

**PREDIKSI KELAYAKAN MASA PAKAI PADA BATERAI 110 VOLT GARDU
INDUK 150 KV DARMO GRANDE****Pramudhi Maulana¹, Joko², Ibrohim³, Bambang Suprianto⁴**

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

e-mail: pramudhi.21029@mhs.unesa.ac.id, joko@unesa.ac.id, ibrohim@unesa.ac.id,
bambangsuprianto@unesa.ac.id**Abstract (English)**

This study aims to predict the percentage decline in performance of the 110 VDC NiCd Battery Unit 1 at the Darmo Grande Substation, which has been operating since January 2002. The methodology involves data acquisition, calculation of efficiency and electrolyte specific gravity, comparison with established efficiency standards, and prediction of battery lifespan. Based on discharging tests conducted in 2019, 2022, and 2024, the battery capacity decreased from 182 Ah to 157 Ah, and its efficiency dropped from 88.78% in 2019 to 76.58% in 2024. When compared to the defined standard, the 2024 efficiency value falls into the poor performance category (<80%), accompanied by an increase in electrolyte specific gravity from 1.18 g/l in 2019 to 1.20 g/l in 2024. An exponential regression model was applied to estimate the efficiency degradation trend, and evaluation results indicated high accuracy. The prediction results suggest that the battery's efficiency reached 80% in September 2023 and is projected to decline further to 60% by July 2033. These findings can serve as a valuable reference for planning optimal battery maintenance or replacement strategies.

Article History*Submitted: 26 Juli 2025**Accepted: 29 Juli 2025**Published: 30 Juli 2025***Key Words**NiCd battery,
exponential regression,
efficiency degradation,
battery capacity.**Abstrak (Indonesia)**

Penelitian ini bertujuan memprediksi persentase penurunan kinerja baterai NiCd 110 VDC Unit 1 di Gardu Induk Darmo Grande yang telah beroperasi sejak Januari 2002. Metode yang digunakan untuk mencapai tujuan adalah memperoleh data, kemudian melakukan perhitungan efisiensi dan berat jenis dari data yang didapat dan membandingkan standar efisiensi yang telah ditetapkan, serta melakukan prediksi terhadap umur baterai. Berdasarkan uji discharging tahun 2019, 2022, dan 2024, terjadi penurunan kapasitas dari 182 Ah menjadi 157 Ah dan efisiensi mengalami penurunan dari 88,78% pada tahun 2019 menjadi 76,58% pada tahun 2024. Jika dibandingkan dengan standar yang ditetapkan, efisiensi pada tahun 2024 sudah berada di kondisi yang buruk yaitu <80%, disertai peningkatan berat jenis elektrolit dari 1,18 g/l pada tahun 2019 menjadi 1,20 g/l pada tahun 2024. Model regresi eksponensial digunakan untuk memperkirakan tren penurunan efisiensi, dan hasil evaluasi menunjukkan akurasi yang tinggi. Hasil Prediksi menunjukkan efisiensi mencapai 80% pada Bulan September 2023 dan 60% pada Bulan Juli 2033. Temuan ini dapat menjadi acuan dalam perencanaan pemeliharaan atau penggantian baterai secara optimal.

Sejarah Artikel*Submitted: 26 Juli 2025**Accepted: 29 Juli 2025**Published: 30 Juli 2025***Kata Kunci**Baterai NiCd, regresi
eksponensial, penurunan
efisiensi, kapasitas
baterai.**PENDAHULUAN**

Kinerja peralatan listrik di gardu induk harus optimal untuk memastikan kelancaran suplai listrik ke konsumen [1]. Di dalam sistem gardu induk, sistem tenaga DC merupakan salah satu subsistem penting dalam instalasi gardu induk, yang berfungsi untuk menyediakan suplai tegangan searah (DC) bagi peralatan kontrol dan proteksi, seperti relay proteksi, motor aktuator pada peralatan pemutus tenaga (PMT) dan pemisah (PMS).

Sumber utama DC berasal dari rectifier yang mengubah tegangan AC dari Trafo Pemakaian Sendiri (PS) menjadi tegangan DC [2]. Dan Baterai sebagai sumber sekunder disaat terjadinya gangguan atau pemadaman (Blackout) pada Trafo Pemakaian Sendiri (PS), baterai dapat menggantikan peran Trafo PS dengan memberikan sumber DC secara langsung dalam jangka waktu tertentu pada sistem proteksi gardu induk. Jika sistem proteksi turut padam saat terjadi gangguan, maka peralatan seperti relay proteksi, PMT, dan PMS tidak dapat beroperasi, sehingga gardu induk berpotensi mengalami kegagalan operasional. Oleh karena itu, sistem proteksi harus tetap aktif dalam kondisi apapun [3].

Mengingat pentingnya peran baterai di gardu induk, diperlukan pemeliharaan rutin [4][6]. Pemeliharaan baterai dapat dilakukan dalam berbagai periode, antara lain pemeliharaan mingguan, bulanan, enam bulanan, dan dua tahunan [1][2]. Pengukuran tegangan dilakukan untuk menilai kondisi tegangan pada masing-masing sel baterai serta tegangan keseluruhan dari rangkaian baterai. Nilai kapasitas pengosongan yang didapat dari pengujian digunakan untuk menentukan berapa efisiensi baterai yang menilai kondisi atau kualitas baterai secara menyeluruh. Sementara itu, pemeriksaan suhu dan berat jenis elektrolit bertujuan untuk mengevaluasi kondisi elektrolit, yang berperan penting dalam menjaga kinerja dan keandalan baterai secara optimal. Berdasarkan ketentuan dalam SKDIR 0520-2.K/DIR/2014, baterai dikategorikan dalam kondisi baik apabila efisiensinya melebihi 80%, sementara efisiensi di bawah 60% menunjukkan kondisi tidak layak atau mengalami kerusakan [5].

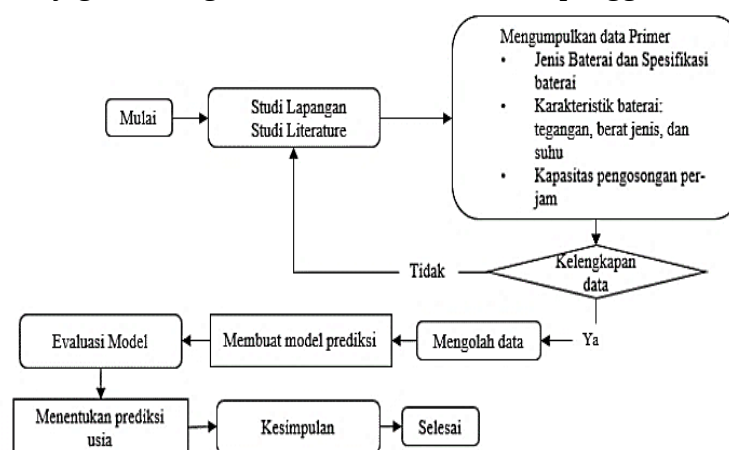
Dalam dunia industri, sistem secanggih apapun tetap memiliki potensi mengalami gangguan, baik ringan maupun berat [6]. Oleh karena itu, Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi sisa usia pakai baterai melalui efisiensi kapasitas menggunakan model regresi eksponensial. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi prediksi sisa usia dan persentase efisiensi pengosongan baterai. Informasi tersebut dapat menjadi dasar dalam pengambilan keputusan mengenai pemeliharaan dan pengelolaan sistem baterai dan sumber DC di Gardu Induk Darmo Grande.

Rumusan Masalah

1. Bagaimana hasil perhitungan efisiensi kapasitas dalam memenuhi standar efisiensi baterai operasional NiCd 110 Volt PT. PLN (Persero)?
2. Bagaimana analisis prediksi usia baterai NiCd 110 Volt dalam mencapai kondisi kritis dan perlu dilakukannya penggantian?

METODE

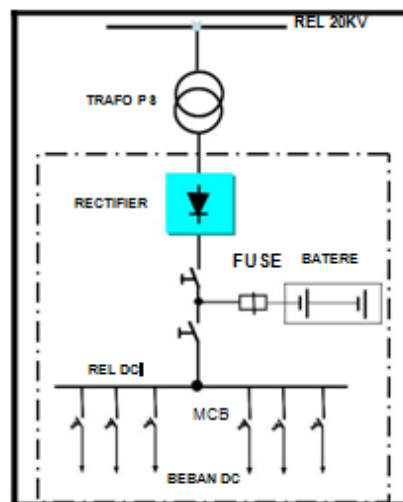
Gambar 1 menunjukkan bahwa penelitian ini menggunakan metode sekunder dengan data pemeliharaan 2 tahunan dari Gardu Induk Darmo Grande berupa kapasitas discharging baterai dalam 3 kali pengujian. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi penurunan performa berdasarkan standar PLN, serta memprediksi umur baterai menggunakan regresi eksponensial di Google Colaboratory guna mengetahui efisiensi dan waktu penggantian baterai.



Gambar 1 Flowchart Alur Penelitian

A. Sumber DC Gardu Induk

Dalam sistem tenaga listrik, gardu induk berfungsi mengendalikan pasokan energi di suatu wilayah. Dua jenis sumber daya digunakan yakni, sumber listrik AC untuk distribusi tegangan tinggi dan kebutuhan internal (380 volt), serta DC untuk mendukung sistem proteksi, kontrol switch, dan komunikasi di gardu induk. Berikut gambar 2 merupakan instalasi sumber listrik DC di Gardu Induk.



Gambar 2 Instalasi Sumber DC
Gardu Induk

Berdasarkan Gambar 2, sumber DC di gardu induk berasal dari charger atau rectifier yang terhubung ke rel beban DC. Namun, jika terjadi blackout pada trafo pemakaian sendiri, rectifier tidak dapat berfungsi karena kehilangan sumber AC. Berikut peralatan-peralatan yang digunakan pada sumber DC Gardu induk:

1. Rectifier

Dalam operasionalnya, trafo pemakaian sendiri (PS) menerima suplai 20 kV AC yang diturunkan menjadi 380 VAC sebelum masuk ke rectifier. Di rectifier, tegangan ini diubah menjadi 110V/48V DC oleh transformator step-down dan dikendalikan oleh thyristor yang terhubung ke modul AVR (Auto Voltage Regulator), yang mengatur arus dan tegangan ke beban atau baterai. Tegangan kemudian disaring melalui filter untuk menghilangkan ripple sebelum dialirkan ke baterai guna menjaga kapasitas tetap penuh sebagai sumber cadangan. Rectifier memiliki tiga mode pengisian[5]:

- Floating charge*: Menjaga baterai tetap penuh dengan tegangan sedikit di atas nominal untuk mengimbangi self-discharge.
- Boosting charge*: Mengisi ulang baterai dengan cepat setelah digunakan.
- Equalizing mode*: Meratakan tegangan antar sel baterai yang tidak seimbang selama mode floating.

2. Baterai NiCd

Baterai diperlukan sebagai sumber cadangan DC yang dapat diisi ulang dan diharapkan mampu menyuplai beban selama beberapa 5 jam sesuai rekomendasi pabrikan. Baterai Ni-Cd (Nickel Cadmium) merupakan jenis baterai alkali yang memiliki keunggulan seperti penurunan energi hanya 10% per bulan, konstruksi tersegel yang bebas bocor dan bebas perawatan, serta tahan terhadap overcharge dan overdischarge. Pengisian ulang cepat tanpa penurunan performa menjadikannya andal, bahkan setelah ± 900 siklus penggunaan. Karena keunggulan tersebut, baterai Ni-Cd sering digunakan di gardu induk, dengan ciri umum [5].

- Tegangan nominal per sel: 1,2 volt
- Berat jenis elektrolit tidak berbanding lurus dengan kapasitas
- Umur bergantung pada operasi dan pemeliharaan

d. Tegangan pengisian:

- Floating : 1,40–1,44 V
- Equalizing : 1,50–1,60 V
- Boosting: 1,65–1,70 V

B. Parameter Pengujian Pengosongan Baterai

1. Kapasitas

Kapasitas baterai menunjukkan kemampuan baterai menyimpan dan melepaskan energi listrik, dinyatakan dalam Ampere Hour (Ah). Misalnya, baterai 110 VDC dengan kapasitas 300 Ah mampu menyuplai beban 6 A selama 50 jam. Kapasitas ini juga dinyatakan sebagai C5 untuk baterai Ni-Cd dan C10 untuk baterai timbal-asam, yang masing-masing menunjukkan kapasitas yang tersedia dalam 5 atau 10 jam pengosongan.

Beberapa faktor yang memengaruhi penurunan kapasitas baterai meliputi proses pengisian yang tidak optimal, kerusakan elektroda, kandungan karbon dan potasium karbonat yang berlebihan. Baterai dapat digunakan untuk beban besar dalam waktu singkat atau beban kecil dalam durasi panjang. Mengetahui kapasitas baterai penting untuk memperkirakan beban kontinu maupun terputus-putus saat suplai utama terputus. Kapasitas ini dihitung menggunakan persamaan (1) [7].

$$C = I \text{ (Ampere)} \times t \text{ (Hours)} \quad (1)$$

Keterangan:

C = Kapasitas baterai (Ah)

I = Arus (Ampere)

t = Waktu (Jam/sekon)

2. Efisiensi Kapasitas Pengosongan

Efisiensi baterai adalah perbandingan antara kapasitas saat pengosongan dengan kapasitas sebenarnya, dinyatakan dalam persen. Baterai dianggap baik jika efisiensinya >80% dan kurang baik jika <60%, sesuai standar PT. PLN (Persero). Nilai efisiensi dapat dihitung menggunakan persamaan (2) [8].

$$\eta = \frac{C_d}{C_c} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

η = Efisiensi Baterai (%)

C_d = Kapasitas pengosongan (Ampere Hour)

C_c = Kapasitas Pengisian (Ampere Hour)

3. Berat Jenis

Berat jenis elektrolit sangat memengaruhi kapasitas baterai. Jika terlalu tinggi, dapat menyebabkan panas berlebih, korosi, dan pembentukan kristal putih akibat tingginya konsentrasi KOH. Reaksi antara ion OH^- dan kadmium menghasilkan $\text{Cd}(\text{OH})_2$, yang kemudian membentuk endapan seperti Kalium Karbonat (K_2CO_3) akibat interaksi dengan CO_2 dari udara [9][19]. Dampak dari endapan kristalin putih:

- Meningkatkan resistansi internal, menurunkan efisiensi arus [10][20].
- Mengurangi luas permukaan aktif elektroda, menurunkan kapasitas baterai.
- Menyebabkan ketidakseimbangan sel, mempercepat penurunan kinerja [10][20].

Standar berat jenis elektrolit menunjukkan kondisi baterai yang baik. Untuk baterai NiCd, nilai ideal adalah 1,19 g/l dan perlu perbaikan jika turun di bawah 1,17 g/l. Umumnya, berat jenis baterai alkali berkisar antara 1,17–1,19 g/l pada suhu 20°C. Perhitungannya dapat dilakukan menggunakan persamaan (3):

$$BJS = BJT + 0.0005 (T - 20) \quad (3)$$

Keterangan:

BJS = Berat jenis standar elektrolit yang dikoreksi atau dihitung ke suhu standar yaitu 20°C (g/l)

BJT = Berat jenis elektrolit yang diukur alat pada suhu T derajat celcius (g/l)

T = Suhu elektrolit pada saat pengukuran (dalam derajat Celcius) (°C)

K = Koefisien koreksi suhu, dengan nilai 0.0005

20 = Suhu referensi atau suhu standar baterai

4. Tegangan Minimum

Tegangan minimum adalah batas tegangan saat baterai dianggap habis dan perlu diisi ulang. Nilai ini menurun secara tidak linear selama pengosongan dan mencegah over-discharge. Berikut adalah rumus perhitungannya pada persamaan (4) :

$$V_{min} = 1V \times \text{Jumlah sel} \quad (4)$$

Keterangan:

V_{min} = Tegangan Minimum

1V = Batas Nilai Tegangan Per sel

Jumlah Sel = Jumlah Sel dalam Satu Unit

5. Standar Uji Kapasitas

Uji kapasitas baterai dilakukan dengan pengosongan sesuai standar IEC 69623. Untuk baterai alkali digunakan arus 0,2 C, dan untuk baterai asam 0,1 C, guna mencegah overheating pada sel yang dapat mempercepat kerusakan. Rumus arus pengosongan: Baterai alkali/NiCd : 0,2 × Kapasitas (C)

C. Metode Regresi Eksponensial

Regresi eksponensial digunakan saat hubungan antar variabel membentuk pola eksponensial. Dalam penelitian ini, model ini digunakan untuk memprediksi penurunan performa baterai seiring waktu, yang umumnya tidak linier dan cenderung memburuk setelah usia tertentu. Berikut adalah beberapa proses perhitungan pada beberapa persamaan umur regresi eksponensial:

$$y = a \cdot e^{bx} \quad (5)$$

$$\ln(y) = \ln(ae^{bx}) \quad (6)$$

$$\ln(y) = \ln(a) + b \cdot x \quad (7)$$

$$Y' = A + B \cdot x \quad (8)$$

$$A = \bar{Y}' - B \cdot \bar{x} \quad (9)$$

$$B = \frac{\sum[(x - \bar{x})(Y' - \bar{Y}')] }{\sum (x - \bar{x})^2} \quad (10)$$

$$a = e^A \quad (11)$$

$$b = B \quad (12)$$

Keterangan:

y = performa baterai (efisiensi baterai)

x = umur baterai (dalam satuan tahun)

a = konstanta, mewakili performa awal atau kapasitas baterai saat baru

b = koefisien eksponensial yang menunjukkan laju penurunan performa

e = bilangan eksponensial (sekitar 2,718)

$Y' = \ln(y)$

$A = \ln(a)$

$B = b$

Regresi linier digunakan untuk meramalkan hubungan antara variabel X dan Y [11][21], sedangkan regresi eksponensial cocok untuk data dengan pola pertumbuhan atau penurunan cepat. Transformasi logaritma natural digunakan dalam penelitian ini untuk mempermudah perhitungan parameter a dan b [12][13].

D. Evaluasi Model

Evaluasi model penting dilakukan untuk memastikan bahwa model prediksi yang digunakan dapat memberikan hasil yang akurat dan dapat dipercaya terhadap data yang dimasukkan.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{actual,i} - y_{pred,i})^2 \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (14)$$

standard deviation

$$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}} \quad (15)$$

$$CVRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100\% \quad (16)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_{actual} - y_{pred})^2}{\sum (y_{actual} - \bar{y})^2} \quad (17)$$

Keterangan:

n = jumlah data

$y_{actual,i}$ = nilai asli dari data ke-i

$y_{pred,i}$ = nilai yang diprediksi oleh model untuk data ke-i

y_i = data ke-i

$\bar{y}$ = rata-rata data asli

$\sum (y_{actual} - y_{pred})^2$ = jumlah kuadrat kesalahan antara nilai aktual dan prediksi

$\sum (y_{actual} - \bar{y})^2$ = jumlah kuadrat deviasi antara nilai aktual dan rata – rata nilai aktual

HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi Baterai

Spesifikasi teknis baterai yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi Baterai Gardu Induk Darmo Grande 150 kV unit Proteksi 2

Merk	FRIWO
Kapasitas	205 Ah
Jenis Elektrolit	Basa Alkaline
Tegangan / Sel	1,35 VDC
Jumlah Sel	84 Cell
Tanggal Operasi	15 Januari 2002
Tipe	HFP - 20
BJ/Sel	1,19
Tegangan Total	116,00 VDC

Tabel 1 menunjukkan bahwa data tersebut menjadi dasar dalam analisis performa dan estimasi umur baterai.

Spesifikasi Dummyload

Tabel 2 menunjukkan spesifikasi dummyload yang digunakan sebagai alat untuk proses pengosongan baterai.

Tabel 2 Spesifikasi Baterai Gardu Induk Darmo Grande 150 kV unit Proteksi 2

Merk	ISA
Arus	0 – 100 A
Tipe	BTS / 100
Tegangan	220 Volt

Tabel 2 menunjukkan bahwa perangkat ini berfungsi untuk menarik arus sesuai kebutuhan pengujian kapasitas baterai.

Data Pengujian 2019

Umur Baterai pada pengujian tahun 2019 = 17,75 Tahun

Berikut tabel 3 hasil pengujian kapasitas pengosongan pada tahun 2019.

Tabel 3 Hasil Pengujian kapasitas pengosongan tahun 2019

Jam ke	Pukul	Arus (A)	Teg. Bat. (V)	Ah
0	10:00	41	106	0
0,5	10:36	41	100	20
1	11:06	41	98,6	41
1,5	11:36	41	96,1	61
2	12:06	41	95,6	82
2,5	12:36	41	95,1	103
3	13:06	41	94,1	123
3,5	13:36	41	92,7	145
4	14:06	41	88,7	164
4,5	14:36	41	84,3	182

Tabel 3 menunjukkan pengujian berhenti saat tegangan minimum mencapai 84,3 V, dengan kapasitas baterai 182 Ah dari kapasitas pabrikan 205 Ah. Waktu pengosongan tercatat 4 jam 26 menit, atau 0,5 jam lebih cepat dari standar 5 jam. Sesuai perhitungan menggunakan persamaan (2), maka efisiensi didapat adalah **88,78%**. Nilai efisiensi ini masih belum melewati batas standar efisiensi yaitu 80%. Berikut tabel 5 hasil pengukuran berat jenis elektrolit tiap sel.

Tabel 4 Hasil pengukuran berat jenis tahun 2019

No. Sel	Berat Jenis	No. Sel	Berat Jenis	No. Sel	Berat Jenis
1	1,19	29	1,19	57	1,19
2	1,19	30	1,19	58	1,19
3	1,19	31	1,19	59	1,19
4	1,19	32	1,19	60	1,19
5	1,19	33	1,19	61	1,19
6	1,19	34	1,19	62	1,19
7	1,19	35	1,19	63	1,19
8	1,19	36	1,19	64	1,19
9	1,19	37	1,19	65	1,19

Jurnal Ilmiah Sain dan Teknologi

10	1,19	38	1,19	66	1,19
11	1,19	39	1,19	67	1,19
12	1,19	40	1,19	68	1,19
13	1,19	41	1,19	69	1,19
14	1,19	42	1,19	70	1,19
15	1,19	43	1,19	71	1,19
16	1,19	44	1,19	72	1,19
17	1,19	45	1,19	73	1,19
18	1,19	46	1,19	74	1,19
19	1,19	47	1,19	75	1,19
20	1,19	48	1,19	76	1,19
21	1,19	49	1,19	77	1,19
22	1,19	50	1,19	78	1,19
23	1,19	51	1,19	79	1,19
24	1,19	52	1,19	80	1,19
25	1,19	53	1,19	81	1,19
26	1,16	54	1,19	82	1,19
27	1,16	55	1,19	83	1,19
28	1,16	56	1,19	84	1,19

Pada tabel 4 merupakan hasil pengukuran setelah uji pengosongan baterai ketika suhu rata-rata baterai tiap sel 33°C . Jika dihitung nilai berat jenis sebenarnya menggunakan persamaan (3), Maka nilai berat jenisnya adalah **1,18 g/l**. Nilai berat jenis ini masih belum melewati batas standar nilai berat jenis dalam *range* 1,17-1,19 g/l.

Data Pengujian 2022

Umur Baterai pada pengujian tahun 2022 = 20,79 Tahun

Berikut tabel 5 hasil pengujian kapasitas pengosongan pada tahun 2022.

Tabel 5 Hasil Pengujian kapasitas pengosongan tahun 2022

Jam ke	Pukul	Arus (A)	Teg. Bat. (V)	Ah
0	07:55	41	104	0
0,5	08:25	41	97,9	21
1	08:55	41	96,5	41
1,5	09:25	41	95,3	61
2	09:55	41	94,6	81
2,5	10:25	41	94,1	101
3	10:55	41	92,8	122
3,5	11:25	41	91,7	142
4	11:55	41	85,8	165
4,2	12:07	41	84,2	173

Tabel 5 menunjukkan pengujian berhenti saat tegangan minimum 84,2 V, dengan kapasitas tercapai 173 Ah dari 205 Ah. Waktu pengosongan berlangsung 4 jam 12 menit, lebih cepat 0,8 jam dari standar 5 jam. Sesuai perhitungan menggunakan persamaan (2), maka efisiensi didapat adalah **84,37%**. Nilai efisiensi ini masih belum melewati batas standar efisiensi yaitu 80%. Berikut tabel 6 hasil pengukuran berat jenis elektrolit tiap sel.

Tabel 6 Hasil pengukuran berat jenis tahun 2022

No. Sel	Berat Jenis	No. Sel	Berat Jenis	No. Sel	Berat Jenis
1	1,190	29	1,193	57	1,193
2	1,195	30	1,200	58	1,190
3	1,200	31	1,193	59	1,200
4	1,193	32	1,185	60	1,185
5	1,185	33	1,193	61	1,193
6	1,193	34	1,200	62	1,185
7	1,200	35	1,193	63	1,200
8	1,190	36	1,190	64	1,193
9	1,193	37	1,200	65	1,185
10	1,190	38	1,193	66	1,200
11	1,200	39	1,190	67	1,193
12	1,193	40	1,200	68	1,185
13	1,185	41	1,193	69	1,200
14	1,200	42	1,190	70	1,193
15	1,193	43	1,200	71	1,185
16	1,190	44	1,193	72	1,200
17	1,200	45	1,190	73	1,193
18	1,193	46	1,200	74	1,185
19	1,185	47	1,193	75	1,200
20	1,200	48	1,190	76	1,190
21	1,193	49	1,200	77	1,195
22	1,185	50	1,193	78	1,200
23	1,200	51	1,193	79	1,193
24	1,193	52	1,190	80	1,200
25	1,190	53	1,200	81	1,185
26	1,195	54	1,193	82	1,193
27	1,193	55	1,185	83	1,200
28	1,190	56	1,200	84	1,193

Pada tabel 6 merupakan hasil pengukuran setelah uji pengosongan baterai ketika suhu rata-rata baterai tiap sel 30⁰ C. Jika dihitung nilai berat jenis sebenarnya menggunakan persamaan (3), Maka nilai berat jenisnya adalah **1,19 g/l**. Nilai berat jenis ini masih belum melewati batas standar nilai berat jenis dalam *range* 1,17-1,19 g/l.

Data Pengujian 2024

Umur Baterai pada pengujian tahun 2024 = 22,43 Tahun

Berikut tabel 7 hasil pengujian kapasitas pengosongan pada tahun 2024.

Tabel 7 Hasil Pengujian kapasitas pengosongan tahun 2024

Jam ke	Pukul	Arus (A)	Teg. Bat. (V)	AH
0	10:00	41	106	0
0,5	10:36	41	101	20
1	11:06	41	99,6	41
1,5	11:36	41	95,6	61
2	12:06	41	94,7	82
2,5	12:36	41	94	103
3	13:06	41	92,3	122
3,5	13:36	41	86,8	143
3,8	13:48	41	83,9	157

Tabel 7 menunjukkan pengujian berhenti pada tegangan minimum 83,9 V, dengan kapasitas maksimum baterai 157 Ah dari 205 Ah. Waktu pengosongan tercatat 3 jam 48 menit, selisih 1,2 jam dari standar 5 jam. Sesuai perhitungan menggunakan persamaan (2), maka efisiensi didapat adalah **76,58%**. Nilai efisiensi ini sudah melewati batas standar efisiensi yaitu 80%. Berikut tabel 8 hasil pengukuran berat jenis elektrolit tiap sel.

Tabel 8 Hasil pengukuran berat jenis tahun 2024

No. Sel	Berat Jenis	No. Sel	Berat Jenis	No. Sel	Berat Jenis
1	1,23	29	1,16	57	1,18
2	1,23	30	1,24	58	1,18
3	1,23	31	1,18	59	1,22
4	1,22	32	1,17	60	1,22
5	1,24	33	1,18	61	1,22
6	1,22	34	1,16	62	1,23
7	1,22	35	1,17	63	1,22
8	1,24	36	1,18	64	1,22
9	1,22	37	1,24	65	1,16
10	1,22	38	1,20	66	1,16
11	1,18	39	1,21	67	1,22
12	1,22	40	1,21	68	1,16
13	1,18	41	1,20	69	1,16
14	1,18	42	1,26	70	1,16
15	1,18	43	1,21	71	1,16
16	1,18	44	1,19	72	1,24
17	1,22	45	1,26	73	1,18
18	1,22	46	1,22	74	1,17
19	1,22	47	1,24	75	1,18
20	1,23	48	1,22	76	1,16
21	1,22	49	1,22	77	1,17
22	1,22	50	1,24	78	1,18
23	1,16	51	1,18	79	1,24
24	1,16	52	1,22	80	1,2
25	1,22	53	1,18	81	1,21
26	1,16	54	1,22	82	1,21
27	1,16	55	1,18	83	1,22
28	1,16	56	1,18	84	1,23

Pada tabel 8 merupakan hasil pengukuran setelah uji pengosongan baterai ketika suhu rata-rata baterai tiap sel 31°C . Jika dihitung nilai berat jenis sebenarnya menggunakan persamaan (3), Maka nilai berat jenisnya adalah **1,20 g/l**. Nilai berat jenis ini telah melewati batas standar nilai berat jenis dalam *range* 1,17-1,19 g/l.

Regresi Eksponen

Model Pertama

Model pertama dibuat berdasarkan data asli umur dan berat jenis pada tabel 9.

Tabel 9 Inputan Data model pertama

x	Umur	17,75	20,79	22,5
y	Berat Jenis	1,18	1,19	1,20
	Tahun	2019	2022	2024

Tabel 9 merupakan inputan data yang digunakan untuk mencari persamaan eksponensial model pertama. Berikut persamaan yang didapat dari *google colab*.

$$y = 1,109 \cdot e^{3 \cdot 10^{-3} \cdot x} \quad (18)$$

keterangan:

y = berat jenis

x = umur

Model Kedua

Model kedua dibuat berdasarkan data asli berat jenis dan efisiensi pada tabel 10.

Tabel 10 Inputan Data model kedua

x	Berat Jenis	1,18	1,19	1,20
y	Efisiensi Tahun	88,78 2019	84,37 2022	76,58 2024

Tabel 10 merupakan inputan data yang digunakan untuk mencari persamaan eksponensial model pertama. Berikut persamaan yang didapat dari *google colab*.

$$y = 5,48x \cdot 10^5 \cdot e^{-7,39 \cdot x} \quad (19)$$

keterangan:

y = Efisiensi

x = Berat Jenis

Kedua model tersebut menghasilkan dua persamaan. Sehingga, dapat dilakukan perhitungan prediksi dengan urutan yakni, dari mencari prediksi berat jenis dari persamaan (18), lalu mencari prediksi nilai efisiensi dari persamaan (19). Sehingga, didapat *dataframe* hasil prediksi umur baterai, prediksi berat jenis, dan prediksi efisiensi pada tabel 11.

Tabel 10 *Dataframe* Hasil Prediksi

Umur (Tahun)	Prediksi Berat Jenis (g/l)	Prediksi Efisiensi (%)
15	1,168	97,59
16	1,172	94,72
17	1,176	91,93
18	1,180	89,21
19	1,184	86,56
20	1,188	83,98
21	1,192	81,47
22	1,196	70,02
23	1,200	76,64
24	1,205	74,33
25	1,209	72,08
26	1,213	69,88
27	1,217	67,75
28	1,221	65,68
29	1,226	63,66
30	1,230	61,70

31	1,234	59,79
32	1,238	57,93
33	1,243	56,13

Dari tabel 10 menunjukkan hasil prediksi jika dihitung menggunakan kedua persamaan eksponen dari dua model yang telah dibuat. Berikut tabel 11 hasil evaluasi dari model pertama.

Tabel 11 Hasil Evaluasi Model Pertama

	Nilai Evaluasi	Status Model
<i>RMSE</i>	0,0013	0,0013 < 0,008, True. Status Model baik
Standar Deviasi	0,0081	
<i>CVRMSE</i>	0,11	0,11 < 10%, True. Status model baik
R-Squared (R^2)	0,97	0,97 $\approx$ 97%. Status Model Baik

Tabel 11 menunjukkan bahwa model pertama merupakan model yang baik untuk menghitung prediksi berat jenis dan dapat diandalkan. Berikut tabel 12 hasil evaluasi model kedua.

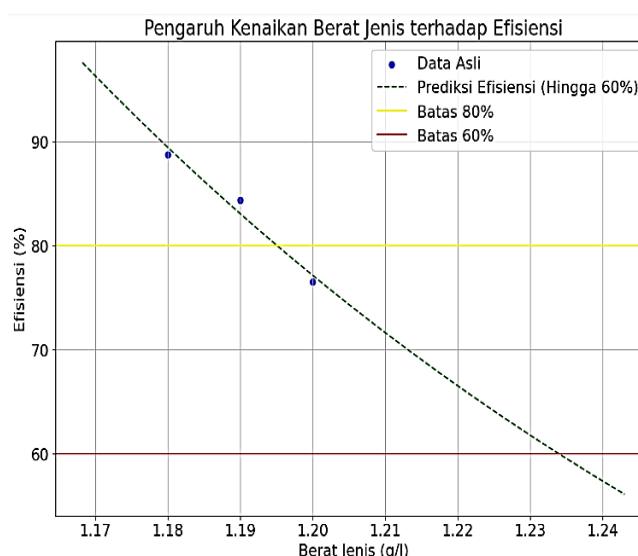
Tabel 12 Hasil Evaluasi Model Kedua

	Nilai Evaluasi	Status Model
<i>RMSE</i>	0,90	0,90 < 5,04, True. Status Model baik
Standar Deviasi	5,04	
<i>CVRMSE</i>	1,09	1,09 < 10%, True. Status model baik
R-Squared (R^2)	0,97	0,97 $\approx$ 97%. Status Model Baik

Hasil evaluasi pada tabel 12 menunjukkan bahwa model kedua juga merupakan model yang dapat diandalkan untuk melakukan perhitungan prediksi efisiensi.

Prediksi capaian Efisiensi 80% dan 60%

Dari kedua hasil evaluasi disimpulkan bahwa dua persamaan eksponen dari kedua model dapat diandalkan untuk melakukan perhitungan prediksi berat jenis dan efisiensi, sehingga *dataframe* regresi hasil prediksi pada tabel 10 mendekati data aktual. Berikut gambar 3 menunjukkan grafik data aktual dan prediksi, serta pengaruh kenaikan berat jenis terhadap efisiensi.



Gambar 3 Grafik Pengaruh Kenaikan Berat Jenis terhadap Efisiensi

Gambar 3 menunjukkan grafik hubungan antara kenaikan berat jenis dan efisiensi. Titik biru mewakili data aktual, sedangkan garis putus-putus hijau adalah hasil prediksi. Garis hijau menunjukkan tren penurunan efisiensi seiring meningkatnya berat jenis pada unit baterai Gardu Induk Darmo Grande Proteksi 2. Garis kuning menandai batas efisiensi standar (80%), sementara garis merah menunjukkan batas kritis (60%). Data tahun 2022 dan 2024 mencatat penurunan efisiensi dari 84,39% ke 76,58%, menunjukkan bahwa baterai telah melewati ambang standar tanpa terdeteksi. Oleh karena itu, prediksi waktu tercapainya efisiensi 60% diperlukan untuk evaluasi pemeliharaan dan peningkatan kualitas baterai.

PENUTUP

Simpulan

Hasil pengujian pengosongan dan pengukuran berat jenis menunjukkan bahwa kondisi baterai pada tahun 2024 telah menurun hingga di bawah ambang batas efisiensi standar ($<80\%$) dengan berat jenis melebihi 1,19 g/l [5], yang mengindikasikan kondisi buruk.

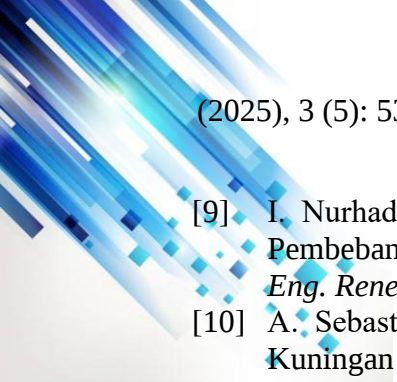
Berdasarkan hasil prediksi, penurunan efisiensi $<80\%$ diperkirakan terjadi sejak Agustus 2023, dan mencapai kondisi kritis ($<60\%$) pada Desember 2032. Temuan ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi PT PLN (Persero) Gardu Induk Darmo Grande dalam merencanakan pemeliharaan preventif untuk menjaga keandalan sistem sebelum baterai mencapai kondisi kritis.

Saran

Untuk meningkatkan akurasi dan optimalisasi hasil prediksi pada penelitian selanjutnya, disarankan agar pengujian pengosongan baterai dilakukan secara periodik dan konsisten guna memperoleh data yang lebih representatif. Selain itu, penggunaan lebih banyak variabel dalam analisis prediktif juga perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan keandalan dan presisi model yang dibangun.

Daftar Pustaka

- [1] N. C. Nikmah, "Studi Prediksi Sisa Usia Pakai Baterai Unit 1 di Gardu Induk Jajar Berdasarkan Operasi Discharging," Universitas Tidar Magelang, Skripsi Prodi S1 Teknik Elektro Magelang, 2025.
- [2] L. Lonteng, E. K. Allo, and L. S. Patras, "Analisa Kemampuan Sumber DC (Baterai dan Charge) dalam Memenuhi Kebutuhan Gardu Induk Teling," 2022, Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: [https://repo.unsrat.ac.id/3975/1/Jurnal_Leos_Lonteng\(Recovered\).pdf](https://repo.unsrat.ac.id/3975/1/Jurnal_Leos_Lonteng(Recovered).pdf)
- [3] M. Fajaruiddin, "Pemeliharaan Baterai Pada Gardu Induk GIS Listrik Medan," *Circ. Arch.*, vol. 1, no. 6, pp. 1–0, Nov. 2024, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://circle-archive.com/index.php/carc>
- [4] M. S. Dzikron, "Analisa Kinerja Baterai Berumur Lebih 10 Tahun Pada Gardu Induk Jepara 150 KV," Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Skripsi Prodi S1 Teknik Elektro Semarang, 2021.
- [5] C. Mauludin, Sugandhi, and I. Sudarmaja, "Buku Pedoman Pemeliharaan Sistem Suplai AC/DC," Dokumen, PT. PLN (Persero), Jakarta, 2014.
- [6] D. M. Pransisca, "Prediksi Sisa Umur Bearing Menggunakan Regresi Eksponensial," *J. Ris. Stat.*, vol. 1, no. 2, pp. 107–116, Dec. 2021, doi: 10.29313/jrs.v1i2.434.
- [7] M. R. Hamid, Rizky, M. Amin, and I. B. D., "Rancang Bangun Charger Baterai Untuk Kebutuhan UMKM," *J. Teknol. TERPADU*, vol. 4, no. 2, pp. 130–136, Oct. 2016, doi: 10.32487/jtt.v4i2.175.
- [8] R. Agned and Nurhalim, "Studi Kapasitas Baterai 110 Vdc pada Gardu Induk 150 kV Bangkinang," *Jom FTEKNIK*, vol. 3, no. 2, pp. 1–9, Oct. 2016.

- 
- [9] I. Nurhadi and Liliana, “Analisis Kelayakan Battery 110 VDC Dalam Mengsuplai Pembebanan (Studi Kasus Gardu Induk Perawang 150 kV),” *IJEERE Indones. J. Electr. Eng. Renew. Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 29–38, Jun. 2022, doi: 10.57152.
- [10] A. Sebastyantito, “Pengaruh Temperatur Elektrolit dan Waktu Proses Elektroplating Kuningan Pada Baja Karbon Rendah Terhadap Daya Lekat, Ketebalan, dan Kekilauan Hasil Pelapisan,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Skripsi Departemen Teknik Material Surabaya, 2019.
- [11] W. T. Bhirawa, “Proses Pengolahan Data Dari Model Persamaan Regresi Dengan Menggunakan Statistical Product and Service Solution (SPSS),” *J. Mitra Manaj.*, vol. 7, no. 1, pp. 71–3, Oct. 2020, doi: 10.35968/jmm.v7i1.528.
- [12] M. D. Shamshuddin, S. O. Salawu, H. A. Ogunseye, and F. Mabood, “Dissipative Power-law fluid flow using spectral quasi linearization method over an exponentially stretchable surface with Hall current and power-law slip velocity,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 119, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104933.
- [13] M. Asghari, A. M. Fathollahi-Fard, S. M. J. Mirzapour Al-E-Hashem, and M. A. Dulebenets, “Transformation and Linearization Techniques in Optimization: A State-of-the-Art Survey,” *Mathematics*, vol. 10, no. 2, Jan. 2022, doi: 10.3390/math10020283.