

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

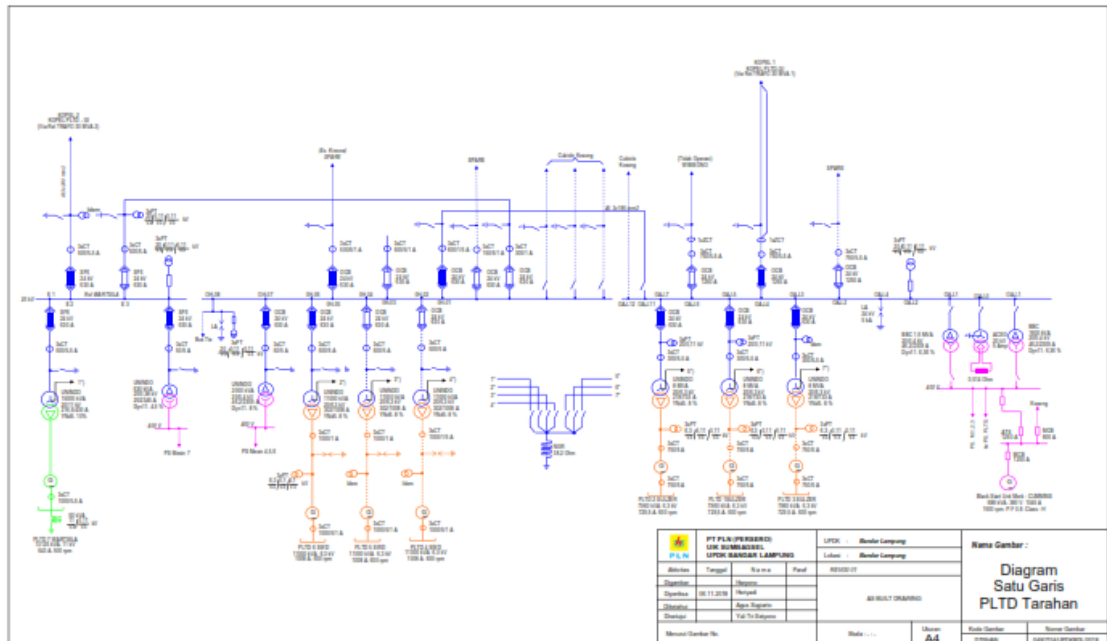
#### **2.1 Landasan Teori**

##### **2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel PLTD/G Tarahan**

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel dan Gas (PLTD/G) Tarahan merupakan salah satu unit pembangkit yang dikelola oleh PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Bandar Lampung. Pembangkit ini berlokasi di Tarahan, Kota Bandar Lampung, dan berperan penting dalam sistem kelistrikan Sumatera bagian selatan, khususnya pada subsistem Lampung. PLTD/G Tarahan terdiri dari beberapa unit mesin diesel dan gas yaitu mesin SWD 410 R dengan kapasitas daya terpasang 2x 8080 KW dan mesin Gas Turbin Alsthom Atlantique frame 5 dengan kapasitas daya terpasang 21 MW untuk mendukung kestabilan pasokan energi listrik di wilayah tersebut. Selain berfungsi sebagai pembangkit beban puncak (*peaking plant*), PLTD/G Tarahan juga berperan strategis sebagai unit *blackstart*, yaitu unit yang dapat dioperasikan pertama kali secara mandiri tanpa suplai listrik eksternal ketika terjadi gangguan sistem atau blackout total.

Dalam sistem tenaga listrik, *blackout* atau padam total merupakan kondisi di mana seluruh sistem kehilangan daya akibat gangguan besar pada jaringan transmisi maupun pembangkit utama. Untuk memulihkan kondisi ini, dibutuhkan pembangkit yang memiliki kemampuan *blackstart*, yaitu mampu memulai operasi tanpa suplai listrik eksternal. PLTD menjadi salah satu pilihan ideal sebagai unit *blackstart* karena memiliki sistem mekanis dan kontrol yang relatif sederhana serta dapat beroperasi mandiri menggunakan bahan bakar diesel.

Pada sistem kelistrikan Sumatera bagian selatan, PLTD/G Tarahan berperan sebagai pembangkit pemulihan awal (*blackstart unit*) ketika terjadi padam total. Dengan dioperasikannya PLTD/G Tarahan, sistem dapat secara bertahap menyalurkan daya listrik ke jaringan transmisi untuk menyalakan pembangkit besar lainnya seperti PLTU atau PLTG, sehingga sistem kelistrikan dapat kembali beroperasi normal.



Gambar 2.1 Single line Diagram PLTD/G Tarahan

Berdasarkan Single Line Diagram (SLD) sistem kelistrikan PLTD/G Tarahan, unit pembangkit dilengkapi dengan Emergency Diesel Generator (EDG) yang berfungsi untuk menyediakan daya listrik cadangan ketika sistem utama kehilangan pasokan daya. Ketika terjadi *blackout*, EDG akan beroperasi secara otomatis untuk menyuplai energi listrik ke auxiliary system PLTD/G seperti pompa bahan bakar, sistem pendingin, sistem pelumasan, dan kontrol start motor utama.

Energi listrik yang disuplai oleh EDG inilah yang menjadi awal mula proses blackstart. Setelah sistem pendukung mesin (auxiliary) aktif, unit PLTD/G dapat dinyalakan dan menghasilkan daya listrik secara mandiri. Selanjutnya daya tersebut dapat digunakan untuk menyuplai sistem lain dalam tahapan pemulihan jaringan (grid restoration). Dengan demikian, keberhasilan blackstart sangat bergantung pada kesiapan dan keandalan EDG dalam menyediakan energi listrik awal bagi sistem bantu pembangkit.

### 2.1.2 Emergency Diesel Generator (EDG)

EDG merupakan komponen vital dalam sistem kelistrikan pembangkit karena berfungsi sebagai sumber daya darurat ketika suplai utama tidak tersedia. Tanpa EDG yang berfungsi dengan baik, sistem kontrol, proteksi, dan peralatan bantu pada pembangkit tidak akan dapat dioperasikan saat blackout. Akibatnya, proses blackstart tidak dapat dilakukan, dan pemulihan jaringan listrik menjadi tertunda.



Gambar 2.2 Emergency Diesel Generator PLTD/G Tarahan

Kinerja EDG sangat bergantung pada kondisi baterai starter yang berfungsi sebagai sumber energi awal untuk menyalakan mesin diesel. Baterai menyediakan arus dan tegangan yang dibutuhkan untuk mengaktifkan motor starter, sistem kontrol, serta rangkaian pendukung lainnya sebelum generator menghasilkan daya sendiri. Apabila baterai mengalami degradasi kapasitas, penurunan tegangan, atau kegagalan fungsi, maka EDG tidak dapat beroperasi tepat waktu saat dibutuhkan.

Kegagalan baterai starter dapat menyebabkan EDG gagal menyala, yang berakibat pada tertundanya proses blackstart dan memperpanjang durasi padam listrik di wilayah terdampak. Oleh karena itu, pemantauan kondisi dan kesehatan baterai (*battery health monitoring*) pada sistem EDG menjadi aspek yang sangat krusial untuk menjamin kesiapan dan keandalan sistem kelistrikan darurat.

### 2.1.3 Baterai Lead Acid

Baterai lead acid merupakan salah satu jenis baterai sekunder yang paling umum digunakan pada sistem Emergency Diesel Generator (EDG) sebagai baterai starter. Baterai ini bekerja berdasarkan reaksi elektrokimia antara pelat timbal (Pb), timbal dioksida (PbO<sub>2</sub>), dan larutan elektrolit asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) untuk menghasilkan energi listrik.

Penggunaan baterai lead acid pada sistem EDG didasarkan pada beberapa keunggulan, antara lain kemampuan menyediakan arus awal yang besar (*high starting current*), konstruksi yang relatif sederhana, keandalan yang tinggi, serta biaya yang lebih ekonomis dibandingkan jenis baterai lainnya. Karakteristik tersebut menjadikan baterai lead acid sangat sesuai untuk aplikasi darurat yang membutuhkan respon cepat dan stabil.

Dalam sistem EDG, baterai lead acid berfungsi sebagai sumber energi awal untuk menggerakkan motor starter dan mengaktifkan sistem kontrol sebelum mesin diesel beroperasi secara mandiri. Baterai umumnya disusun dalam rangkaian seri untuk memenuhi kebutuhan tegangan sistem, misalnya sistem 24 VDC yang terdiri dari beberapa sel baterai dengan tegangan nominal sekitar 1.2 V per sel.

Seiring dengan bertambahnya usia pemakaian, baterai lead acid mengalami degradasi yang ditandai dengan penurunan kapasitas efektif, peningkatan resistansi internal, serta berkurangnya kemampuan menyimpan dan melepaskan energi. Degradasi ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti temperatur operasi, kedalaman pengosongan (*Depth of Discharge*), serta jumlah siklus pengisian–pengosongan yang telah dialami baterai.

Oleh karena itu, meskipun baterai lead acid dikenal memiliki keandalan tinggi, pemantauan kondisi operasionalnya secara berkala tetap diperlukan. Pemantauan ini bertujuan untuk memastikan bahwa baterai masih mampu memenuhi kebutuhan start EDG dan untuk mencegah kegagalan sistem akibat penurunan kondisi baterai yang tidak terdeteksi.

#### 2.1.4 Parameter Kondisi Baterai (SoC, SoH, DoD, EFC, dan Lifecycle)

Kondisi dan kinerja baterai tidak dapat dinilai hanya berdasarkan satu parameter tunggal, seperti tegangan sesaat. Untuk memperoleh gambaran kondisi baterai secara menyeluruh, diperlukan beberapa parameter utama yang saling berkaitan, yaitu **State of Charge (SoC)**, *Depth of Discharge (DoD)*, *Equivalent Full Cycle (EFC)*, *State of Health (SoH)*, serta *lifecycle* baterai. Parameter-parameter ini merepresentasikan kondisi muatan, pola penggunaan, hingga tingkat degradasi baterai dalam jangka panjang antara lain :

##### 1. State of Charge (SoC)

State of Charge (SoC) merupakan parameter yang menunjukkan tingkat muatan baterai pada suatu waktu tertentu dibandingkan dengan kapasitas nominalnya. Nilai SoC umumnya dinyatakan dalam persentase (%), di mana 100% menunjukkan kondisi baterai terisi penuh dan 0% menunjukkan kondisi baterai kosong.

Parameter SoC banyak digunakan untuk mengetahui ketersediaan energi baterai secara sesaat dan sebagai dasar pengendalian proses pengisian maupun pengosongan. Namun, SoC tidak dapat menggambarkan tingkat degradasi atau kesehatan baterai dalam jangka panjang, karena nilai SoC hanya merefleksikan kondisi muatan saat itu, bukan akumulasi pemakaian baterai.

##### 2. Depth of Discharge (DoD)

Depth of Discharge (DoD) menyatakan persentase kapasitas baterai yang telah digunakan atau dikosongkan dalam satu siklus pengoperasian. DoD merupakan kebalikan dari SoC. Sebagai contoh, apabila baterai digunakan hingga 20% dari kapasitas totalnya, maka nilai DoD adalah 20%.

Nilai DoD memiliki pengaruh langsung terhadap laju degradasi baterai. Semakin besar DoD yang digunakan secara berulang, semakin besar pula beban kerja baterai dalam setiap siklus, sehingga mempercepat penurunan kapasitas dan umur pakai baterai. Oleh karena itu, pada sistem baterai siaga seperti Emergency Diesel Generator (EDG), pengosongan baterai umumnya dibatasi pada nilai DoD tertentu untuk menjaga keandalan sistem.

Secara matematis, nilai DoD dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{DoD} = \frac{Q_{\text{terpakai}}}{Q_{\text{nominal}}} \times 100\% \quad (2.1)$$

dengan:

$Q_{\text{terpakai}}$  = kapasitas baterai yang digunakan

$Q_{\text{nominal}}$  = kapasitas nominal baterai

### 3. Equivalent Full Cycle (EFC)

Equivalent Full Cycle (EFC) digunakan untuk merepresentasikan akumulasi siklus pengisian–pengosongan baterai dalam bentuk siklus penuh yang ekuivalen. EFC digunakan untuk mengklasifikasikan setiap siklus atau peristiwa pengisian/pengosongan. Konsep EFC memungkinkan konversi beberapa siklus pengosongan parsial menjadi satu siklus penuh berdasarkan nilai DoD.

EFC menjadi parameter yang lebih representatif dalam menilai pemakaian baterai. Karena umur baterai lebih dipengaruhi oleh total energi yang telah digunakan dibandingkan jumlah siklus parsial semata. Nilai EFC dapat dihitung dengan menjumlahkan fraksi DoD setiap siklus sebagai berikut:

$$Q = \int_0^t |I(t')| dt' \quad (2.2)$$

### 4. State of Health (SoH)

State of Health (SoH) merepresentasikan tingkat kesehatan baterai relatif terhadap kondisi awal saat baterai masih baru. Nilai SoH umumnya dinyatakan dalam persentase (%), di mana 100% menunjukkan kondisi baterai baru dan nilai yang semakin menurun menunjukkan terjadinya degradasi kapasitas dan performa baterai.

Penurunan nilai SoH berkorelasi erat dengan peningkatan EFC kumulatif dan pola penggunaan DoD. Semakin besar akumulasi EFC yang terbentuk, maka nilai SoH akan semakin menurun. Estimasi SoH dapat dilakukan melalui berbagai indikator, seperti kapasitas efektif, resistansi internal, serta pola siklus pengisian dan pengosongan.

Dalam penelitian ini, estimasi SoH dilakukan menggunakan pendekatan berbasis data (*data-driven*) dengan memanfaatkan algoritma Artificial Intelligence (AI) yang menganalisis data historis baterai, termasuk tegangan, arus, DoD, dan EFC kumulatif.

## 5. Lifecycle Baterai

Lifecycle baterai didefinisikan sebagai jumlah siklus pengisian–pengosongan yang dapat dicapai sebelum kapasitas baterai menurun hingga melewati batas tertentu, yang umumnya ditetapkan sekitar 80% dari kapasitas awal. Pada baterai lead-acid, nilai lifecycle ini sangat dipengaruhi oleh Depth of Discharge (DoD). Baterai yang dioperasikan dengan DoD yang lebih kecil cenderung memiliki umur pakai yang lebih panjang dibandingkan baterai yang sering mengalami pengosongan dalam (DoD besar). Oleh karena itu, evaluasi umur pakai baterai tidak cukup hanya didasarkan pada jumlah siklus fisik, tetapi perlu mempertimbangkan besarnya energi atau muatan listrik yang benar-benar digunakan selama operasi.

Untuk tujuan tersebut, penelitian ini menggunakan parameter Equivalent Full Cycle (EFC) sebagai indikator pemakaian baterai secara kumulatif. Parameter EFC merepresentasikan jumlah siklus pengisian–pengosongan penuh yang ekuivalen dengan penggunaan aktual baterai, termasuk siklus parsial yang terjadi selama operasi. Dengan pendekatan ini, beberapa siklus parsial pada DoD rendah akan terakumulasi menjadi satu siklus penuh secara ekuivalen, sehingga tingkat pemakaian baterai dapat direpresentasikan secara lebih akurat.

Berdasarkan data pabrikan, baterai lead-acid seri GN yang digunakan dalam penelitian ini memiliki umur pakai nominal sekitar 800 siklus penuh pada DoD 100%, yang ekuivalen dengan 800 EFC. Dalam praktik operasional, khususnya pada sistem Emergency Diesel Generator (EDG), baterai jarang mengalami pengosongan penuh. Oleh karena itu, nilai EFC kumulatif yang dihitung dari data arus dan waktu operasi aktual digunakan sebagai dasar untuk mengestimasi tingkat pemakaian dan sisa umur pakai baterai.

Estimasi persentase umur pakai baterai yang telah terpakai dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara nilai EFC kumulatif terhadap jumlah siklus maksimum pabrikan, yang dirumuskan sebagai:

$$Life_{used} = \frac{EFC_{cum}}{N_{max}} \times 100\% \quad (2.3)$$

di mana  $EFC_{cum}$  merupakan nilai EFC kumulatif dan  $N_{max}$  adalah jumlah siklus maksimum baterai, yaitu 800 siklus. Selanjutnya, sisa umur pakai baterai dapat dihitung sebagai:

$$Life_{remaining} = \left(1 - \frac{EFC_{cum}}{N_{max}}\right) \times 100\% \quad (2.4)$$

Parameter Depth of Discharge (DoD) dan Equivalent Full Cycle (EFC) yang diperoleh pada tahap ini kemudian digunakan sebagai masukan utama dalam analisis dan prediksi State of Health (SoH) baterai pada tahapan berikutnya. Dengan pendekatan ini, penurunan kondisi kesehatan baterai dapat dianalisis secara kuantitatif berdasarkan pemakaian aktual dan akumulasi beban kerja jangka panjang, sehingga estimasi degradasi dan sisa umur pakai baterai menjadi lebih representatif terhadap kondisi operasi sistem yang sebenarnya. Pendekatan ini juga menjadi dasar dalam pengembangan sistem pemantauan baterai untuk menjaga kesiapan dan keandalan baterai pada sistem EDG.

### 2.1.5 Sistem Monitoring Baterai

Sistem monitoring baterai merupakan sistem yang dirancang untuk memantau kondisi operasional dan kesehatan baterai secara kontinu. Pada aplikasi kritis seperti Emergency Diesel Generator (EDG), sistem monitoring berperan penting dalam memastikan baterai selalu berada dalam kondisi siap pakai saat dibutuhkan.

Parameter utama yang umumnya dimonitor meliputi tegangan, arus, suhu, serta status pengisian dan pengosongan baterai. Data ini diperoleh perlatan komponen yaitu

#### 1. Sensor PZEM 017

PZEM-017 merupakan modul komunikasi DC yang dapat mengukur daya DC hingga 300VDC dan pengukuran arus pada rentang pemasangan shunt

eksternal 50A hingga 300A[7]. PZEM- 017 merupakan modul buatan Peacefair, merek China yang sangat terkenal dengan kualitas dan harga terjangkau dan mengkhususkan diri pada produk Metering. Modul ini dapat mengukur Tegangan, Arus, Daya dan Energi. Semua seri PZEM Energy Meters memiliki antarmuka komunikasi RS485 bawaan menggunakan protokol Modbus-RTU yang mirip dengan kebanyakan perangkat industry.



Gambar 2.3 Sensor PZEM 017

Sensor PZEM-017 merupakan modul pengukuran daya DC yang digunakan untuk membaca parameter kelistrikan baterai. Modul ini mampu mengukur tegangan DC hingga 300 VDC serta arus DC dengan memanfaatkan shunt eksternal pada rentang 50 A hingga 300 A. Selain tegangan dan arus, PZEM-017 juga dapat menghitung daya dan energi listrik secara terintegrasi.

## 2. PC Server

Server merupakan komponen penting dalam sistem monitoring modern yang berfungsi sebagai pusat pengolahan dan penyimpanan data. Dalam arsitektur sistem monitoring, server menerima data hasil pembacaan dari sensor untuk kemudian disimpan, diolah, dan dianalisis sebelum ditampilkan kepada pengguna melalui antarmuka Human Machine Interface (HMI).

Penggunaan server memungkinkan pemisahan antara proses akuisisi data dan proses visualisasi. Data yang dikirim oleh sensor tidak langsung ditampilkan, melainkan diproses terlebih dahulu agar lebih stabil dan representatif terhadap kondisi sistem yang sebenarnya. Selain itu, server mampu menyimpan data historis dalam jangka panjang sehingga mendukung proses evaluasi kinerja sistem secara berkelanjutan.

### 3. Human-Machine Interface (HMI)

Human–Machine Interface (HMI) adalah antarmuka pengguna yang menghubungkan operator dengan sistem atau peralatan industri, menyediakan visualisasi status proses secara real-time dan fasilitas interaksi/kontrol yang diperlukan untuk pengoperasian serta diagnostik

Dalam aplikasi SCADA/HMI berbasis industri, HMI umumnya terhubung ke perangkat lapangan (meter, PLC, sensor) menggunakan protokol industri seperti Modbus RTU; arsitektur ini memungkinkan HMI berperan sebagai master atau gateway yang membaca register dari slave (mis. meter PZEM-017) untuk menampilkan parameter listrik secara real-time.



Gambar 2.4 Human Machine Interface

### 4. Komunikasi Modbus RTU (RS-485)

Komunikasi data antara sensor PZEM-017 dan HMI menggunakan protokol Modbus RTU melalui media RS-485. Modbus RTU banyak digunakan dalam sistem pemantauan energi karena memiliki arsitektur *master–slave* yang sederhana, tingkat kompatibilitas tinggi dengan perangkat industri, serta keandalan komunikasi yang memadai untuk pengiriman data periodik.

Penggunaan RS-485 memungkinkan komunikasi jarak menengah hingga jauh dengan tingkat gangguan yang rendah, sehingga cocok digunakan pada lingkungan industri. Data tegangan dan arus baterai dikirimkan secara berkala dari sensor ke HMI untuk ditampilkan dan direkam sebagai data log.

## 5. Cloud-based monitoring dan IoT

Untuk mendukung pemantauan jarak jauh dan analisis jangka panjang, sistem monitoring baterai diintegrasikan dengan teknologi cloud dan Internet of Things (IoT). Data yang diperoleh dari HMI dan server lokal dikirimkan ke server cloud melalui mekanisme komunikasi yang aman, seperti *tunneling* atau *secure gateway*.

Integrasi cloud memungkinkan penyimpanan data historis dalam jangka panjang, akses data secara daring, serta penerapan analisis lanjutan seperti prediksi State of Health (SoH) berbasis Artificial Intelligence. Dengan pendekatan ini, kondisi baterai EDG dapat dipantau secara real-time maupun historis, sehingga mendukung penerapan perawatan berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance*) dan pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih tepat.

## 6. Pemodelan AI untuk prediksi SoH

Pemodelan Artificial Intelligence (AI) digunakan untuk mengestimasi kondisi kesehatan baterai (*State of Health/SoH*) berdasarkan data operasional yang diperoleh dari sistem monitoring. Berbeda dengan metode konvensional yang hanya mengandalkan ambang batas tegangan, pendekatan AI mampu menganalisis hubungan kompleks dan nonlinier antara parameter kelistrikan baterai dan proses degradasi yang terjadi secara bertahap.

Data masukan utama dalam pemodelan AI meliputi tegangan, arus, kapasitas terpakai, nilai Depth of Discharge (DoD), serta akumulasi Equivalent Full Cycle (EFC). Parameter-parameter tersebut membentuk data deret waktu (*time-series*) yang merepresentasikan pola pengisian dan pengosongan baterai selama periode operasi tertentu. Melalui data ini, model AI dapat mempelajari karakteristik degradasi baterai secara lebih akurat.

Model *machine learning* dan *deep learning*, seperti Long Short-Term Memory (LSTM) maupun model hibrida Transformer-LSTM, banyak digunakan dalam prediksi SoH karena kemampuannya dalam menangkap ketergantungan temporal jangka panjang. Model-model tersebut dapat mengenali perubahan pola tegangan dan arus, termasuk pada kondisi pengosongan parsial yang umum terjadi pada baterai siaga seperti baterai Emergency Diesel Generator (EDG).

Hasil keluaran dari pemodelan AI berupa estimasi nilai SoH dalam bentuk persentase yang menunjukkan tingkat kesehatan baterai relatif terhadap kondisi awalnya. Nilai SoH ini kemudian digunakan sebagai indikator utama dalam evaluasi kondisi baterai serta sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan. Dengan pendekatan ini, sistem monitoring tidak hanya bersifat reaktif, tetapi berkembang menjadi sistem analisis prediktif yang mendukung penerapan *Condition-Based Maintenance*.

## 2.2. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini, penulis melakukan beberapa tinjauan literatur pada penelitian yang relevan agar dapat dijadikan topik referensi. Referensi yang berasal dari jurnal, skripsi, artikel ataupun buku lain yang relevan. Beberapa jurnal yang dijadikan referensi penulis antara lain:

1. Su et al. (2024), *Energy Conversion and Management*: Mengembangkan model estimasi SoH berbasis data tegangan dan suhu menggunakan pembelajaran mesin. Menurut Su, L., Xu, Y., dan Dong, Z. (2024) dalam jurnal *Energy Conversion and Management*, penelitian tentang *State of Health (SoH)* baterai telah berkembang dari metode berbasis model fisik menjadi pendekatan berbasis data (*data-driven*). Mereka menjelaskan bahwa pendekatan AI, seperti *machine learning* dan *deep learning*, memungkinkan estimasi SoH secara real-time tanpa perlu parameter elektrokimia yang kompleks.
2. Zhao et al. (2023), *Journal of The Electrochemical Society*: Menerapkan deep learning untuk memprediksi SoH dari data pengisian baterai parsial. Penelitian oleh Zhao, L. et al. (2023) dalam *Journal of The Electrochemical Society* mengusulkan model *deep learning* (LSTM dan CNN) untuk memperkirakan SoH dari potongan data pengisian yang acak dan tidak lengkap. Hal ini menegaskan bahwa sistem monitoring tidak selalu membutuhkan data lengkap dari seluruh siklus pengisian-pengosongan baterai
3. Lanubile et al. (2024), *arXiv preprint*: Menggabungkan pengetahuan domain dan pembelajaran mesin untuk meningkatkan akurasi prediksi degradasi baterai.

Dalam penelitian Lanubile, A. et al. (2024) yang diterbitkan di *arXiv preprint*, dijelaskan pentingnya menggabungkan pengetahuan domain (*domain knowledge*) seperti resistansi internal dan suhu dengan model *machine learning* untuk meningkatkan akurasi estimasi SoH.

4. *Materials* (2025): Menyajikan tinjauan menyeluruh tentang indikator kesehatan baterai dan algoritma estimasi modern.

Menurut tinjauan komprehensif yang diterbitkan di jurnal **Materials** (2025) berjudul “*State of Health Estimation and Battery Management: A Review of Health Indicators, Models and Machine Learning*”, indikator kesehatan baterai tidak hanya bergantung pada kapasitas dan tegangan, tetapi juga mencakup resistansi internal, efisiensi energi, dan parameter temperatur.

5. *Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics* (2024): Meneliti penerapan *machine learning* untuk estimasi SoH pada data baterai industri yang tidak lengkap.

Penelitian terbaru oleh *Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics* (2024) berjudul “*Industrial Battery State-of-Health Estimation with Incomplete Limited Data Toward Second-Life Applications*” mengembangkan metode *machine learning* yang mampu mengolah data parsial atau tidak lengkap dari sistem industri.

**Tabel 2.1 Penelitian yang Relevan**

| No | Judul dan Tahun                                                                                                                                                                                                  | Masalah                                                                                                               | Metodologi                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Hasil                                                                                                | Riset Gap                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | <p>“State-of-health estimation of lithium-ion batteries: A comprehensive literature review from cell to pack levels.”</p> <p><i>Energy Conversion and Management</i>.</p> <p>Su, L., Xu, Y., Dong, Z. (2024)</p> | <p>Permasalahan degradasi baterai dari level sel hingga paket dan kurangnya metode universal untuk estimasi SoH..</p> | <p>Metode kajian literatur komprehensif terhadap penelitian-penelitian estimasi <i>State of Health (SoH)</i> baterai dari level sel hingga paket (cell-to-pack). Analisis dilakukan dengan membandingkan model berbasis fisik (<i>physics-based</i>) dan model berbasis data (<i>data-driven</i>).</p> | <p>Memberikan klasifikasi menyeluruh mengenai metode estimasi SoH dan parameter degradasi utama.</p> | <p>Penelitian ini tidak melakukan eksperimen langsung, melainkan mengumpulkan dan menganalisis berbagai pendekatan estimasi SoH. Relevansinya terhadap proposalmu adalah memberikan landasan teoretis bahwa pendekatan <i>data-driven</i> (AI) lebih fleksibel dan efisien dibandingkan metode elektrokimia</p> |

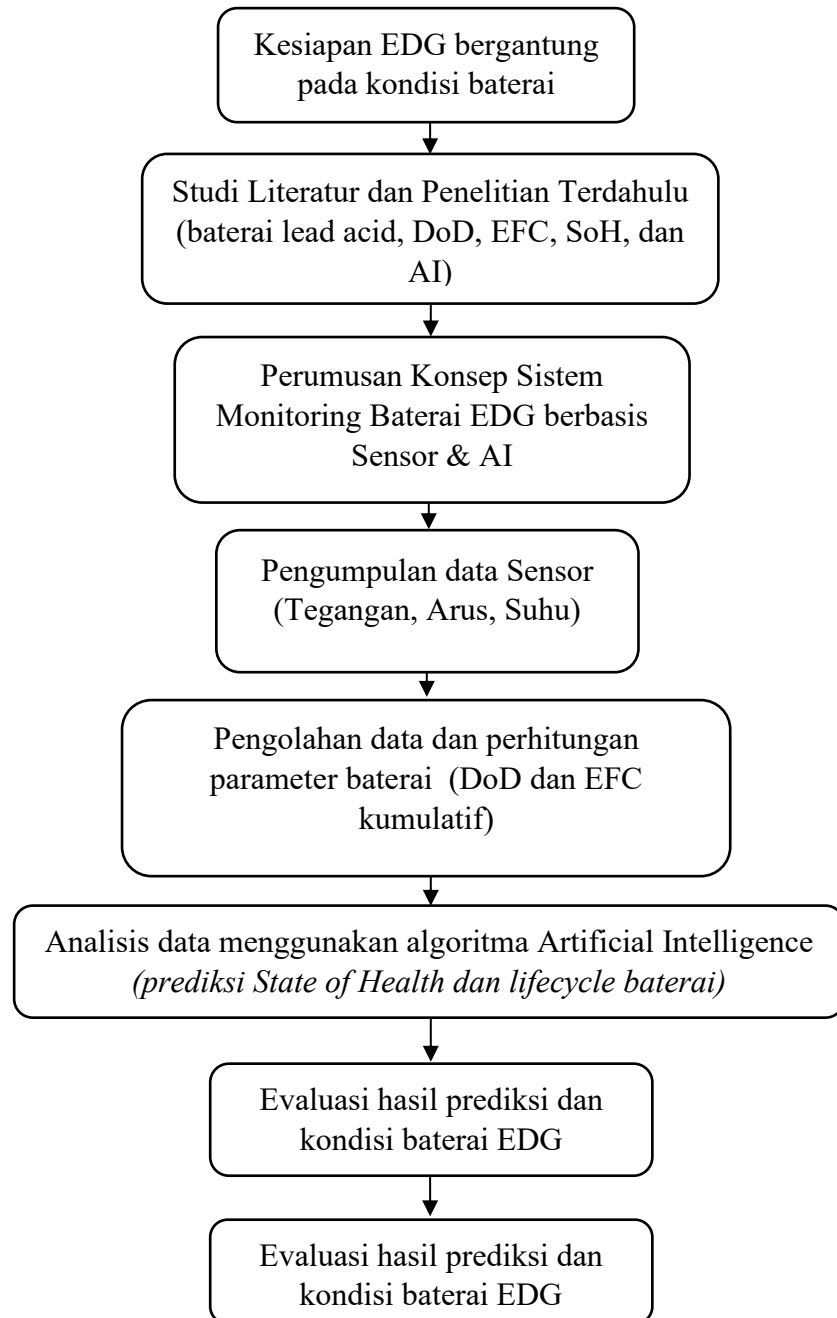
|    |                                                                                                                                                                                                    |                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                  |                                                                                                                                                     |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                                                                                                                                                                                                    |                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                  | tradisional dalam memantau kesehatan baterai.                                                                                                       |
| 2. | “Online State of Health Estimation with Deep Learning Frameworks Based on Short and Random Battery Charging Data Segments.” <i>Journal of The Electrochemical Society</i> . Zhao, L. et al. (2023) | Kesulitan mendapatkan data lengkap siklus pengisian baterai untuk pelatihan model AI.. | Menggunakan pendekatan eksperimental dan <i>deep learning framework</i> berbasis <i>Long Short-Term Memory (LSTM)</i> untuk memprediksi SoH dari potongan data pengisian acak. Dataset berasal dari <i>battery cycling experiment</i> dengan waktu pengisian dan pelepasan beban acak. | Model mampu memperkirakan SoH dengan akurasi tinggi meskipun data tidak lengkap. | Penelitian ini menekankan pada fokus baterai kendaraan listrik (EV); belum diaplikasikan pada sistem pembangkit dan integrasi sensor tegangan-arus. |
| 3. | “Domain knowledge-guided                                                                                                                                                                           | Kurangnya pemanfaatan pengetahuan                                                      | Mengembangkan framework machine                                                                                                                                                                                                                                                        | Akurasi meningkat 5–10%                                                          | Jurnal ini meneliti Model yang hanya                                                                                                                |

|    |                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                          |                                                                                          |                                                                                                                                         |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | machine learning framework for state of health estimation in lithium-ion batteries.”<br><i>arXiv preprint.</i><br>Lanubile, A. et al. (2024)     | domain untuk meningkatkan akurasi prediksi AI.                                                                                                                  | learning yang menggabungkan <i>domain knowledge</i> dengan algoritma regresi (misalnya XGBoost dan Random Forest). Fitur utama yang digunakan meliputi resistansi internal, suhu, dan kapasitas baterai. | dibandingkan metode tanpa domain knowledge.                                              | diuji di laboratorium; belum diintegrasikan dengan sistem monitoring real-time seperti EDG.                                             |
| 4. | “State of Health Estimation and Battery Management: A Review of Health Indicators, Models and Machine Learning.”<br><i>Materials, Vol.18(1).</i> | Masalah utama adalah belum adanya standardisasi indikator kesehatan ( <i>health indicators</i> ) baterai untuk berbagai aplikasi, sehingga hasil estimasi antar | Metode tinjauan sistematis (systematic review) dengan menganalisis dan membandingkan lebih dari 80 penelitian terkait indikator kesehatan                                                                | Menyimpulkan bahwa kombinasi parameter fisik dan model AI menghasilkan estimasi terbaik. | Penelitian ini masih sebatas kajian teoritis; belum diterapkan dalam konteks sistem kritikal seperti pembangkit atau generator darurat. |

|    |                                                                                                                                        |                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                        |                                                                          |                                                                                                                                     |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Li, M et al. (2025).                                                                                                                   | model sulit dibandingkan.                                                                            | baterai dan model prediksi berbasis AI. Analisis dilakukan dengan kategorisasi metode statistik, <i>machine learning</i> , dan <i>deep learning</i> .                                                                  |                                                                          |                                                                                                                                     |
| 5. | “Industrial Battery State-of-Health Estimation with Incomplete Limited Data Toward Second-Life Applications.”<br>Yang, S et al. (2024) | Data industri baterai sering tidak lengkap dan bervariasi sehingga sulit dipakai untuk prediksi SoH. | Menggunakan algoritma machine learning berbasis regresi multivariabel untuk memperkirakan SoH dari data industri yang tidak lengkap. Peneliti menguji berbagai model (Linear Regression, Ridge, dan Gradient Boosting) | Model dapat memperkirakan SoH dengan error <5% menggunakan data parsial. | Penelitian hanya fokus pada baterai industri umum; belum dikaitkan dengan fungsi kritical seperti sistem emergency pada pembangkit. |

|  |  |  |                                                      |  |  |
|--|--|--|------------------------------------------------------|--|--|
|  |  |  | dengan data<br>parsial dari<br>baterai<br>industri.. |  |  |
|--|--|--|------------------------------------------------------|--|--|

### 2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.5 Kerangka Pemikiran

Penelitian ini berangkat dari permasalahan kesiapan Emergency Diesel Generator (EDG) pada sistem pembangkit listrik, khususnya di lingkungan PLTD/G Tarahan. Keandalan EDG sangat ditentukan oleh kondisi baterai starter yang berfungsi sebagai sumber energi awal untuk proses penyalaan mesin diesel. Dalam kondisi operasional, baterai EDG umumnya berada pada status standby dalam jangka waktu yang panjang, sehingga proses degradasi baterai sering tidak terdeteksi secara dini dan baru diketahui ketika terjadi kegagalan start saat kondisi darurat. Hal ini menunjukkan perlunya sistem pemantauan yang mampu mengevaluasi kondisi dan kesehatan baterai secara akurat dan berkelanjutan.

Berdasarkan kajian literatur dan penelitian terdahulu, diketahui bahwa metode pemantauan baterai konvensional yang hanya mengandalkan parameter tegangan sesaat belum mampu merepresentasikan kondisi kesehatan baterai secara menyeluruh. Parameter operasional seperti Depth of Discharge (DoD), Equivalent Full Cycle (EFC), serta State of Health (SoH) terbukti memiliki keterkaitan yang lebih kuat terhadap proses degradasi dan umur pakai baterai. Selain itu, pendekatan berbasis Artificial Intelligence (AI) dinilai lebih adaptif karena mampu menganalisis hubungan nonlinier antara data tegangan, arus, dan pola siklus charge–discharge dalam memprediksi degradasi baterai secara dinamis.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini merancang suatu sistem monitoring dan analisis baterai EDG berbasis sensor dan AI. Sistem ini mengumpulkan data tegangan, arus, dan suhu baterai secara real-time melalui sensor, kemudian data tersebut diolah untuk menghitung parameter DoD dan EFC kumulatif sebagai indikator akumulasi pemakaian baterai. Selanjutnya, parameter-parameter tersebut digunakan sebagai masukan pada algoritma AI untuk melakukan estimasi State of Health (SoH) serta prediksi lifecycle baterai.

Hasil estimasi SoH dan prediksi lifecycle digunakan untuk mengevaluasi tingkat degradasi baterai dan menilai kesiapan baterai dalam mendukung operasi EDG. Informasi ini menjadi dasar dalam penerapan perawatan berbasis kondisi (Condition-Based Maintenance) serta penyediaan peringatan dini apabila kondisi baterai mendekati batas tidak aman. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan diharapkan mampu meningkatkan keandalan EDG dalam mendukung fungsi blackstart PLTD/G Tarahan dan menjaga kontinuitas pasokan listrik pada kondisi darurat.