

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Gardu Induk

Gardu induk merupakan salah satu instalasi utama dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai titik penghubung antara jaringan transmisi dan distribusi. Di dalamnya berlangsung proses transformasi tegangan serta pengaturan aliran daya listrik agar energi dapat disalurkan secara stabil dan aman ke berbagai wilayah. Sebagai fasilitas yang beroperasi secara kontinu, gardu induk dituntut memiliki keandalan tinggi karena setiap gangguan pada peralatan di dalamnya dapat berdampak langsung terhadap kontinuitas suplai listrik ke pelanggan. Struktur dan perangkat yang ada di gardu induk dirancang untuk memastikan bahwa penyaluran tenaga listrik dapat berlangsung tanpa hambatan, termasuk melalui dukungan sistem proteksi, kontrol, dan komunikasi yang bekerja secara terintegrasi.[6]

Dalam pengoperasiannya, gardu induk terdiri dari beberapa komponen utama seperti transformator tenaga, pemutus tenaga (circuit breaker), pemisah (disconnecting switch), transformator arus dan tegangan (CT dan PT), serta perangkat proteksi yang mengawasi kondisi jaringan secara real-time. Peralatan-peralatan ini tidak hanya membutuhkan suplai listrik dari sistem AC, tetapi juga bergantung pada sistem catu daya DC untuk memastikan fungsi kontrol dan proteksi tetap bekerja dengan baik. Sistem proteksi, misalnya, membutuhkan energi dari baterai DC untuk mengirim sinyal trip atau close pada pemutus tenaga ketika terjadi gangguan. Oleh karena itu, keberadaan sistem DC yang meliputi charger dan baterai — termasuk baterai 110 VDC — merupakan bagian yang tidak dapat dipisahkan dari operasional gardu induk.[7]

Sistem DC pada gardu induk memiliki peran yang sangat penting karena berfungsi sebagai sumber energi cadangan ketika suplai AC mengalami gangguan. Peralatan seperti relay proteksi, panel kontrol, RTU/SCADA, telekomunikasi, hingga lampu darurat tetap harus

menerima daya agar sistem tenaga listrik dapat diamankan selama kondisi abnormal. Dalam situasi tersebut, baterai 110 VDC menjadi satu-satunya sumber energi yang menopang operasi peralatan penting tersebut. Apabila baterai tidak mampu menyediakan daya yang memadai, maka relay proteksi bisa gagal beroperasi sehingga gangguan yang seharusnya dilokalisasi dapat berkembang menjadi pemadaman area yang luas. Dengan demikian, kondisi dan kelayakan baterai 110 VDC menjadi faktor penentu dalam menjaga keandalan gardu induk.



Gambar 2. 1 Gardu Induk Soppeng 150 kV

Keandalan gardu induk sangat bergantung pada kestabilan sistem DC, khususnya baterai yang harus mampu mempertahankan tegangan dan kapasitas selama periode beban kritis. Karena baterai mengalami penurunan performa seiring waktu akibat proses kimiawi di dalamnya, maka diperlukan evaluasi berkala untuk memastikan kapasitas aktualnya masih memenuhi kebutuhan beban. Beberapa indikator seperti tegangan per sel, total kapasitas dalam ampere-hour, efisiensi pengisian, serta kestabilan suplai saat beban puncak menjadi acuan dalam menentukan apakah baterai masih layak digunakan. Evaluasi ini menjadi sangat relevan mengingat baterai 110 VDC merupakan bagian yang menjalankan fungsi vital, terutama ketika terjadi gangguan pada sumber AC.[8]

Dengan mempertimbangkan pentingnya peran baterai dalam menjaga sistem proteksi dan kontrol gardu induk, analisis kelayakan baterai 110 VDC merupakan langkah yang sangat

diperlukan. Gardu Induk Soppeng sebagai bagian dari infrastruktur kelistrikan regional harus memastikan bahwa setiap komponennya bekerja optimal sesuai standar. Oleh karena itu, kajian mengenai kondisi aktual, kemampuan penyediaan daya, dan tingkat degradasi baterai menjadi landasan penting dalam menentukan langkah pemeliharaan atau penggantian demi menjaga keamanan dan kontinuitas pelayanan listrik. Landasan teori ini memberikan dasar konsep bahwa keberhasilan operasional gardu induk tidak hanya ditentukan oleh peralatan utama, tetapi juga oleh sistem pendukung seperti baterai 110 VDC yang memiliki peran kritis pada saat-saat darurat.

2.1.2 Sistem Catu Daya DC di Gardu Induk

Sistem catu daya DC merupakan salah satu subsistem paling kritis dalam operasi gardu induk karena berfungsi sebagai sumber energi utama bagi perangkat proteksi, kontrol, telekomunikasi, dan sistem pendukung lainnya. Tidak seperti suplai AC yang rentan terganggu oleh kondisi sistem, suplai DC dirancang agar tetap beroperasi stabil meskipun terjadi gangguan besar pada jaringan. Hal ini menjadikan sistem DC sebagai “backbone” yang memastikan setiap proses pengamanan jaringan berjalan sebagaimana mestinya. Tanpa dukungan sistem DC yang andal, gardu induk tidak dapat melakukan tindakan proteksi seperti trip atau close pada pemutus tenaga, sehingga potensi meluasnya gangguan menjadi jauh lebih besar.[9]

Secara umum, sistem catu daya DC pada gardu induk terdiri dari tiga komponen utama, yaitu rectifier/charger, baterai, dan panel distribusi DC. Rectifier atau charger berfungsi mengubah energi listrik AC menjadi DC sekaligus menjaga agar baterai tetap berada pada kondisi siap pakai melalui proses pengisian otomatis. Baterai berperan sebagai sumber energi cadangan yang akan mengambil alih penuh ketika suplai AC tidak tersedia atau ketika charger mengalami gangguan. Sementara itu, panel distribusi DC menyalurkan energi ke berbagai beban penting seperti relay proteksi, kontrol pemutus tenaga, RTU/SCADA, sistem telekomunikasi, lampu darurat, dan peralatan penunjang lainnya. Ketiga komponen ini bekerja secara terpadu untuk memastikan bahwa energi DC selalu tersedia kapan pun dibutuhkan.[10]



Gambar 2. 2 Baterai 110 VDC GI Soppeng

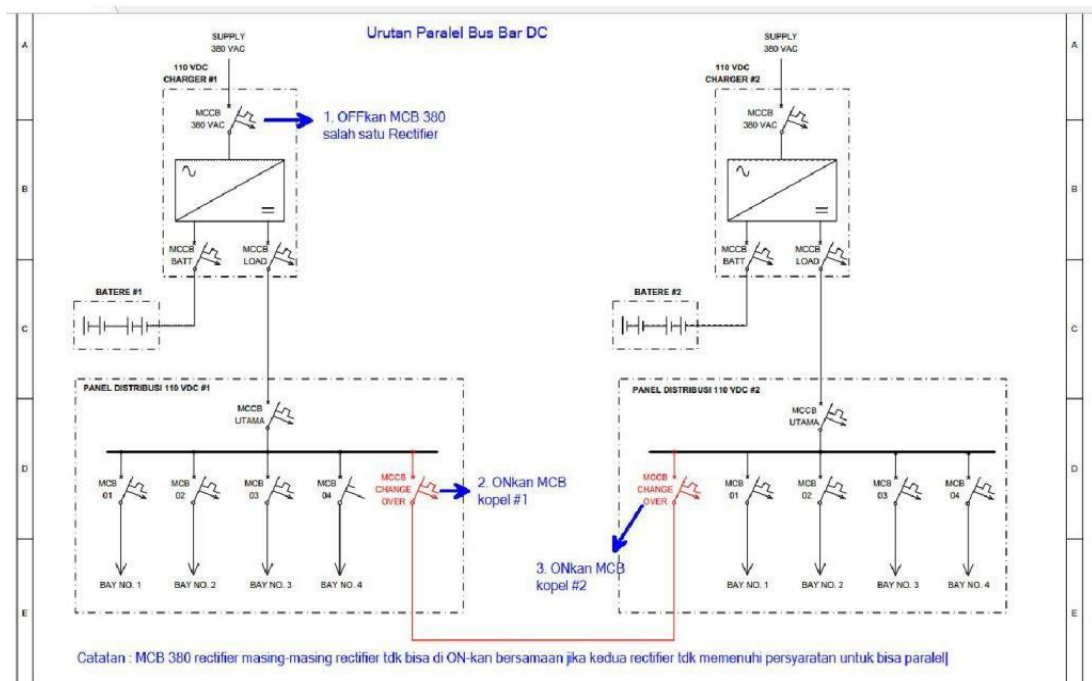
Sistem DC pada gardu induk umumnya menggunakan tegangan standar seperti 110 VDC atau 220 VDC, tergantung desain dan kebutuhan operasional. Tegangan 110 VDC sangat umum digunakan pada instalasi proteksi dan kontrol karena dinilai stabil serta aman untuk pengoperasian perangkat sensitif. Dalam kondisi normal, beban DC memperoleh suplai dari charger, sedangkan baterai hanya menyediakan tambahan arus kecil untuk menjaga kondisi pengisian. Namun ketika terjadi kerusakan pada suplai AC atau gangguan lain yang menyebabkan charger tidak dapat bekerja, baterai harus mampu menyediakan seluruh kebutuhan daya beban secara mandiri dalam jangka waktu tertentu sesuai standar operasional. Inilah sebabnya kapasitas, efisiensi, dan kondisi fisik baterai menjadi faktor utama yang menentukan keandalan sistem DC.

Keandalan sistem catu daya DC sangat mempengaruhi keamanan jaringan listrik, karena sistem proteksi sangat bergantung pada suplai DC yang stabil untuk menjalankan fungsinya. Relay proteksi, misalnya, membutuhkan energi DC untuk mendeteksi gangguan dan mengirimkan sinyal trip secara cepat ke pemutus tenaga. Jika suplai DC melemah atau tidak tersedia, maka proses proteksi tidak dapat dilakukan, sehingga gangguan yang seharusnya dapat diisolasi dengan cepat dapat menjalar ke area yang lebih luas. Oleh karena itu, performa baterai sebagai komponen kunci dalam sistem DC harus selalu memenuhi standar untuk

memastikan bahwa perangkat proteksi dan kontrol dapat beroperasi optimal dalam segala kondisi.

Dalam konteks penelitian mengenai kelayakan baterai 110 VDC di Gardu Induk Soppeng, pemahaman tentang sistem catu daya DC menjadi landasan penting. Kondisi baterai yang mengalami degradasi dapat secara langsung memengaruhi kestabilan suplai DC, terutama pada situasi gangguan ketika baterai menjadi satu-satunya sumber energi. Evaluasi terhadap sistem DC tidak hanya menyangkut kapasitas dan tegangan baterai, tetapi juga kemampuan penyediaan daya terhadap seluruh beban DC. Dengan demikian, analisis kelayakan baterai 110 VDC merupakan langkah yang tepat dalam menjaga keandalan sistem catu daya DC dan stabilitas operasi gardu induk secara keseluruhan.[11]

2.1.3 Rangkaian Sistem Pengujian Baterai



Gambar 2. 3 Single Line Diagram Sistem Pengujian Baterai 110 VDC

Gambar 2.3 menunjukkan konfigurasi sistem catu daya DC 110 V di Gardu Induk Soppeng yang terdiri dari dua sumber AC, dua unit charger atau rectifier, dua bank baterai,

serta panel distribusi beban DC. Pada kondisi normal, energi listrik berasal dari sumber AC 380 V yang dikonversi oleh charger menjadi tegangan DC 110 V, kemudian disalurkan melalui MCCB menuju bus DC dan didistribusikan ke beban penting seperti relay proteksi, panel kontrol, SCADA/RTU, telekomunikasi, serta rangkaian trip dan close circuit breaker. Selain menyuplai beban, charger juga berfungsi mengisi baterai dalam mode *float charging* agar selalu siap digunakan. Sistem baterai terdiri dari Battery Bank 1 dan Battery Bank 2 yang masing-masing tersusun dari 86 sel Nickel-Cadmium yang dirangkai seri untuk menghasilkan tegangan sekitar 110 VDC, dengan kapasitas nominal masing-masing sebesar 145 Ah dan 300 Ah sebagai acuan analisis kapasitas dan waktu *backup*. Pada kondisi darurat, ketika suplai AC atau charger terganggu, baterai secara otomatis menyuplai energi ke bus DC melalui panel distribusi sehingga kontinuitas operasi sistem proteksi dan kontrol tetap terjaga.

2.1.4 Baterai

Baterai merupakan perangkat penyimpan energi listrik yang bekerja berdasarkan reaksi kimia (electrochemical energy storage). Dalam sistem tenaga listrik, terutama pada gardu induk, baterai digunakan sebagai sumber daya utama ketika suplai AC tidak tersedia[12]. Baterai menyediakan energi dalam bentuk arus searah (DC) yang sangat dibutuhkan oleh perangkat kritis seperti relay proteksi, kontrol pemutus tenaga (CB), peralatan telekomunikasi, dan sistem SCADA. Karena perannya yang sangat vital, kehandalan baterai menjadi salah satu faktor utama dalam menjaga keandalan sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Ketika terjadi gangguan pada suplai AC, baterai adalah satu-satunya sumber energi yang memastikan peralatan proteksi dapat beroperasi secara cepat dan tepat.[13]

Baterai yang paling banyak digunakan pada gardu induk adalah jenis lead-acid, baik dalam bentuk VRLA (Valve Regulated Lead Acid) maupun tipe flooded (basah). VRLA dipilih karena memiliki keunggulan seperti perawatan minimal, risiko kebocoran elektrolit rendah, dan lebih stabil untuk aplikasi stasioner seperti sistem DC gardu induk. Baterai lead-acid bekerja melalui reaksi elektrokimia antara elektroda timbal (Pb), timbal dioksida (PbO_2), dan elektrolit asam sulfat (H_2SO_4). Selama proses pengosongan, ion-ion bergerak sehingga mengubah energi kimia menjadi energi listrik, dan ketika proses pengisian berlangsung, energi

listrik yang diberikan akan mengembalikan reaksi kimia ke bentuk semula. Setiap sel baterai lead-acid memiliki tegangan sekitar 2 V, sehingga untuk mendapatkan tegangan 110 VDC digunakan rangkaian sekitar 55 sel secara seri.



Gambar 2. 4 Baterai 110 VDC

Kapasitas baterai dinyatakan dalam satuan Ampere-hour (Ah) yang menggambarkan kemampuan baterai menyediakan arus dalam jangka waktu tertentu. Kapasitas ini dapat berkurang seiring bertambahnya umur baterai, jumlah siklus pengisian–pengosongan, serta kondisi lingkungan seperti temperatur dan kelembapan. Baterai juga memiliki parameter penting lain seperti internal resistance, State of Charge (SOC), State of Health (SOH), efisiensi pengisian, dan tegangan per sel. Peningkatan internal resistance, misalnya, menunjukkan adanya penurunan kemampuan baterai dalam menyalurkan arus, sehingga beban DC tidak dapat disuplai secara optimal. Oleh karena itu, pemeriksaan berkala terhadap parameter tersebut sangat diperlukan untuk mengetahui tingkat kesehatan baterai.[14]

Baterai VRLA memiliki karakteristik khusus yang perlu diperhatikan dalam pemeliharaan dan evaluasi kelayakannya. Sistem ventilasi tertutup membuat gas yang dihasilkan selama proses kimiawi dapat direkombinasi kembali di dalam sel, sehingga mengurangi kebutuhan perawatan. Namun demikian, kelebihan tegangan pengisian atau temperatur yang terlalu tinggi dapat mempercepat proses degradasi dan menyebabkan

penurunan kapasitas yang signifikan. Pada sistem DC gardu induk, baterai biasanya bekerja dalam keadaan *float charging*, di mana charger menjaga baterai pada kondisi siap pakai tanpa memberikan arus berlebihan. Kondisi *float* yang tidak stabil, baik karena charger bermasalah atau beban yang berubah-ubah, dapat berpengaruh pada kualitas baterai dalam jangka panjang.

Dalam konteks kelayakan, performa baterai dievaluasi berdasarkan kemampuan menyediakan daya selama periode darurat. Baterai harus mampu menyuplai beban DC dalam rentang waktu tertentu sesuai standar operasional gardu induk. Penilaian kelayakan biasanya dilakukan melalui capacity test, yaitu pengujian dengan membandingkan kapasitas aktual baterai terhadap kapasitas nominal dari pabrikan. Jika kapasitas turun di bawah batas tertentu (misalnya 80% atau sesuai standar PLN/IEEE), baterai dianggap tidak layak dan perlu diganti. Selain itu, parameter seperti kestabilan tegangan, efisiensi, dan kemampuan penyediaan arus puncak selama trip operation juga menjadi indikator penting kelayakan baterai 110 VDC.

Berdasarkan teori tersebut, dapat disimpulkan bahwa baterai memegang peran sentral dalam menjaga stabilitas sistem DC pada gardu induk. Setiap penurunan performa baterai akan berdampak langsung pada keandalan proteksi dan kontrol jaringan listrik. Oleh karena itu, analisis kelayakan baterai 110 VDC di Gardu Induk Soppeng merupakan langkah penting untuk memastikan bahwa baterai masih mampu menjalankan fungsinya secara optimal dan aman dalam mendukung operasi gardu induk.[15]

2.1.5 Beban DC Pada Gardu Induk

Beban DC pada gardu induk merupakan kelompok peralatan yang membutuhkan suplai arus searah untuk dapat beroperasi secara stabil, terutama dalam kondisi gangguan atau ketika suplai AC tidak tersedia. Sistem beban DC ini memiliki peran sangat penting dalam menjaga keandalan operasi gardu induk karena sebagian besar perangkat proteksi, kontrol, dan komunikasi hanya dapat berfungsi jika menerima suplai DC yang konsisten. Tidak seperti beban AC yang dapat dimatikan sementara tanpa memengaruhi sistem proteksi, beban DC harus tetap aktif sepanjang waktu. Oleh sebab itu, keberadaan baterai 110 VDC sebagai sumber

daya cadangan menjadi kritikal untuk memastikan seluruh perangkat DC tetap bekerja dalam berbagai kondisi operasi.

Salah satu kelompok beban DC utama adalah relay proteksi. Relay proteksi bertugas mendeteksi gangguan pada jaringan dan memberikan sinyal perintah kepada pemutus tenaga (circuit breaker) untuk melakukan tindakan trip atau close. Sistem proteksi tidak dapat berfungsi tanpa catu daya DC, karena sinyal kontrol, logika proteksi, dan mekanisme operasi CB sangat bergantung pada energi dari sistem DC. Jika suplai DC terganggu atau baterai tidak mampu menyediakan daya yang memadai, relay tidak dapat bekerja dengan benar, sehingga gangguan yang seharusnya dapat diisolasi bisa menjalar ke sistem lain. Inilah sebabnya keberlanjutan suplai dari baterai 110 VDC dalam keadaan darurat sangat menentukan keandalan sistem proteksi gardu induk.

Selain relay proteksi, sistem kontrol juga termasuk dalam beban DC penting di gardu induk. Sistem kontrol mencakup panel-panel kendali, rangkaian logika, lampu indikator, dan rangkaian sinyal yang digunakan operator untuk memantau serta mengendalikan peralatan tenaga listrik. Fungsi ini sangat bergantung pada suplai DC yang stabil agar setiap perintah dapat dieksekusi tanpa hambatan. Panel kontrol modern biasanya dilengkapi dengan perangkat elektronik yang sensitif terhadap fluktuasi tegangan; karenanya, sistem DC harus memiliki kualitas daya yang sangat baik untuk memastikan kontrol bekerja secara akurat dan responsif.

Selain itu, beban DC juga mencakup sistem telekomunikasi dan SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Sistem ini berfungsi untuk mengirimkan data operasional gardu induk ke pusat pengendalian, serta menerima perintah kendali jarak jauh. RTU, modem komunikasi, repeater, dan perangkat pendukung lainnya membutuhkan suplai DC yang andal agar proses pengiriman data tidak terputus. Hilangnya daya pada sistem telekomunikasi dapat menyebabkan operator tidak menerima informasi real-time mengenai kondisi jaringan, yang pada akhirnya menghambat proses penanganan gangguan dan pemulihan sistem.

Beban DC lainnya yang juga penting adalah lampu emergensi, alarm, mekanisme trip/close CB, dan peralatan monitoring. Lampu emergensi berfungsi memberikan penerangan

saat gangguan listrik terjadi, sehingga petugas dapat melakukan inspeksi atau perbaikan dengan aman. Alarm bekerja untuk memberikan sinyal peringatan ketika terdeteksi anomali pada peralatan. Semua perangkat ini membutuhkan energi dari baterai ketika suplai AC tidak tersedia, sehingga kapasitas baterai harus mampu mencakup total kebutuhan beban selama periode gangguan.

Total beban DC pada gardu induk biasanya dihitung berdasarkan spesifikasi peralatan dan standar operasional, termasuk beban kontinu dan beban sesaat (seperti arus trip atau close CB yang membutuhkan energi tinggi dalam waktu singkat). Perhitungan beban DC ini merupakan bagian penting dalam menentukan kelayakan baterai 110 VDC, karena kemampuan baterai untuk menyediakan daya sangat bergantung pada besar kecilnya beban yang harus ditopang. Apabila total beban DC melebihi kemampuan baterai, maka durasi backup time akan berkurang dan sistem proteksi dapat terganggu.

Dengan memahami karakteristik dan jenis beban DC pada gardu induk, analisis kelayakan baterai 110 VDC dapat dilakukan dengan lebih akurat. Beban-beban ini menjadi parameter utama yang harus dipertimbangkan dalam perhitungan kapasitas efektif, efisiensi baterai, serta kemampuan baterai untuk menyuplai daya selama kondisi darurat. Oleh karena itu, landasan teori beban DC ini menjadi komponen penting yang memperkuat dasar analisis dalam penelitian mengenai kelayakan sistem baterai pada Gardu Induk Soppeng.

2.1.6 Konsep Kelayakan Sistem Baterai

Konsep kelayakan sistem baterai berkaitan dengan kemampuan baterai dalam memenuhi kebutuhan daya sesuai standar operasional dan kondisi beban yang harus disuplai. Kelayakan ini dinilai dari kemampuan baterai untuk menyediakan energi dalam jumlah yang cukup, stabil, dan aman selama masa operasi normal maupun saat terjadi gangguan pada sumber utama AC. Dalam konteks gardu induk, kelayakan baterai menjadi faktor yang sangat penting karena sistem proteksi, kontrol, dan telekomunikasi bergantung sepenuhnya pada suplai DC ketika terjadi gangguan. Oleh sebab itu, penentuan kelayakan baterai tidak hanya berdasarkan umur

atau kondisi fisik, tetapi juga mencakup performa aktual yang dapat diukur melalui serangkaian parameter teknis.

Salah satu prinsip dasar dalam menilai kelayakan baterai adalah melihat kapasitas efektif yang dimiliki. Kapasitas efektif merupakan perbandingan antara kapasitas aktual baterai dari hasil pengujian dengan kapasitas nominal yang ditetapkan pabrikan. Seiring berjalannya waktu, kapasitas baterai akan menurun akibat degradasi kimiawi, siklus penggunaan, serta kondisi lingkungan yang kurang optimal. Standar seperti IEEE dan IEC umumnya menetapkan bahwa baterai dianggap tidak layak jika kapasitasnya telah turun di bawah 80% dari kapasitas nominal. Angka ini menjadi acuan penting dalam menentukan apakah baterai masih mampu memenuhi kebutuhan beban DC atau perlu dilakukan penggantian untuk menjaga keandalan sistem.

Selain kapasitas, kestabilan tegangan juga menjadi indikator kelayakan yang sangat penting. Tegangan setiap sel baterai harus berada dalam rentang yang direkomendasikan pabrikan agar proses pengisian dan pengosongan berlangsung normal. Tegangan yang terlalu rendah menunjukkan bahwa baterai tidak mampu menjaga keseimbangan elektrokimia di dalam sel, sedangkan tegangan yang terlalu tinggi dapat mempercepat kerusakan internal. Evaluasi tegangan dilakukan ketika baterai berada dalam kondisi *float*, *boost*, maupun *discharge*, sehingga kondisi sesungguhnya dapat terlihat secara menyeluruh. Dalam sistem DC gardu induk, ketidakstabilan tegangan dapat menyebabkan relay proteksi gagal bekerja atau perangkat kontrol mengalami malfungsi.

Parameter penting lain dalam menentukan kelayakan adalah internal resistance. Nilai resistansi internal meningkat seiring bertambahnya usia baterai atau akibat kondisi kimiawi yang tidak stabil, seperti sulfasi pada baterai lead-acid. Jika resistansi internal terlalu tinggi, baterai tidak mampu mengalirkan arus dalam jumlah besar secara cepat. Hal ini sangat berbahaya dalam sistem proteksi gardu induk karena mekanisme trip pada pemutus tenaga membutuhkan arus tinggi pada waktu singkat. Ketidakmampuan baterai untuk memberikan

arus puncak dapat menyebabkan proteksi tidak bekerja pada saat kritis, sehingga pengujian internal resistance menjadi aspek wajib dalam penilaian kelayakan.

Selain parameter teknis, kelayakan baterai juga dinilai berdasarkan kemampuan penyediaan daya terhadap beban DC dalam durasi tertentu yang disebut *backup time*. Backup time menunjukkan berapa lama baterai dapat menopang seluruh beban DC ketika suplai AC atau charger tidak tersedia. Durasi ini disesuaikan dengan standar dan kebutuhan operasional gardu induk. Jika backup time aktual lebih rendah dari waktu yang dipersyaratkan, maka baterai dianggap tidak layak meskipun terlihat dalam kondisi baik secara fisik. Dengan demikian, penilaian kelayakan tidak dapat dilakukan hanya dari tampilan luar atau pengukuran sesaat, tetapi harus melalui perhitungan daya dan analisis perilaku baterai saat memberi beban dalam kondisi nyata.

Kriteria Baterai Layak pada Sistem DC Gardu Induk

Menurut IEEE 450 dan IEEE 1188, kelayakan baterai ditentukan berdasarkan parameter performa aktual, bukan hanya kondisi fisik. Baterai dikatakan layak apabila memenuhi beberapa kriteria berikut:

1. Kapasitas Efektif $\geq 80\%$ dari Kapasitas Nominal

Standar IEEE menyatakan bahwa baterai harus diganti apabila kapasitasnya turun di bawah 80% dari nilai nominal.

2. Tegangan Sel Stabil dan Seimbang

Tegangan float setiap sel berada pada rentang 2,23–2,30 V per sel dengan deviasi kecil antar sel. Ketidakseimbangan menunjukkan adanya degradasi (IEEE 450, 2020).

3. Internal Resistance dalam Batas Normal

Peningkatan resistansi internal menunjukkan penurunan kemampuan arus puncak yang diperlukan dalam operasi proteksi.

4. Backup Time Memenuhi Standar Operasional

Sistem baterai harus mampu menyuplai beban DC selama minimal 1–2 jam sesuai standar operasional gardu induk (IEC 60896).

5. Kondisi Fisik dan Termal Baik

Tidak terdapat kebocoran elektrolit, swelling, overheating, maupun kerusakan mekanis.

6. Sistem Charging Stabil

Charger harus beroperasi dalam mode float charging dengan tegangan stabil.

Penilaian kelayakan berdasarkan parameter tersebut sangat penting untuk menjamin keandalan sistem proteksi dan kontrol pada gardu induk.

Secara keseluruhan, konsep kelayakan sistem baterai mencakup penilaian terhadap kapasitas efektif, tegangan sel, internal resistance, tingkat efisiensi pengisian, hingga kemampuan baterai dalam menghadapi beban kritis. Seluruh parameter tersebut dievaluasi berdasarkan standar seperti IEEE 450/1188, IEC 60896, maupun pedoman internal PLN. Dengan memahami konsep kelayakan ini, peneliti dapat menentukan apakah baterai 110 VDC di Gardu Induk Soppeng masih memenuhi syarat operasional atau perlu diganti untuk menjaga keandalan sistem DC. Oleh karena itu, landasan teori ini menjadi dasar evaluasi yang objektif dan terukur dalam penelitian analisis kelayakan baterai.

Bagian-Bagian Utama Baterai Lead-Acid pada Sistem 110 VDC

Baterai timbal-asam (lead-acid) yang digunakan pada sistem DC gardu induk terdiri dari beberapa komponen utama yang berperan dalam proses penyimpanan dan penyaluran energi listrik. Pemahaman terhadap bagian-bagian baterai sangat penting dalam evaluasi kelayakan, karena kerusakan pada salah satu komponen dapat menurunkan performa sistem secara keseluruhan (IEEE 450, 2020; IEC 60896).

1. Elektroda Positif (Lead Dioxide – PbO_2)

Elektroda positif berfungsi sebagai tempat reaksi reduksi selama proses discharge. Degradasi material aktif pada elektroda ini dapat menyebabkan penurunan kapasitas dan efisiensi baterai.

2. Elektroda Negatif (Lead – Pb)

Elektroda negatif berperan dalam reaksi oksidasi selama pengosongan baterai. Sulfasi pada elektroda negatif merupakan salah satu penyebab utama peningkatan resistansi internal.

3. Elektrolit (H_2SO_4)

Elektrolit berfungsi sebagai media penghantar ion antara elektroda. Konsentrasi elektrolit sangat mempengaruhi tegangan dan kapasitas baterai (Linden & Reddy, 2011).

4. Separator

Separator memisahkan elektroda positif dan negatif untuk mencegah hubungan singkat, namun tetap memungkinkan perpindahan ion.

5. Terminal dan Konektor

Bagian ini berfungsi sebagai jalur aliran arus listrik. Korosi pada konektor dapat meningkatkan resistansi dan menyebabkan penurunan tegangan (IEEE 1188, 2005).

6. Container dan Vent System

Container melindungi komponen internal, sedangkan vent system pada baterai VRLA berfungsi mengatur tekanan gas dan rekombinasi oksigen.

2.1.7 Metode Pengujian Dan Analisis Baterai

Metode pengujian dan analisis baterai dilakukan untuk mengetahui kondisi aktual, performa, dan tingkat kelayakan baterai dalam menyuplai beban DC pada gardu induk. Pengujian dimulai dari inspeksi visual untuk melihat kondisi fisik baterai dan koneksinya, dilanjutkan dengan pengukuran tegangan bank maupun tegangan per sel guna mengetahui keseimbangan dan kondisi elektrokimia setiap sel. Selanjutnya dilakukan pengukuran internal resistance atau conductance yang memberikan gambaran kemampuan baterai dalam menyalurkan arus pada saat beban puncak, diikuti dengan *capacity test* sebagai pengujian utama untuk menentukan kapasitas efektif dengan cara melakukan discharge terkontrol sampai mencapai tegangan cutoff sesuai standar. Selama pengujian, parameter seperti arus, tegangan, suhu, dan durasi discharge dicatat untuk menghitung kapasitas aktual dan *State of Health*

(SOH). Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk menilai kesiapan baterai dalam menopang beban DC, termasuk memperkirakan *backup time*, mengevaluasi stabilitas tegangan, serta membandingkan hasil dengan standar IEEE/IEC dan spesifikasi pabrikan. Hasil analisis ini menjadi dasar untuk menentukan apakah baterai masih layak beroperasi atau perlu diganti demi menjaga keandalan sistem DC pada Gardu Induk Soppeng.

Selain pengujian kapasitas, analisis baterai juga melibatkan evaluasi performa terhadap beban nyata yang terjadi pada gardu induk, yaitu beban kontinu maupun beban sesaat seperti arus trip dan close pemutus tenaga. Pengujian ini dilakukan dengan mensimulasikan kondisi operasi lapangan untuk melihat apakah baterai mampu mempertahankan tegangan tetap stabil ketika menerima beban mendadak. Penurunan tegangan yang terlalu drastis selama uji beban sesaat dapat menunjukkan bahwa baterai tidak lagi sanggup menyediakan arus puncak yang dibutuhkan oleh sistem proteksi. Selain itu, data dari sistem monitoring atau SCADA juga dianalisis untuk melihat pola variasi tegangan float, kondisi charger, serta histori alarm baterai, sehingga gambaran performa baterai selama operasi harian dapat diketahui secara lebih menyeluruh.

Tahap akhir dari analisis baterai adalah melakukan interpretasi hasil pengujian berdasarkan standar yang berlaku seperti IEEE 450, IEEE 1188, atau IEC 60896, serta pedoman teknis pabrikan. Hasil kapasitas, resistansi internal, kestabilan tegangan, dan estimasi *backup time* dibandingkan dengan batas kelayakan yang ditetapkan untuk menentukan status baterai apakah masih layak, layak dengan rekomendasi perbaikan, atau tidak layak dan harus diganti. Selain itu, tren penurunan kapasitas dibandingkan tahun-tahun sebelumnya dapat digunakan untuk memprediksi umur sisa (*Remaining Useful Life*) baterai. Interpretasi yang komprehensif ini memastikan bahwa keputusan penggantian maupun perawatan lebih lanjut dilakukan secara tepat dan berbasis data, sehingga keandalan sistem DC pada Gardu Induk Soppeng tetap terjamin.[16]

Tahapan Pengukuran Tegangan Sel dan Bank Baterai

Pengukuran tegangan sel dan bank baterai merupakan langkah awal dalam evaluasi kondisi baterai. Menurut IEEE 450 dan IEEE 1188, tahapan pengujian dilakukan secara sistematis sebagai berikut:

1. Persiapan dan Keselamatan Kerja
 - a. Menggunakan alat ukur yang terkalibrasi.
 - b. Memastikan penggunaan APD sesuai standar keselamatan.
2. Inspeksi Visual Awal
 - a. Pemeriksaan kondisi fisik, terminal, ventilasi, dan koneksi.
 - b. Mengidentifikasi tanda korosi, kebocoran, dan deformasi.
3. Pengukuran Tegangan Float Bank Baterai
 - a. Dilakukan untuk memastikan tegangan sistem berada dalam batas operasi.
4. Pengukuran Tegangan Setiap Sel
 - a. Dilakukan secara berurutan pada seluruh sel.
 - b. Nilai dicatat untuk mengetahui keseimbangan tegangan.
5. Analisis Deviasi Tegangan Sel
 - a. Deviasi tegangan digunakan untuk mendeteksi sel lemah.
 - b. Sel dengan deviasi $> \pm 0,05$ V memerlukan perhatian khusus.
6. Pengujian Saat Beban (Load Test)
 - a. Tegangan diukur saat baterai menopang beban.
 - b. Bertujuan mengetahui stabilitas dan respon baterai.
7. Capacity Test (Discharge Test)
 - a. Pengujian utama untuk menentukan kapasitas aktual.
 - b. Dilakukan dengan arus konstan hingga tegangan cutoff.
8. Pengukuran Internal Resistance
 - a. Digunakan untuk mengetahui degradasi dan kemampuan arus puncak.
9. Pencatatan dan Analisis Data
 - a. Data dibandingkan dengan standar IEEE dan spesifikasi pabrikan.

Tahapan ini memungkinkan evaluasi menyeluruh terhadap kondisi baterai dan menjadi dasar dalam menentukan status kelayakan.

2.2 Penelitian Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurna, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Suyanto, Diantari, dan Koerniawan (2020) dalam penelitiannya berjudul “*Study Operation Demonstration Project STT-PLN of the Battery Energy Storage System in Buton Island (Baubau Southeast Sulawesi)*” membahas implementasi Battery Energy Storage System (BESS) sebagai sistem penyimpanan energi untuk meningkatkan stabilitas suplai listrik di wilayah Kepulauan Buton. Penelitian ini mengkaji performa operasional BESS dalam menstabilkan frekuensi, mereduksi fluktuasi daya, serta mendukung keandalan sistem kelistrikan berbasis energi terdistribusi. Penelitian tersebut menjadi referensi penting karena menunjukkan peran teknologi baterai dalam menjaga kontinuitas suplai listrik dan mendukung sistem tenaga, yang relevan dengan konteks pemanfaatan baterai pada instalasi kelistrikan. Perbedaan utamanya dengan penelitian saya adalah penelitian tersebut fokus pada implementasi BESS berskala jaringan dan pengaruhnya terhadap kualitas daya sistem kelistrikan, sedangkan penelitian saya berfokus pada analisis kelayakan, kinerja, dan keandalan baterai sistem DC pada Gardu Induk 150 kV, khususnya sebagai sumber daya proteksi dan kontrol, bukan pada stabilisasi jaringan atau integrasi BESS dengan pembangkit.
2. Ihsan, Joko, Suprianto, dan Wrahatnolo (2022) dalam penelitian berjudul “*Analisis dan Efisiensi Kebutuhan Kapasitas Baterai 110 Volt DC Gas Insulated Switchgear (GIS) 150 kV Wonokromo Surabaya*” membahas evaluasi kapasitas baterai 110 VDC yang digunakan sebagai sumber utama sistem kontrol, proteksi, dan operasi peralatan GIS pada Gardu Induk 150 kV. Penelitian ini menganalisis kecukupan kapasitas baterai terhadap kebutuhan beban DC, efisiensi penyediaan energi cadangan, serta dampaknya terhadap keandalan operasi GIS. Penelitian tersebut menjadi rujukan penting karena

membahas langsung sistem baterai di gardu induk tegangan tinggi, termasuk metode perhitungan kapasitas, kebutuhan beban, dan analisis efisiensi, yang relevan dengan ruang lingkup penelitian saya. Perbedaannya dengan penelitian saya adalah penelitian tersebut berfokus pada analisis efisiensi dan kecukupan kapasitas baterai pada GIS di Gardu Induk Wonokromo, sedangkan penelitian saya lebih menekankan pada analisis kelayakan, kondisi aktual, dan performa baterai sistem DC pada Gardu Induk 150 kV secara keseluruhan sebagai sumber daya proteksi, kontrol, dan keandalan sistem, bukan hanya pada efisiensi kapasitas.

3. Manalu (2021) dalam laporan kerja praktik berjudul “*Perawatan Baterai pada Gardu Induk Namorambe*” membahas prosedur pemeliharaan baterai sistem DC yang menjadi sumber utama catu daya kontrol, proteksi, dan operasi peralatan di gardu induk. Penelitian ini menguraikan aktivitas perawatan rutin seperti pengecekan tegangan sel, pemeriksaan konektor, pengukuran elektrolit, equalizing charge, hingga identifikasi kerusakan umum yang terjadi pada sistem baterai di lapangan. Laporan ini menjadi referensi penting karena memberikan gambaran nyata mengenai kondisi lapangan, pola perawatan, serta permasalahan yang umum terjadi pada baterai di gardu induk — aspek yang sangat relevan untuk memahami kesiapan dan keandalan baterai sebagai sumber daya kritis. Perbedaannya dengan penelitian saya adalah penelitian tersebut hanya fokus pada kegiatan perawatan dan prosedur pemeliharaan baterai, sedangkan penelitian saya menitikberatkan pada analisis kelayakan, kinerja teknis, dan penilaian kondisi baterai 110 VDC di Gardu Induk 150 kV sebagai bagian dari sistem proteksi dan operasi, bukan pada aktivitas pemeliharaan rutin saja.
4. Gunawan dan Salsabila (2025) dalam penelitiannya berjudul “*Optimalisasi Pemeliharaan Sistem Baterai 110 VDC di Gardu Induk Cilegon Lama*” membahas strategi peningkatan efektivitas pemeliharaan baterai sistem DC sebagai sumber utama catu daya kontrol dan proteksi pada gardu induk. Penelitian ini meninjau kondisi baterai melalui pemeriksaan tegangan sel, arus pengisian, kondisi fisik, serta pola kerusakan yang sering terjadi, kemudian mengevaluasi metode pemeliharaan untuk meningkatkan umur pakai dan keandalannya. Studi ini menjadi referensi penting

karena memberikan gambaran mengenai faktor-faktor yang memengaruhi performa baterai di lingkungan gardu induk serta langkah-langkah teknis untuk meminimalkan kegagalan sistem DC. Perbedaannya dengan penelitian saya adalah bahwa penelitian tersebut berfokus pada optimalisasi pemeliharaan dan pengelolaan sistem baterai 110 VDC, sedangkan penelitian saya menitikberatkan pada analisis kelayakan, performa aktual, serta evaluasi kondisi baterai 110 VDC sebagai sumber daya proteksi dan kontrol pada Gardu Induk 150 kV, sehingga cakupan penelitian saya lebih mengarah pada penilaian kinerja dan kesesuaian kapasitas baterai, bukan hanya strategi pemeliharaan.

2.3 Kerangka Pemikiran

Adapun kerangka pemikiran dari penelitian ini yaitu ::



Gambar 2. 5 Kerangka Pemikiran

Alur penelitian ini disusun untuk menggambarkan tahapan sistematis yang dilakukan dalam menganalisis kelayakan dan kinerja baterai 110 VDC pada Gardu Induk 150 kV. Penelitian diawali dengan pengkajian latar belakang untuk memahami pentingnya peran baterai sebagai sumber utama sistem kontrol, proteksi, dan operasi peralatan gardu induk. Tahap berikutnya adalah mengidentifikasi permasalahan yang ditemukan pada sistem baterai, seperti penurunan kapasitas, ketidaksesuaian tegangan sel, atau ketidakstabilan suplai DC.

Setelah permasalahan diidentifikasi, peneliti melakukan analisis awal untuk menentukan ruang lingkup dan parameter teknis yang akan diteliti. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data lapangan berupa pengukuran tegangan sel, arus pengisian, kapasitas efektif, kondisi fisik baterai, beban DC, serta data pemeliharaan. Data tersebut dianalisis untuk mengetahui kondisi aktual baterai terhadap standar pabrikan maupun ketentuan PLN. Hasil analisis kemudian dijadikan dasar dalam menarik kesimpulan dan merumuskan rekomendasi perbaikan sistem baterai agar keandalan sistem DC gardu induk tetap terjaga.