacaan berat jenis (SG) menunjukkan penurunan dari 1,2305 kg/L pada tahun 2018 menjadi 1,1305 kg/L pada tahun 2020. Nilai

ISSN xxxx-xxxx (online) DOI 10.30659/pulse-jeib

SG di bawah standar (1,17-1,19 kg/L) dapat menyebabkan penurunan tegangan baterai. Meskipun kapasitas total tetap tinggi pada 169 Ah, penurunan tegangan sel individu dan tegangan total baterai (dari 113,5 V pada 2018 menjadi 112,7 V pada 2020) mengisyaratkan adanya degradasi komponen internal. Meskipun baterai masih mampu menyediakan daya cadangan untuk waktu yang lama, parameter yang menurun ini mengindikasikan bahwa keandalannya semakin berkurang. Peningkatan jumlah sel dengan penurunan tegangan kritis selama periode dua tahun menjadi perhatian utama.

IV. CONCLUSION

Analisis ini menegaskan bahwa kinerja baterai telah mengalami degradasi signifikan, sehingga secara teknis tidak layak untuk tujuan yang dimaksudkan. Hasil uji pelepasan komparatif memberikan bukti tak terbantahkan dari penurunan ini. Pada tahun 2018, baterai masih menunjukkan kemampuan untuk mempertahankan tegangan di atas ambang batas operasional 87,2 V. Namun, pada tahun 2020, penurunan tegangan berakselerasi hingga titik kritis, jatuh di bawah batas yang disyaratkan dan mengindikasikan kegagalan fundamental dalam kemampuannya untuk mendukung beban gardu induk. Ini adalah ukuran langsung dari ketidakmampuan teknisnya. Validitas ilmiah dari kesimpulan ini semakin diperkuat oleh data pendukung. Penurunan drastis berat jenis baterai dari 1,2305 kg/L pada tahun 2018 menjadi 1,1305 kg/L pada tahun 2020 adalah indikator teknis utama dari degradasi kimia internal, khususnya penurunan konsentrasi asam sulfat. Selain itu, peningkatan insiden kegagalan sel individu dalam uji tahun 2020 menunjukkan kerusakan sistemik pada integritas rangkaian baterai. Temuan multifaset ini mulai dari penurunan tegangan total dan SG hingga kegagalan sel individu bukanlah anomali yang terisolasi, melainkan pola konsisten dari degradasi kinerja. Akibatnya, baterai tidak lagi memenuhi spesifikasi teknis untuk keandalan dan keamanan yang diperlukan dalam sistem tenaga kritis.

Berdasarkan temuan teknis ini, sangat penting untuk segera menerapkan tindakan korektif. Penggantian Segera: Sistem baterai harus diganti dengan unit baru yang memiliki rekam jejak keandalan yang terbukti dan disertai dengan jaminan kinerja dari produsen. Implementasi Pemantauan Proaktif: Sistem baterai di masa depan harus dilengkapi dengan Sistem Manajemen Baterai (BMS) canggih yang mampu memantau tegangan, suhu, dan resistansi internal setiap sel secara real-time. Ini akan memungkinkan pemeliharaan prediktif dan mencegah kegagalan katastropik. Kepatuhan terhadap Standar Internasional: Protokol pemeliharaan dan pengujian yang ketat, sesuai dengan standar internasional seperti dari IEEE (misalnya, IEEE 450), harus diadopsi untuk memastikan kesehatan jangka panjang dan validitas data kinerja baterai.

ACKNOWLEDGMENT

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT PLN (Persero), khususnya tim pemeliharaan Gardu Induk 150 kV Jepara, atas akses data uji pelepasan tahun 2018 dan 2020 serta dukungan teknis selama proses pengolahan data. Apresiasi juga disampaikan kepada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA) atas fasilitas riset dan telaah sejawat internal. Ucapan terima kasih kepada para reviewer anonim atas komentar dan rekomendasi yang memperkaya naskah ini. Segala pendapat dan kekeliruan yang mungkin tersisa sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis.

ISSN xxxx-xxxx (online) DOI 10.30659/pulse-jeib

REFERENCES

[1] Anastasya Fitri Silvana, "Pengaruh Proses Pengosongan Terhadap Kapasitas Dan Efisiensi Baterai 110 VDC Di Gardu Induk Sungai Kedukan Palembang," *Univ. Brawijaya*, vol. 11, no. 1 Indralaya, pp. 1–14, 2019.

[2] A. M. Rifa'i and Jatmiko, "Analisis Kebutuhan Kapasitas Baterai 110 Volt Dc Gardu Induk 150 Kv Bawen," *Univ. Muhammadiyah Surakarta*, no. 1 Surakarta, pp. 1–13, 2019.

[3] Ibnu Salam, "Analisa Efisiensi Batere Komunikasi Pada Gardu Induk PT PLN (Persero) Region Jateng dan DIY UPT Kudus," *Univ. Negeri Semarang*, no. 1 Semarang, pp. 1–76, 2007.

[4] P. P. Persero, *Buku Pedoman Pemeliharaan Sistem Suplai Ac / Dc*, no. 0520. Jakarta: PT PLN (Persero), 2014.

[5] M. S. Samhan, *Teknologi Baterai*. Yogyakarta: Issuu, 2018.

[6] M. A. Gielbert, "Perancangan, Pembuatan, dan Pengujian Modifikasi Model Caps Baterai Lead Acid dengan Sensor Level untuk Mengakomodasi Pengisian Air Aki Otomatis," *UMN*, vol. 5, no. 2 Tanggerang, p. 83, 2021.

[7] I. N. Mufidah, "Estimasi State Of Charge Pada Baterai VRLA (Valve Regulated Lead Acid) Dengan Metode Polynomial Regression," *Univ. jember*, no. 1 Jember, pp. 68–74, 2019.

[8] Zainul Rahmawan, "Estimasi State of Charge (Soc) Pada Baterai Lead-Acid Dengan Menggunakan Metode Coulomb Counting Pada PV Hybrid," *ITS*, no. 0 Surabaya, p. 123, 2018.

[9] A. Bayu, "STUDI KOMPARASI WICKING HEIGHT, WICKING RATE, DAN ACID ABSORPTION MEASUREMENT PADA SPESIMEN ABSORPTIVE GLASS MAT (AGM) VALVE-REGULATED LEAD ACID BATTERY," *ITS*, vol. 1, no. 1 Surabaya, pp. 1–23, 2017.

[10] N. Ricky Agned, "Studi Kapasitas Baterai 110 Vdc pada Gardu Induk 150 kV Bangkinang," *Jom FTEKNIK*, vol. 3 No. 2, no. 1 Riau, pp. 1–9, 2014.

[11] P. P. Persero, *SPLN T7.003 : 010 Operasi Dan Pemeliharaan Batere Gardu Induk*. Jakarta, 2010.

[12] E. Nurtiasih, "Analisa Kapasitas Baterai Komunikasi Pada Gardu Induk 150 kV Bantul," *J. Elektr.*, vol. Volume 4 N, no. 1 Yogyakarta, pp. 46–53, 2017.

[13] A. Ramadhan, "Analisis Keandalan Baterai Sebagai Supply Motor Dc Penggerak Pms Di Gardu Induk 150 Kv Kentungan," *J. Elektr.*, vol. 5, no. 2 Yogyakarta, pp. 39–46, 2018.

[14] B. M. Syahrial, "Analisa Pengaruh Berat Jenis Dan Suhu Larutan Elektrolit Terhadap Tegangan Keluaran Dan Efisiensi Baterai Di Pt. Pln (Persero) Upk Bukit Asam," *Univ. Sriwij.*, vol. 52, no. 1 Indralaya, pp. 1–5, 2019.

[15] M. A. A. T. B. Yan, W. H. S. K. Wang, Z. Wang, Z. D. J. Li, "State-of-Charge Prediction Model for Ni-Cd Batteries Considering Temperature and Noise," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 11, p. 6494, 2023.

ISSN xxxx-xxxx (online) DOI 10.30659/pulse-jeib