



Implementasi Regresi Linier terhadap Prediksi Dini Kerusakan Kutub Baterai VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*)

Fikrie Aqsha, Tajuddin Nur, Agus Indarto

PLN Institute of Technology Jakarta

Email: fikrie.aqsha@gmail.com

Abstrak:

Penelitian ini menunjukkan bahwa penguatan doktrin pertahanan Indonesia di era digital memerlukan kepemimpinan transformasional yang mengintegrasikan nilai kebangsaan ke dalam kebijakan dan sistem teknologi, untuk menciptakan sistem pertahanan yang adaptif, responsif, dan berkarakter. Penelitian ini bertujuan menganalisis penyebab dan dampak pertumbuhan kutub baterai turbin gas, mengusulkan solusi pencegahan kegagalan berbasis data, serta mendukung tim pemeliharaan dalam meningkatkan keandalan, keamanan, dan kinerja sistem. Penelitian ini menganalisis pertumbuhan kutub baterai turbin gas dengan membandingkan data pertumbuhan kutub antara unit GTG (Gas Turbine Generator) dan GTC (Gas Turbine Compressor). Analisis regresi linier menunjukkan hasil yang signifikan secara statistik, dengan nilai p di bawah 0,05 pada tingkat kepercayaan 95%. Temuan ini mengonfirmasi bahwa tegangan *floating charge* di bawah standar operasional 123,75 Vdc dan tidak melakukan *equalizing charge* secara signifikan mempercepat pertumbuhan kutub pada baterai VRLA tipe 120PzV NEW OC. Hal ini disebabkan karena rentang tegangan polarisasi pada sistem baterai tersebut di luar 50-80 milivolt. Mempertahankan tegangan *floating charge* sesuai standar dan melakukan *equalizing charge* setelah tes kapasitas baterai dapat memperlambat pertumbuhan kutub yang tidak normal serta mengoptimalkan masa pakai baterai VRLA tipe 120PzV NEW OC. Faktor kunci untuk menjaga efisiensi dan keandalan baterai meliputi pengaturan *floating charge*, kontrol suhu ruangan yang tepat, dan melakukan *equalizing charge* secara rutin setelah tes kapasitas untuk mendapatkan rentang tegangan polarisasi sistem baterai di 50-80 milivolt. Makalah ini menyajikan kasus nyata dari industri energi di Indonesia, yang berfungsi sebagai referensi praktis untuk mengembangkan dan menerapkan strategi pemeliharaan baterai VRLA yang efektif.

Kata kunci: Baterai VRLA, suhu ruangan, uji pelepasan, kontrol DCS turbin gas.

Abstract:

This study demonstrates that strengthening Indonesia's defense doctrine in the digital era requires transformational leadership that integrates national values into policies and technological systems, creating an adaptive, responsive, and character-driven defense system. This study aims to analyze the causes and impacts of pole growth in gas turbine batteries, propose data driven failure prevention solutions, and support maintenance teams in enhancing system reliability, safety, and performance. This study analyzes pole growth in gas turbine batteries by comparing data between GTG (Gas Turbine Generator) and GTC (Gas Turbine Compressor) units. Linear regression analysis demonstrated statistically significant results (p -value < 0.05 at 95% confidence level). The findings confirm that operating with floating charge voltages below the standard 123.75 VDC and omitting equalizing charges significantly accelerates pole growth in 120PzV NEW OC VRLA batteries. This phenomenon is attributed to the battery system's polarization voltage deviating beyond the optimal 50-80 millivolt range. Maintaining standard floating charge voltages and performing equalizing charges following capacity testing can effectively mitigate abnormal pole growth while extending the service life of 120PzV NEW OC VRLA batteries. The system's operational efficiency and reliability depend on three critical factors: proper floating charge regulation, accurate ambient temperature control, and regular equalizing charges after capacity tests to ensure the battery's polarization voltage remains within the optimal 50-80 millivolt range. This paper presents a real case study from the energy

industry in Indonesia, serving as a practical reference for developing and implementing effective maintenance strategies for VRLA batteries.

Keywords: VRLA battery, room temperature, discharge test, DCS control of gas turbine.

Corresponding: Nama author

E-mail: Email author



PENDAHULUAN

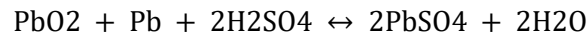
Energi listrik memberikan manfaat sangat luas dalam kehidupan didunia saat ini, dengan berbagai potensinya yang sangat mudah dirubah menjadi bentuk energi radiasi (cahaya), panas, atau mekanik (Siregar et al., 2023). Hanya saja metode penyimpanan energi listrik ini masih menjadi perbincangan seluruh dunia, penyimpanan energi listrik tidak bisa disimpan dalam bentuk aslinya yaitu berupa medan listrik namun membutuhkan suatu konversi tertentu menjadi bentuk energi lain yaitu dalam bentuk energi kimia dan yang biasa di kenal dengan nama baterai (Nasution, 2021; Waruwu, 2023). Dalam perkembangannya, sistem penyimpanan energi listrik saat ini secara umum diklasifikasikan menjadi dua jenis utama: primer dan sekunder (Nasution, 2021). Baterai primer mengubah energi kimia menjadi energi listrik hanya sekali, sehingga penggunaannya bersifat sekali pakai (non-rechargeable). Sementara itu, baterai sekunder dirancang untuk mendukung pengisian ulang, sehingga dapat digunakan kembali setelah diisi ulang (rechargeable) (Çatak et al., 2018)

Pertumbuhan kutub positif pada baterai VRLA (Valve Regulated Lead Acid) merupakan salah satu isu global yang dihadapi oleh industri energi, khususnya pada sistem cadangan daya kritis, seperti yang digunakan dalam gas turbin (Kemal Alfaridzi, 2024). Pertumbuhan kutub positif ini dapat terjadi akibat dari berbagai faktor, seperti overcharging, ketidakseimbangan tegangan antar sel, dan polarisasi yang tinggi. Secara global, masalah ini sering menyebabkan penurunan kapasitas baterai, memperpendek umur pakai, bahkan kegagalan total pada sistem cadangan daya, yang dapat berpotensi mengganggu operasi industri yang sangat bergantung pada keandalan pasokan energi (Setyadi, 2021; Sidabutar, 2025). Selain itu, pertumbuhan kutub positif juga memperburuk masalah korosi dalam baterai, yang sering menjadi penyebab utama kerusakan dan kegagalan pada sistem turbin gas di berbagai industri (Azmi et al., 2024; Sumantri et al., 2025).

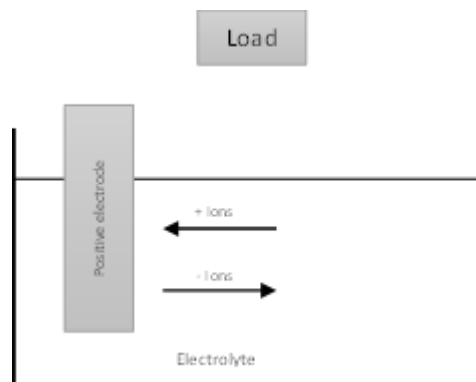
Berdasarkan data global, kegagalan baterai VRLA pada sistem cadangan daya menjadi salah satu tantangan utama di sektor energi (Widarsana, 2024). Laporan dari American Petroleum Institute (2020) menyebutkan bahwa lebih dari 25% sistem cadangan daya di industri energi mengalami penurunan kinerja karena masalah pada baterai VRLA, yang sering dipengaruhi oleh ketidaksesuaian tegangan pengisian dan kondisi polarisasi yang buruk. Misalnya, di industri energi AS, lebih dari 20.000 unit baterai VRLA mengalami kegagalan dalam satu tahun akibat pertumbuhan kutub positif yang dipicu oleh overcharging dan ketidakseimbangan tegangan. Statistik ini menunjukkan bahwa masalah terkait pertumbuhan kutub dan degradasi kinerja baterai VRLA mempengaruhi banyak sektor industri secara global, dan solusi yang lebih baik diperlukan untuk mengurangi kerugian finansial dan gangguan operasional yang ditimbulkan (Siburian & Widiyanto, 2024).

Kreith membagi teknologi baterai menjadi 4 tipe yaitu: Lead acid, Li-Ion, Ni-Cd, dan Ni-MH berdasarkan kecocokan penggunaannya (Nasrullah et al., 2022). Baterai lead acid merupakan teknologi baterai pertama atau yang tertua, dimana bagian inti baterai lead acid terdiri dari elektroda

negatif berbahan timbal (Pb), elektroda positif berbahan timbal dioksida (PbO₂) dan pemisahan dalam hal konduktivitas listrik antara kedua elektroda tersebut (Gambar 1) (Çatak et al., 2018). Sistem ini menggunakan larutan asam sulfat (H₂SO₄) sebagai elektrolit yang berperan dalam transportasi ion sulfat selama proses *discharge*. Dibawah ini adalah suatu reaksi kimia pengosongan dan pengisian pada baterai (Ummah, 2019):



Dalam penelitian ini, fokus pembahasan hanya diarahkan pada jenis baterai lead-acid yang merupakan sistem baterai sekunder (*rechargeable*), sehingga memungkinkan energi listrik diubah menjadi energi kimia, disimpan, dan diubah kembali menjadi energi Listrik (Nasution, 2021). Baterai terdiri dari tiga bagian utama yaitu: elektroda negatif (katoda), elektroda positif (anoda), dan elektrolit (Gambar 1). Elektroda negatif melepaskan elektron ke beban eksternal, dan elektroda positif menerima elektron dari beban. Elektrolit berfungsi sebagai media konduksi ionik antara katoda dan anoda (Anisa & Setyaningrum, 2022). Reaksi kimia setiap elektroda dan elektrolit menghilangkan elektron dari elektroda positif dan menyimpannya di elektroda negatif. Reaksi kimia ini menunjukkan bagaimana proses kerja baterai saat diisi dan digunakan. Kemampuan dan kecepatan daya maksimum baterai untuk diisi dan dikosongkan melalui reaksi kimia sangat dipengaruhi oleh nilai resistansi internal (Çatak et al., 2018).

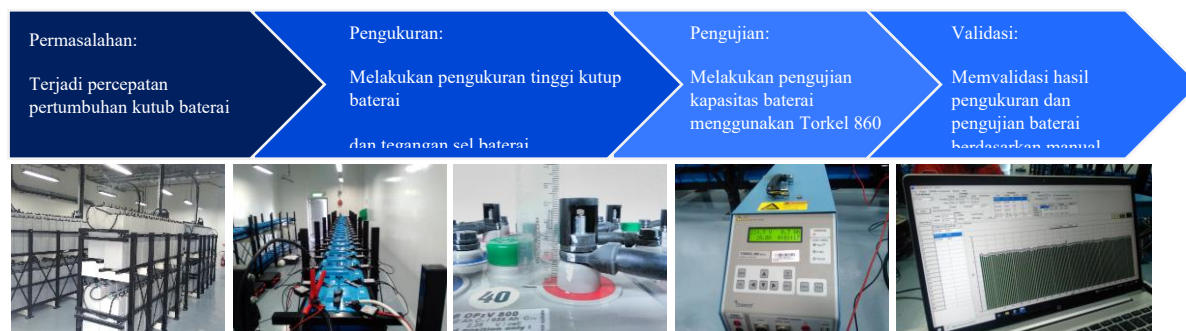


Gambar 1. Skema system baterai sekunder

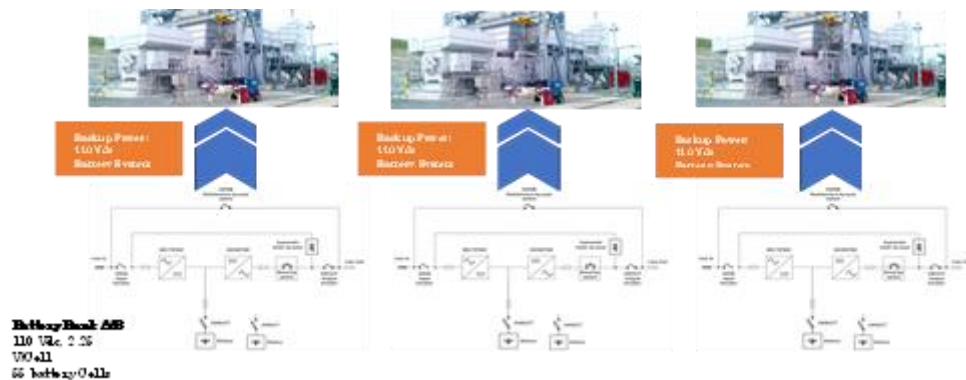
Sumber: *Energy Conversion, Second Edition*, D. Yogi Goswami dan Frank Kreith

Baterai memegang peran sangat penting dalam menjaga keandalan dan keselamatan operasi sistem turbin gas di berbagai industri, termasuk sektor energi (Effendi, 2024). Namun, salah satu tantangan utama yang sering dihadapi adalah kerusakan baterai akibat terjadinya pertumbuhan kutub positif (+) akibat korosi yang disebabkan oleh *overcharging* (volt per cell) dan perbedaan tegangan individual atau *polarisasi* (mV) pada baterai *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA) dan pertumbuhan kutub bisa menyebabkan kegagalan total sistem baterai. Gangguan pada sistem ini berpotensi mengganggu stabilitas operasional turbin gas yang secara kritis bergantung pada keandalan pasokan daya cadangan DC, khususnya saat terjadi *outage* pada sumber listrik AC utama (Nugraha, 2024). Melalui data yang tersedia, studi ini mengkaji faktor pemicu pertumbuhan kutub positif (+) pada baterai serta memformulasikan mitigasi percepatan pertumbuhannya. Temuan diperoleh melalui data historis pemeliharaan serta kajian dokumen teknis yang terkait langsung dengan pertumbuhan elektroda

positif. Riksa uji menggunakan regresi linier dengan bantuan perangkat lunak dari Microsoft Excel, yang bertujuan untuk mengukur hubungan antara variabel-variabel kunci, seperti: tegangan pengisian (*charger output voltage*), tegangan sel baterai, dan suhu baterai (Atmaja, 2023). Pengukuran dilakukan menggunakan perangkat Fluke BT521 untuk mengukur impedansi dan tegangan, serta Torkel 860 untuk simulasi beban dan kapasitas. Seluruh proses mengikuti pedoman IEEE Std 1188-2005, dengan evaluasi pada baterai tipe 12OPzV NEW OC pada 80% kapasitas nominalnya (Pang et al., 2024) (1200 Ah). Dari studi kasus ini diharapkan bisa memberi strategi yang tepat untuk meningkatkan kinerja dan *life cycle* baterai VRLA dalam sistem turbin gas (Janardana, 2020).



Sistem pencadangan daya pada perusahaan energi di Indonesia ini, mempunyai spesifikasi tegangan total adalah 110 Vdc (Rizal, 2022). Setiap baterai sel tipe 12OPzV NEW OC memiliki tegangan nominal 2,25 Volt saat terisi penuh, sehingga jumlah baterai sel yang terhubung seri (satu *bank*) adalah 55 unit per Gas Turbine Generator (GTG) dan Gas Turbine Compressor (GTC) (Ihsan et al., 2022). Pada masing-masing unit GTG dan GTC mempunyai 2 *bank* sistem pencadangan dengan tegangan keluaran dari pengisian baterai yaitu 123,75 Vdc diperoleh dari $2,25 \text{ Volt} \times 55 \text{ unit} = 123,75 \text{ Vdc}$ (Gambar 2) (Istiqbal et al., 2023; Setyadi, 2021). Namun, pada unit GTC, tegangan keluaran pengisian baterai hanya terukur 121 VDC—di bawah rekomendasi pabrikan (Faisal, 2022). Penelitian ini menggunakan sampel 165 sel baterai dari total populasi 330 sel, dengan margin error 5,4% dan confidence level 95% (unit GTG & GTC) didapatkan melalui perhitungan online sample size calculation (Sumber: <https://www.calculator.net/sample-size-calculator.html>). Hasil uji pada analisis regresi linier menunjukkan perbedaan yang signifikan terhadap hasil pengukuran setiap baterai cell GTG terhadap GTC, dengan nilai p di bawah 0,05 pada tingkat kepercayaan 95%. Selain ketidaksesuaian tegangan keluaran, temuan penting lainnya adalah adanya perbedaan tegangan individual baterai atau polarisasi (millivolt). Berdasarkan kurva arus mA/100 Ah vs polarisasi/millivolt dari H.A. Kiehne (2003), semakin besar perbedaan polarisasi (mV), semakin tinggi tingkat korosi dan evolusi oksigen (*oxygen evolution*). Sebagai gambaran, jika sebuah sel baterai terisi penuh memiliki tegangan 2,25 Vdc, tetapi tegangan terukur sel pertama adalah 2,15 Vdc, maka polarisasinya adalah 100 mV. Sementara itu, jika tegangan terukur sel kedua adalah 2,24 Vdc, maka polarisasinya hanya 1 mV. Dalam hal ini, sel pertama memiliki laju korosi yang lebih tinggi dibandingkan sel kedua karena polarisasi yang lebih besar (Ajiriyanto et al., 2017; Akbar, 2022; Hutaeruk, 2017; Riastuti et al., 2017).

**Gambar 3. Arsitektur Sistem Pencadangan Daya GTG dan GTC**

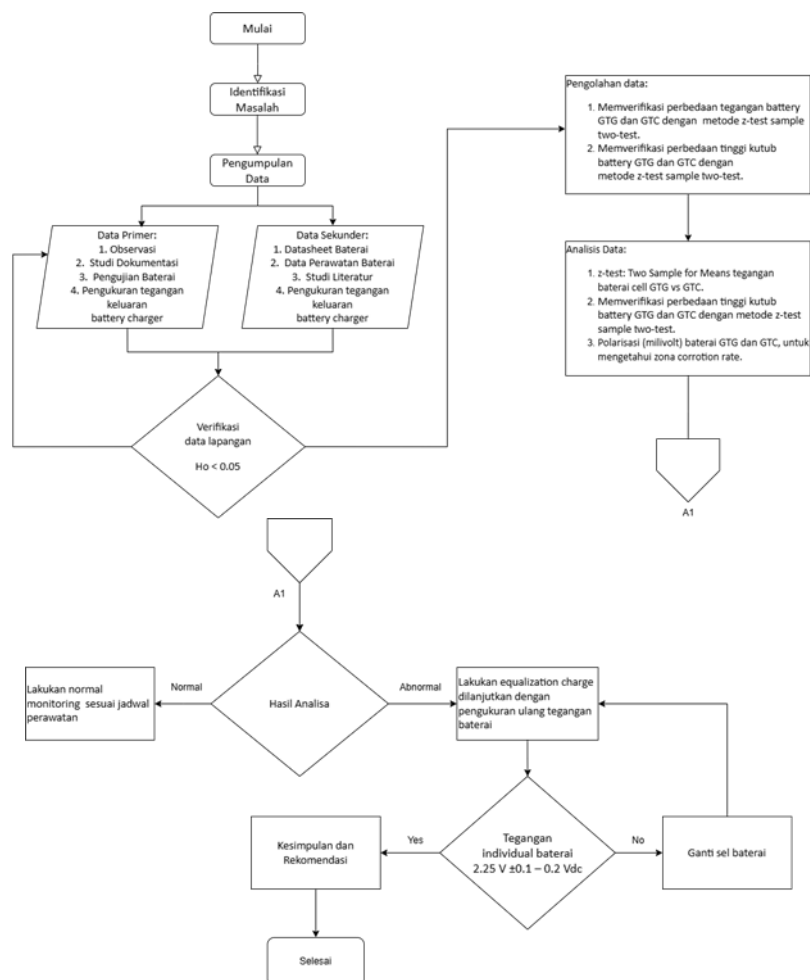
Kesimpulan dari temuan ini menegaskan pentingnya menjaga kestabilan tegangan pengisian mengambang (*floating charge voltage*), keseragaman tegangan individual (V/cell), dan menjaga rentang polarisasi (millivolt) tidak melebihi minimum *corrosion rate zone* yaitu di 50 – 80 milivolt. Hal ini dilakukan untuk mencegah percepatan pertumbuhan kutub, korosi, dan degradasi kinerja baterai secara keseluruhan. Salah satu solusi yang direkomendasikan adalah melakukan *equalization charge*, yaitu dengan menaikkan tegangan keluaran secara konstan dari baterai *charger* sesuai dengan rekomendasi yang diberikan oleh pabrikan baterai (Rudiatmadja, 2018). Langkah ini bertujuan untuk memastikan setiap sel baterai mencapai kondisi tegangan yang seragam dan optimal, sehingga meningkatkan keandalan dan masa pakai baterai secara keseluruhan.

Penelitian oleh Ardodi (2024) memberikan wawasan signifikan mengenai perkembangan dan tantangan operasional teknologi baterai. Putra (2019) mengklasifikasikan sistem baterai menjadi dua jenis utama, yaitu primer dan sekunder, dengan fokus pada aplikasi, proses konversi energi, dan keberlanjutan jangka panjang. Penelitian ini menyoroti tantangan yang dihadapi oleh baterai, terutama terkait dengan korosi dan keterbatasan teknologi baterai tradisional. Demikian pula, Kreith (2016) menyelidiki keandalan dan umur baterai Lead-Acid, dengan merinci degradasi struktural yang dapat terjadi, terutama akibat pengisian berlebihan dan ketidakseimbangan tegangan. Meskipun penelitian ini memberikan dasar yang kuat mengenai perilaku operasional baterai, terutama jenis lead-acid, namun penelitian ini lebih banyak berfokus pada model teoretis dan temuan umum tanpa mempertimbangkan tantangan operasional spesifik yang dihadapi oleh sistem, seperti yang digunakan pada turbin gas.

Celah yang ditinggalkan oleh kedua penelitian ini adalah kurangnya penelitian yang berfokus pada baterai Valve Regulated Lead-Acid (VRLA) dalam sistem energi yang krusial, terutama di sektor industri dan energi. Celah ini diisi oleh penelitian ini, yang berfokus pada sistem baterai VRLA yang digunakan dalam Gas Turbine Generators (GTG) dan Gas Turbine Compressors (GTC). Berbeda dengan temuan umum yang ada pada penelitian Setyadi (2021), penelitian ini mengambil pendekatan berbasis data dengan menganalisis tegangan pengisian, efek polarisasi, dan resistansi internal dalam sistem energi cadangan dunia nyata. Dengan mengevaluasi masalah operasional spesifik seperti overcharging, ketidakseimbangan tegangan, dan korosi, penelitian ini mengisi kekosongan yang ditinggalkan oleh penelitian sebelumnya, serta menawarkan solusi yang disesuaikan untuk memperpanjang umur dan keandalan baterai pada sistem turbin gas.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki faktor-faktor yang berkontribusi terhadap pertumbuhan kutub positif pada baterai VRLA yang digunakan dalam sistem turbin gas dan mengusulkan strategi mitigasi yang efektif untuk mempercepat proses penuaan baterai. Hasil dari penelitian ini akan memberikan wawasan yang dapat diterapkan dalam mengoptimalkan praktik pemeliharaan baterai, yang akan meningkatkan kinerja dan keandalan sistem cadangan daya dalam infrastruktur penting. Solusi yang diusulkan, seperti penerapan equalization charging dan langkah-langkah stabilisasi tegangan, dirancang untuk meningkatkan umur dan efisiensi baterai VRLA secara keseluruhan, sehingga memastikan pasokan energi yang tidak terputus di sektor industri, terutama saat terjadi pemadaman daya.

METODE PENELITIAN



Gambar 4. Diagram Prosedur Penelitian

Gambar 4 dalam studi kasus ini menggambarkan rancangan penelitian yang menggunakan metode regresi linier sederhana, yang terdiri dari lima tahapan utama. Pertama, dilakukan identifikasi masalah dengan menganalisis faktor-faktor yang menyebabkan percepatan pertumbuhan kutub baterai. Kedua, pengumpulan data dilakukan melalui observasi di dua lokasi, yaitu ruang baterai MSS (Main Sub Station) yang menunjukkan kondisi baterai di atas 80%, dan ruang baterai USS (Unit Sub Station) di mana seluruh 55 unit baterai mengalami pertumbuhan kutub signifikan (lebih dari 12 mm), serta empat sel mengalami penurunan tegangan drastis selama uji kapasitas, berdasarkan data

sekunder dari produsen baterai. Ketiga, data yang terkumpul diolah menggunakan fitur *Descriptive Statistics* pada Microsoft Excel 2010 untuk mendapatkan gambaran umum statistik. Keempat, dilakukan analisis data menggunakan metode *z-test: Two Sample for Means* guna menguji perbedaan rata-rata antar kelompok data. Terakhir, hasil analisis digunakan untuk menyusun solusi terhadap permasalahan yang ditemukan dan menjadi dasar pengambilan keputusan dengan memanfaatkan fungsi regresi linier.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran Tinggi Kutub dan Tegangan Baterai VRLA

Pada tahap ini, dilakukan pengukuran langsung terhadap pertumbuhan kutub dan tegangan baterai. Pertumbuhan kutub yang lebih cepat terindikasi terjadi kutub positif (ditandai dengan warna merah), menjadi indikator penting dalam menilai kondisi sistem baterai. Gambar 5 memberikan visualisasi yang jelas mengenai kutub positif (merah) dan negatif (biru), sehingga memudahkan identifikasi potensi anomali. Melalui analisis gambar tersebut, data pertumbuhan kutub baterai dikumpulkan dan dianalisis secara statistik untuk mengidentifikasi pola percepatan pertumbuhan. Analisis ini bertujuan mengevaluasi pengaruh faktor-faktor seperti suhu operasional (Bosch auto parts, 2019), tegangan pengisian, dan variabel lain yang berkontribusi terhadap perubahan struktur baterai. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan wawasan ilmiah yang mendalam untuk pengelolaan dan pemeliharaan sistem baterai yang optimal.

Pengamatan dilakukan di dua lokasi, yaitu ruang baterai MSS (Main Sub Station) dan ruang baterai USS (Unit Sub Station). Di ruang baterai MSS, seluruh baterai menunjukkan kondisi di atas 80%. Sementara itu, di ruang baterai USS, 55 dari 55 unit baterai mengalami peningkatan kutub yang signifikan, yaitu lebih dari 12 mm. Informasi ini merupakan data sekunder yang diperoleh langsung dari pihak produsen baterai. Selain itu, 4 (empat) sel baterai mengalami penurunan tegangan yang sangat signifikan selama pengujian kapasitas baterai, seperti terlihat pada Gambar 6. Temuan ini mengindikasikan adanya ketidakseimbangan kinerja dan potensi kerusakan yang serius.



Gambar 5. Pengukuran pertumbuhan kutub baterai VRLA



Gambar 6. Grafik kapasitas baterai menggunakan Torkel 860

Pengukuran tegangan output battery charger

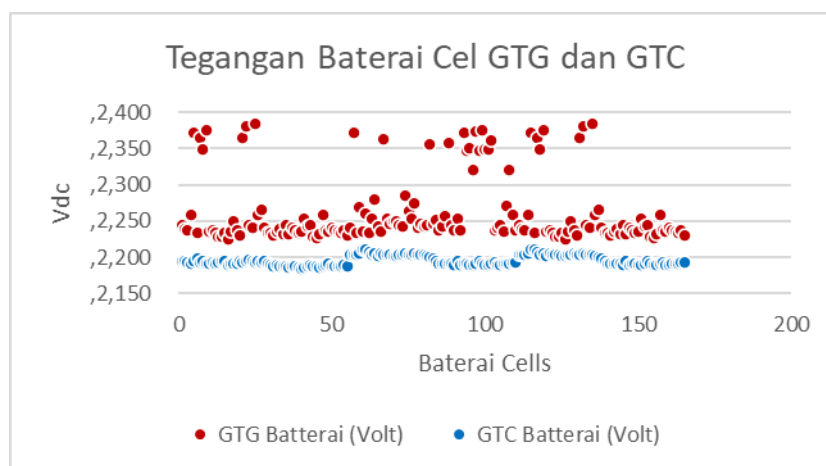
Pada tahap ini dilakukan inspeksi teknis terhadap kondisi baterai yang menunjukkan adanya pertumbuhan kutub positif. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan floating charge GTC baterai berada di bawah standar operasional, yaitu 121.0 Vdc seharusnya adalah 55 baterai cell x 2.5 Vdc = 123.75, Vdc sehingga setiap sel baterai saat ini hanya menerima tegangan sebesar 2.20 Vdc, lebih rendah dari nilai standar yang direkomendasikan yaitu 2.25.

Tabel 1. Hasil pengukuran tegangan output battery charger

Waktu	Tegangan Vdc	Arus Adc
0:00:15	120.6	38.0
0:00:30	121.0	21.0
0:01:00	121.0	15.0
0:02:00	121.0	11.0
0:03:00	121.0	9.5
0:04:00	121.0	8.1
0:05:00	121.0	7.0
0:07:00	121.0	5.3
0:10:00	121.0	4.0
0:15:00	121.0	2.8
0:20:00	121.0	1.4

Pengolahan data dengan z-test: Two Sample for Means

Pada tahap pengolahan data, dilakukan analisis terhadap tegangan sel baterai pada unit 051-BTT-1001 (GTC) dan 061-BTT-1001 (GTG) dengan mengkaji total populasi baterai dari tahun 2021 hingga 2023 berdasarkan hasil pengukuran yang telah dilakukan. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengevaluasi apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua unit tersebut dalam hal parameter tegangan sel baterai. Untuk itu, digunakan fitur *z-Test: Two Sample for Means* pada Microsoft Excel sebagai alat analisis statistik untuk menguji hipotesis perbedaan rata-rata tegangan antara baterai unit GTG dan GTC.



Gambar 7. Pengukuran tegangan baterai cell

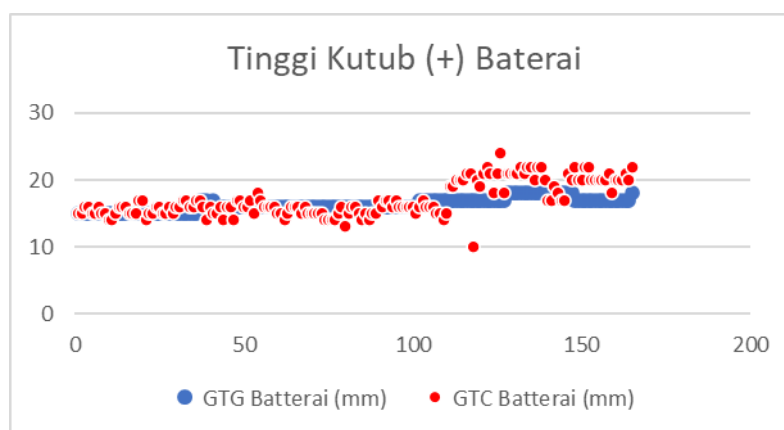
Tabel 2. Analisa z-Test: Two Sample for Means tegangan GTG dan GTC Baterai

	GTG Batterai (Volt)	GTC Batterai (Volt)
Mean	2.26250303	2.195472727
Known Variance	0.002264276	4.43727E-05
Observations	165	165
Hypothesized Mean Difference	0	
z	17.91984416	
P(Z<=z) one-tail	0	

z Critical one-tail	1.644853627
<i>P(Z<=z) two-tail</i>	<i>0</i>
z Critical two-tail	1.959963985

Berdasarkan analisis z-Test: Two Sample for Means (Tabel 2), nilai $H_0 < 0,05$ atau $P(Z \leq z)$ two-tail $< 0,05$ menunjukkan perbedaan signifikan tegangan baterai antara GTG dan GTC, dengan GTG secara umum lebih tinggi. Namun, ditemukan anomali lain, yaitu ketidakkonsistenan nilai tegangan individual baterai/sel pada GTG yang tidak merata secara signifikan (Gambar 9). Hal ini mengindikasikan adanya variabilitas kinerja yang perlu dievaluasi lebih lanjut.

Pada tahap pengolahan data, dilakukan analisis terhadap tinggi kutub positif (+) baterai pada unit 051-BTT-1001 (GTC) dan 061-BTT-1001 (GTG) dengan mengkaji total populasi baterai dari tahun 2021 hingga 2023 berdasarkan hasil pengukuran yang tersedia. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua unit dalam parameter tinggi kutub positif baterai. Untuk keperluan tersebut, digunakan fitur *z-Test: Two Sample for Means* pada Microsoft Excel sebagai alat statistik untuk menguji perbedaan rata-rata tinggi kutub positif antara baterai unit GTG dan GTC.



Gambar 8. Pengukuran pertumbuhan kutub baterai

Berdasarkan Analisa z-Test: Two Sample for Means pada tabel 3 di dapatkan nilai $H_0 < 0.05$, ini menandakan terdapat perbedaan yang signifikan pada pertumbuhan kutub baterai GTG dan GTC. Dimana pertumbuhan kutub baterai GTC lebih cepat dari pertumbuhan kutub baterai GTG.

Tabel 3. Analisa z-Test: Two Sample for Means GTG dan GTC Pertumbuhan Kutub

	GTG Baterai	GTC Baterai
Mean	16.32121212	17.04242424
Known Variance	0.914486327	6.528677014
Observations	165	165
Hypothesized Mean Difference	0	
z	-3.39567576	
P(Z<=z) one-tail	0.000342297	
z Critical one-tail	1.644853627	
<i>P(Z<=z) two-tail</i>	<i>0.000684594</i>	
z Critical two-tail	1.959963985	

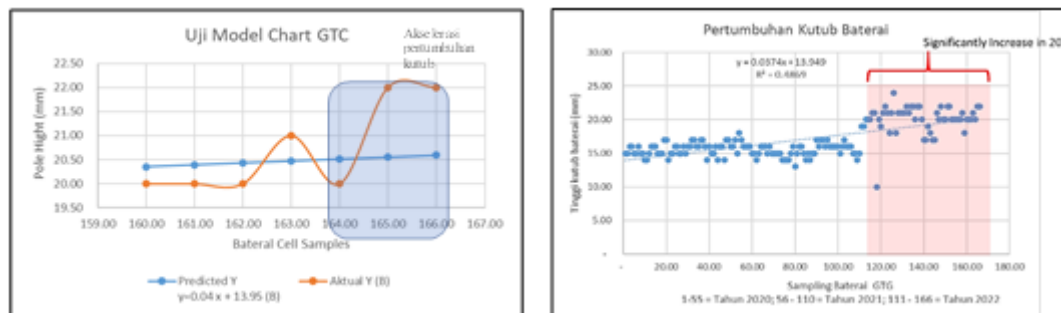
Berdasarkan analisis z-Test: Two Sample for Means pada Tabel 3, diperoleh nilai $H_0 < 0.05$ atau $P(Z \leq z)$ two-tail < 0.05 , yang menunjukkan adanya perbedaan signifikan pada pertumbuhan kutub baterai GTG dan GTC. Pertumbuhan kutub baterai GTG secara umum lebih lambat dibandingkan GTC.

Analisis Regresi Linier

Pada tahap pengolahan data sebelumnya, analisis dilakukan menggunakan *z-test: Two Sample for Means* yang menghasilkan nilai $p\text{-value } (Z \leq z) < 0,05$, yang mengindikasikan adanya perbedaan yang sangat signifikan pada parameter kunci yang dianalisis, yaitu pengaruh tegangan sel baterai terhadap pertumbuhan kutub baterai. Berdasarkan temuan ini, peneliti melanjutkan proses dengan melakukan verifikasi melalui analisis regresi linier sederhana sesuai dengan Persamaan 1, 2, 3, dan 4 untuk memastikan validitas dan kebenaran hasil yang diperoleh. Dalam analisis regresi linier pada unit GTC, diperoleh nilai MAPE (Mean Absolute Percentage Error) sebesar 8,78% dan R^2 (R-square) sebesar 0,4869, dengan persamaan regresi linier $y = 0,04x + 13,95$. Model ini kemudian dievaluasi menggunakan 7 sampel sel baterai pada tahun 2023, yaitu sel ke-160 hingga 166 (Tabel 4), guna memvalidasi akurasi model terhadap data aktual. Hasil evaluasi menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada pertumbuhan kutub positif baterai di tahun 2023 yang melebihi prediksi model, sehingga mengonfirmasi adanya percepatan pertumbuhan kutub positif yang tidak terduga dan menunjukkan adanya faktor tambahan yang memengaruhi dinamika pertumbuhan tersebut (Gambar 9).

Tabel 5. Hasil uji model persamaan regresi linier pada unit baterai GTC

Baterai sampling ke n (Sel Baterai) X	Predicted Y ($y = 0.04x + 13.95$)	Aktual Y
A	B	B'
160	20.35	20
161	20.39	20
162	20.43	20
163	20.47	21
164	20.51	20
165	20.55	22
166	20.59	22



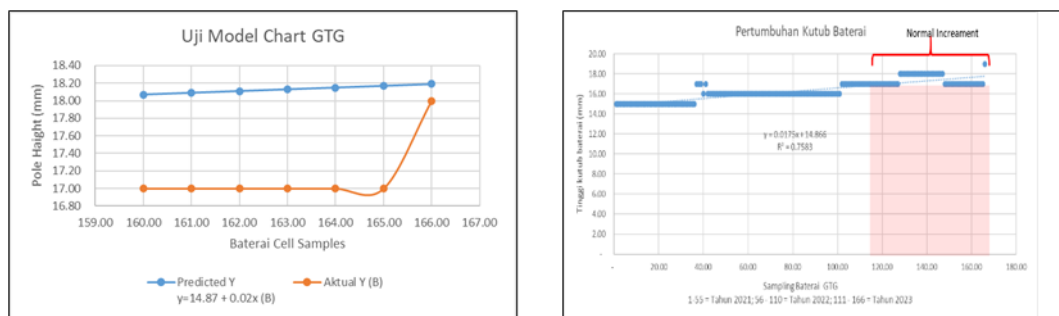
Gambar 9. Trend pertumbuhan kutub baterai GTC dengan pendekatan regresi linier

Sumber: (a) Uji Model Chart dan (b) Trend Pertumbuhan Baterai 2021-2023

Proses analisis regresi linier juga dilakukan pada unit GTG untuk menguji percepatan pertumbuhan kutub baterai, dan dari hasil analisis diperoleh nilai MAPE (Mean Absolute Percentage Error) sebesar 2,20% serta R^2 (R-square) sebesar 0,758, dengan persamaan regresi linier $y = 14,87 + 0,02x$. Evaluasi terhadap model ini dilakukan menggunakan 12 sampel sel baterai pada tahun 2023, yaitu sel ke-160 hingga 166, guna memvalidasi akurasi prediksi model terhadap data aktual. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa tidak terjadi peningkatan signifikan pada pertumbuhan kutub positif baterai di tahun 2023, dan nilai pertumbuhan tetap berada dalam batas prediksi model. Temuan ini mengonfirmasi bahwa tidak terdapat percepatan pertumbuhan kutub positif pada unit GTG, sehingga pertumbuhan yang terjadi konsisten dengan pola yang telah ditetapkan dalam model regresi linier tersebut.

Tabel 6. Hasil uji model persamaan regresi linier pada unit baterai GTG

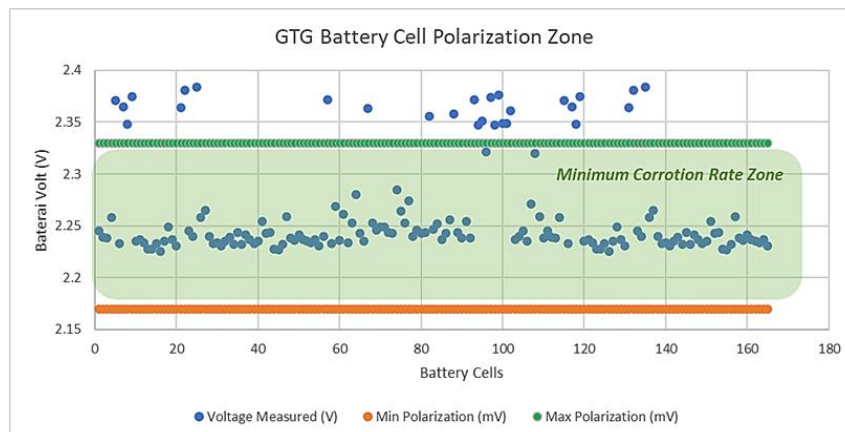
Baterai sampling ke n (Sel Baterai) X	Predicted Y	Aktual Y
$y=14.87 + 0.02 x$		
A	B	B'
160	18.07	17.00
161	18.09	17.00
162	18.11	17.00
163	18.13	17.00
164	18.15	17.00
165	18.17	17.00
166	18.19	19



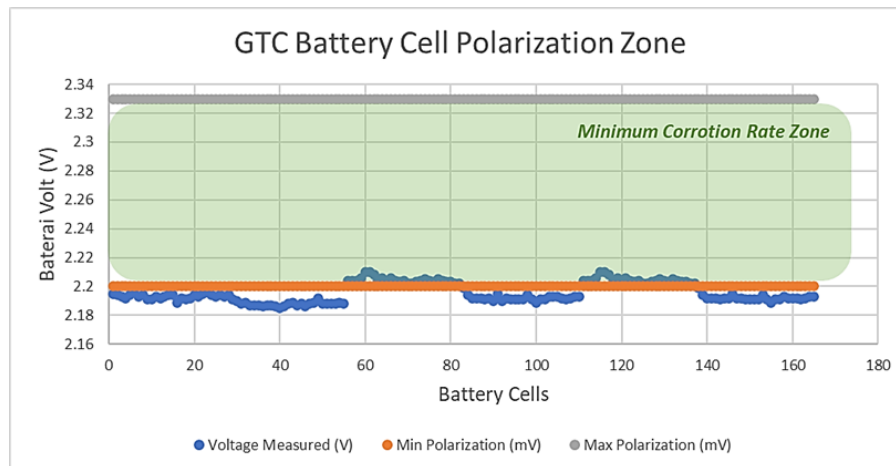
Gambar 10. Trend pertumbuhan kutub baterai GTG dengan pendekatan regresi linier

Sumber: (a) Uji Model Chart dan (b) Trend Pertumbuhan Baterai 2021-2023

Pada analisis ini, peneliti bertujuan memvalidasi nilai polarisasi setiap sel baterai pada masing-masing unit GTG dan GTC. Berdasarkan Gambar 10, diketahui bahwa nilai *corrosion rate* minimum berada pada rentang 50–80 milivolt DC. Untuk menentukan batas aman tegangan atau zona tegangan minimum *corrosion rate* pada baterai, digunakan rumus sebagai berikut: $V_{safe \min} = (V_{fb} - V_{nb}) - 50$ milivolt (5) dan $V_{safe \max} = (V_{fb} - V_{nb}) - 80$ milivolt (6), di mana V_{fb} merupakan tegangan baterai saat terisi penuh (dalam penelitian ini sebesar 2,25 Volt) dan V_{nb} adalah tegangan nominal baterai (2 Volt). Berdasarkan perhitungan dari Persamaan 5 dan 6, diperoleh rentang tegangan aman yaitu $V_{safe \min} = 2,20$ Volt dan $V_{safe \max} = 2,33$ Volt. Selanjutnya, data hasil perhitungan divisualisasikan dalam bentuk grafik *scatter chart* untuk menunjukkan tren zona polarisasi sel baterai, dengan Gambar 11 mewakili zona polarisasi baterai GTG dan Gambar 12 untuk baterai GTC.



Gambar 11. GTG battery cell polarization zone



Gambar 12. GTC battery cell polarization zone

Berdasarkan uji validasi yang telah dilakukan, diperoleh hasil penting yang dapat dijadikan referensi bagi praktisi maupun tenaga teknis kelistrikan dalam melakukan perawatan baterai VRLA. Pertama, tegangan keluaran *battery charger* pada unit GTC lebih rendah dari standar, yaitu hanya mencapai 120–121 VDC, sehingga menyebabkan 165 sel baterai tidak mencapai tegangan maksimum 2,25 VDC. Kedua, tegangan keluaran *battery charger* pada unit GTG sesuai standar, yaitu 123 VDC, sehingga 166 sel baterai mendekati tegangan maksimum 2,25 VDC. Ketiga, perbedaan tegangan keluaran *battery charger* antara unit GTG dan GTC sangat signifikan, melampaui spesifikasi *float charge* untuk satu baterai ($-0,10 \text{ V}/+0,20 \text{ V}$), yang dibuktikan melalui uji *z-test two sample for means* dan regresi linier dengan hasil $H_0 < 0,05$. Keempat, menurut Marcel Dekker pada Gambar 5, laju atau percepatan tingkat korosi pada baterai VRLA sangat dipengaruhi oleh tegangan polarisasi (dalam miliVolt), di mana zona aman atau *minimum corrosion rate zone* berada pada rentang 50–80 miliVolt. Kelima, berdasarkan data pengukuran sel baterai pada unit GTC, sistem baterai tersebut berada pada *maximum corrosion rate zone*. Keenam, sebaliknya, data pengukuran sel baterai pada unit GTG menunjukkan bahwa sistem baterainya berada dalam zona *minimum polarization rate*.

KESIMPULAN

Berdasarkan temuan penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa uji regresi linier merupakan metode yang efektif dalam mendeteksi pertumbuhan dini kutub baterai VRLA. Hasil analisa menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan secara statistik pada keluaran tegangan *battery charger*, yang secara langsung mempengaruhi pertumbuhan kutub positif baterai dan ketidakseragaman tegangan pada setiap sel baterai yaitu $-0.10 \text{ V}/+0.20 \text{ V}$. Temuan ini mempertegas pentingnya melakukan *equalization charge* secara periodik, menjaga stabilitas *floating charge voltage*, serta memastikan keseragaman tegangan per sel baterai (V/cell). Selain itu, polarisasi (millivolt) pada setiap sel baterai harus dijaga agar tidak melebihi rentang *minimum corrosion rate zone*, yaitu 50–80 milivolt. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi penting untuk optimalisasi perawatan baterai VRLA, khususnya dalam upaya memperpanjang masa pakai (*service life*) dan meningkatkan keandalan sistem baterai secara keseluruhan. Sebagai langkah pencegahan terhadap pertumbuhan kutub baterai yang tidak normal, disarankan penerapan *equalization charge* secara berkala ketika terdeteksi ketidakseragaman tegangan antar sel baterai melebihi $-0.10 \text{ V}/+0.20 \text{ V}$ % dan deviasi polarisasi melebihi rentang 50-80mV.

DAFTAR PUSTAKA

Ajriyanto, M. K., Anggraini, D., & Kriswarini, R. (2017). Analisis korosi paduan ZIRLO-Mo dalam media NaCl menggunakan metode polarisasi. *Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, 23(3),

- 183–194.
- Akbar, B. G. (2022). Karakteristik Korosi Ti 6Al 4V–ELI Dengan Metode Polarisasi Tafel Dalam Larutan Hank's. *Tugas Akhir. Universitas Andalas*.
- Anisa, Z., & Setyaningrum, D. (2022). Pemanfaatan Elektrolit Air Laut Sebagai Sumber Energi Listrik Baterai Dengan Elektroda Tembaga-Aluminium. *Sainmatika: Jurnal Ilmiah Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 19(2), 156–162.
- Ardodi, H., & Pasaribu, Y. (2024). Tantangan dan kompetensi kunci desainer produk industri dalam membangun masa depan sepeda motor listrik nasional di era teknologi 4.0. *Jurnal Desain Indonesia*, 6(1), 15–38.
- Atmaja, M. I. B. (2023). *Analisis Uji Kapasitas Baterai 110V Berumur Lebih dari 10 Tahun pada Gardu Induk 150 KV Kudus*. Universitas Islam Sultan Agung.
- Azmi, R. B., Hidayatullah, R. A., & Ningtyas, A. H. P. (2024). Analisis Efek Kegagalan Pada Performa Turbin Gas Berbasis FMEA (Failure Mode And Effects Analysis). *Enigma: Engineering in Green Machinery*, 1(1), 28–35.
- Bosch auto parts. (2019). AGM technology. *Bosch Auto Parts*.
- Çatak, J., Semerciöz, A. S., Yalçinkaya, B. H., Yılmaz, B., & Özilgen, M. (2018). Bioenergy Conversion. In *Comprehensive Energy Systems: Volumes 1-5* (Vol. 4). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00447-8>
- Effendi, R. (2024). Integrasi Sistem Energi Terbarukan dan Penyimpanan untuk Meningkatkan Efisiensi Konversi Energi pada Mikrogrid. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 8(1), 255–264.
- Faisal, F. (2022). *Rancang Bangun Sistem Pemantau Tegangan Bank Baterai Seri Pada Base Transceiver Station (Bts) Berbasis Arduino*. Universitas Islam Sultan Agung.
- Hutauruk, F. Y. (2017). Analisa Laju Korosi pada Pipa Baja Karbon dan Pipa Galvanis dengan Metode Elektrokimia. *Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya*.
- Ihsan, A. N., Joko, J., Suprianto, B., & Wrahatnolo, T. (2022). Analisis dan Efisiensi Kebutuhan Kapasitas Baterai 110 Volt DC Gas Insulated Switchgear (GIS) 150 KV Wonokromo Surabaya. *Jurnal Teknik Elektro*, 11(3), 481–488.
- Istiqlal, M. F., Priatna, E., & Sutisna, S. (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*, 4(2).
- Janardana, G. B. A. (2020). *Analisis Keandalan dan Biaya Siklus Hidup untuk Optimalisasi Manajemen Aset Pembangkit (Studi Kasus Peralatan Steam Turbine di PT. Pembangkitan Jawa Bali)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Kemal Alfaridzi, M. (2024). *Analisis Perbandingan Integrated Performa Baterai Vrla 20 Ah Dengan Baterai Lithium-Ion 20 Ah Pada Photovoltaic System*. Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- Nasrullah, E., Alam, S., & Arif, A. (2022). Perancangan Alat Ukur State Of Charge, Depth Of Discharge Dan State Of Health Baterai Lithium-Ion (Li-Ion) Dan Baterai Nickel-Metal Hydride (Ni-Mh) Menggunakan Arduino Nano. *Prosiding Seminar Nasional Ilmu Teknik Dan Aplikasi Industri Fakultas Teknik Universitas Lampung*, 5, 204–212.
- Nasution, M. (2021). Karakteristik Baterai Sebagai Penyimpan Energi Listrik Secara Spesifik. *Journal of Electrical Technology*, 6(1), 35–40.
- Nugraha, L. P. (2024). *LKP Luthfi Prastya Nugraha 218120011 Pemantauan Penggunaan Daya dan Gangguan Melalui Panel Sistem Kontrol di PT. PLN NP UP Belawan*.
- Pang, Z., Yang, K., Song, Z., Chen, G., Niu, P., Wang, S., & Meng, J. (2024). Effects of floating charge ageing on electrochemical impedance spectroscopy of lead-acid batteries. *Journal of Energy Storage*, 87(February), 111322. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111322>
- Putra, Z. Z. Z., Hartono, H., & Kustori, K. (2019). Sistem Pengisian Baterai Sekunder Secara Otomatis Berbasis Microcontroller Sebagai Media Pembelajaran Dilaboratorium Politeknik

- Penerbangan Surabaya. *Prosiding SNITP (Seminar Nasional Inovasi Teknologi Penerbangan)*, 3(1).
- Riastuti, R., Siallagan, S. T., Rifki, A., Herdino, F., & Ramadini, C. (2017). Aplikasi Metoda Polarisasi Untuk Pengukuran Ketahanan Korosi Baja Lapis Listrik Nanokristal Nikel. *Prosiding Seminar Nasional Metalurgi Dan Material (SENAMM)*, 66–74.
- Rizal, R. F. (2022). Analisis Checkup Pemeliharaan Batteray Capacity Test (BCT) 110 VDC Di PT. PLN (Persero) Gardu Induk 150 KV Jatigedong Jombang. *ALINIER: Journal of Artificial Intelligence & Applications*, 3(2), 69–80.
- Rudiatmadja, I. (2018). *Rancang Bangun Dan Monitoring Charger Baterai Dengan Metode Charging Otomatis Menggunakan Rangkaian Sensor Tegangan Dan Regulator Arus Berbasis Arduino Mega 2560*. undip.
- Setyadji, K. B. (2021). *Analisa Kapasitas Baterai Sebagai Sumber Cadangan Dc Pada Gi 150 Kv Srandol ULTG Semarang PT PLN (PERSERO) UPT Semarang*. Universitas Sultan Agung.
- Siburian, J. S. M., & Widiyanto, S. (2024). Kerangka Kerja Manajemen Risiko Untuk Kebijakan Pemerintah Terkait Industri Baterai. *Ekombis Sains: Jurnal Ekonomi, Keuangan Dan Bisnis*, 9(2), 151–168.
- Sidabutar, O. P. (2025). Optimalisasi Kapasitas Baterai 110 Volt DC di Gardu Induk 150 kV Dawuan: Studi Kualitatif Berdasarkan Pengujian Lapangan. *Jurnal Serambi Engineering*, 10(3).
- Siregar, M. F., Kusuma, B. S., & Ginting, Z. (2023). Pemanfaatan Energi Matahari Menjadi Energi Listrik Kapasitas 1300 Watt untuk Beban Rumah Tangga Di Kota Medan. *Prosiding Seminar Nasional Teknik UISU (SEMNASTEK)*, 6(1), 172–176.
- Sumantri, B., Ismail, A. Y., & Syamsuri, S. (2025). Analisis Mitigasi Risiko Kegagalan Operasional Peralatan Melalui Pendekatan RCM Dan MVSM Dengan Perspektif FMECA: (Studi Kasus Unit Gas Turbine Compressor Centaur 50 Pada Offshore Platform Di PT. XYZ). *Nusantara of Engineering (NOE)*, 8(01), 65–74.
- Ummah, M. S. (2019). No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1).
- Waruwu, H. P. (2023). *Analisis Konversi Energi Flexible Solar Panel Dan Sistem Kontrol Baterai Plts Sentralisasi*. Universitas Medan Area.
- Widarsana, I. (2024). *Analisis Kapasitas Baterai VRLA Menggunakan Simulasi Beban dan Pengujian Tahanan Dalam serta Penggantiannya untuk Load Break Switch PT. PLN (Persero) UP2D BALI*. Politeknik Negeri Bali.