

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Gardu Induk

Gardu induk merupakan salah satu komponen penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai titik penghubung antara pembangkit, sistem transmisi, dan sistem distribusi. Gardu induk memiliki peranan strategis dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit menuju konsumen dengan tingkat keandalan dan kualitas daya yang sesuai standar. Dalam sistem tenaga listrik modern, gardu induk tidak hanya berfungsi sebagai tempat penyaluran daya, tetapi juga sebagai pusat pengaturan, pengendalian, serta proteksi sistem kelistrikan.

Keberadaan gardu induk sangat diperlukan karena sistem tenaga listrik terdiri dari jaringan yang luas dan kompleks, sehingga dibutuhkan fasilitas yang mampu mengatur tegangan, memutus dan menghubungkan jaringan, serta melindungi peralatan dari gangguan. Gardu induk menjadi bagian vital yang memastikan energi listrik dapat disalurkan secara aman, efisien, dan berkesinambungan.

2.1.1.1 Pengertian Gardu Induk

Gardu induk dapat didefinisikan sebagai instalasi tenaga listrik yang berfungsi untuk menerima, menyalurkan, dan mendistribusikan energi listrik pada tingkat tegangan tertentu. Gardu induk umumnya dilengkapi dengan berbagai peralatan utama seperti transformator daya, pemutus tenaga, sistem busbar, isolator, serta sistem proteksi dan kontrol.

Secara umum, gardu induk berperan sebagai tempat perubahan tingkat tegangan listrik, misalnya dari tegangan tinggi (150 kV atau 500 kV) menjadi tegangan menengah (20 kV) atau sebaliknya. Proses perubahan tegangan ini bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya pada transmisi jarak jauh serta menyesuaikan kebutuhan sistem distribusi ke pelanggan.

Selain fungsi transformasi tegangan, gardu induk juga berfungsi sebagai pusat pengamanan sistem melalui koordinasi peralatan proteksi, sehingga apabila terjadi gangguan seperti hubung singkat atau beban lebih, bagian sistem yang terganggu dapat segera dipisahkan untuk mencegah kerusakan yang lebih luas.

2.1.1.2 Fungsi Gardu Induk dalam Sistem Tenaga Listrik

Gardu induk memiliki berbagai fungsi utama yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Fungsi tersebut meliputi:

1. Transformasi Tegangan

Salah satu fungsi utama gardu induk adalah menaikkan atau menurunkan tegangan listrik sesuai kebutuhan sistem. Tegangan dinaikkan pada sisi pembangkit untuk transmisi jarak jauh, sedangkan tegangan diturunkan pada sisi distribusi agar dapat digunakan oleh pelanggan.

2. Pengaturan dan Penyaluran Daya

Gardu induk berfungsi sebagai titik penghubung jaringan transmisi dan distribusi. Dengan adanya gardu induk, aliran daya dapat diatur dan disalurkan melalui beberapa jalur sesuai kondisi sistem.

3. Proteksi dan Pengamanan Sistem

Gardu induk dilengkapi dengan sistem proteksi seperti rele proteksi, *circuit breaker*, serta sistem pengamanan lainnya. Fungsi proteksi ini bertujuan untuk mendeteksi gangguan dan memutus bagian sistem yang terganggu dengan cepat.

4. Pengendalian dan *Monitoring* Sistem

Dalam gardu induk modern, terdapat sistem kontrol dan *monitoring* berbasis otomasi seperti SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Sistem ini memungkinkan operator memantau kondisi jaringan serta melakukan pengendalian jarak jauh.

5. Menjaga Keandalan dan Kontinuitas Penyaluran Listrik

Dengan fungsi transformasi, proteksi, serta pengaturan aliran daya, gardu induk menjadi komponen utama dalam menjaga kontinuitas suplai energi listrik kepada pelanggan.

2.1.1.3 Fungsi Gardu Induk dalam Sistem Tenaga Listrik

Gardu induk dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa kategori, antara lain:

1. Berdasarkan Tegangan Operasi
 - a. Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (500 kV)
 - b. Gardu Induk Tegangan Tinggi (150 kV atau 275 kV)
 - c. Gardu Induk Tegangan Menengah (20 kV)
2. Berdasarkan Lokasi dan Konstruksi
 - a. Gardu Induk Konvensional (AIS – *Air Insulated Substation*)
 - b. Gardu Induk Gas (GIS – *Gas Insulated Substation*)
3. Berdasarkan Fungsi Sistem
 - a. Gardu Induk *Step-Up* (dekat pembangkit)
 - b. Gardu Induk *Step-Down* (dekat pusat beban)
 - c. Gardu Induk *Switching* (penghubung jaringan tanpa transformator)

2.1.1.4 Material Transmisi Utama Gardu Induk

Material atau peralatan transmisi utama di gardu induk adalah komponen yang berperan langsung dalam penyaluran, pengamanan, dan pengendalian energi listrik bertegangan tinggi. Peralatan utama tersebut antara lain sebagai berikut:

1. Transformator Daya

Transformator daya merupakan peralatan utama di gardu induk yang berfungsi untuk mengubah tingkat tegangan listrik, baik menaikkan maupun menurunkan tegangan, dengan frekuensi tetap. Transformator harus dirancang mampu menahan beban tinggi serta gangguan listrik seperti hubung singkat. Transformator daya terdiri dari:

- a. Inti besi
- b. Kumputan primer dan sekunder
- c. Minyak isolasi atau isolasi kering

2. *Circuit Breaker* (Pemutus Tenaga)

Pemutus tenaga adalah peralatan yang berfungsi untuk memutus dan menghubungkan arus listrik, baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan. *Circuit breaker* berperan penting dalam menjaga keamanan peralatan dan kontinuitas sistem. Jenis pemutus tenaga berdasarkan media pemadam busur api:

- a. Pemutus tenaga minyak
- b. Pemutus tenaga udara
- c. Pemutus tenaga gas SF₆
- d. Pemutus tenaga vakum

3. *Disconnecting Switch* (Pemisah)

Pemisah berfungsi untuk memisahkan bagian sistem secara fisik dalam kondisi tanpa beban. Peralatan ini digunakan untuk keperluan pemeliharaan dan pengamanan personel. Sakelar pemisah tidak dirancang untuk memutus arus beban atau arus gangguan.

4. Busbar

Busbar adalah penghantar utama di gardu induk yang berfungsi sebagai pengumpul dan pembagi energi listrik ke berbagai penyulang. Busbar umumnya terbuat dari tembaga atau aluminium dan dirancang untuk mampu mengalirkan arus besar.

5. Transformator Instrumen (CT dan PT)

Transformator instrumen digunakan untuk keperluan pengukuran dan proteksi, yang terdiri dari:

- a. *Current Transformer* (CT) yang berfungsi untuk menurunkan arus.
- b. *Potential Transformer* (PT) yang berfungsi untuk menurunkan tegangan

2.1.1.5 Sistem Pendukung di Gardu Induk

Selain peralatan utama seperti transformator daya, pemutus tenaga, dan busbar, gardu induk juga dilengkapi dengan berbagai sistem pendukung. Sistem pendukung ini berfungsi untuk memastikan seluruh peralatan utama dapat bekerja secara optimal, aman, dan andal. Walaupun tidak secara langsung menyalurkan energi listrik ke jaringan, sistem pendukung memiliki peranan vital dalam operasional gardu induk, terutama dalam kondisi normal maupun darurat.

Sistem pendukung di gardu induk mencakup sistem proteksi dan kontrol, sistem telekomunikasi, sistem catu daya AC dan DC, sistem penerangan, sistem keselamatan, serta fasilitas pendukung lainnya. Berikut merupakan penjelasan masing-masing sistem pendukung tersebut:

1. Sistem Proteksi dan Kontrol

Sistem proteksi dan kontrol merupakan sistem pendukung utama yang berfungsi untuk mengamankan peralatan gardu induk dari gangguan serta mengendalikan operasi sistem tenaga listrik. Sistem proteksi bekerja dengan cara mendeteksi adanya kondisi abnormal seperti hubung singkat, gangguan tanah, beban lebih, maupun tegangan tidak normal. Jika gangguan terdeteksi, rele proteksi akan memberikan perintah *trip* kepada *circuit breaker* untuk memutus bagian sistem yang terganggu sehingga kerusakan tidak meluas. Sementara itu, sistem kontrol berfungsi untuk mengatur pengoperasian peralatan seperti pemutus tenaga, *disconnecting switch*, dan transformator. Sistem kontrol memungkinkan operator melakukan *manuver* jaringan baik secara lokal maupun jarak jauh. Sistem proteksi dan kontrol sangat bergantung pada suplai DC dari baterai gardu induk karena harus tetap bekerja meskipun suplai AC padam.

2. Sistem Telekomunikasi dan SCADA

Sistem telekomunikasi merupakan sistem pendukung yang berfungsi untuk menyediakan jalur komunikasi antara gardu induk dengan pusat pengatur beban atau *control center*. Dalam sistem tenaga listrik modern, gardu induk biasanya terintegrasi

dengan SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Sistem SCADA memungkinkan operator memantau kondisi peralatan, tegangan, arus, serta status pemutus tenaga secara *real-time*. Melalui SCADA, operator dapat melakukan pengendalian jarak jauh untuk meningkatkan efisiensi operasi dan mempercepat respon terhadap gangguan. Keandalan sistem telekomunikasi dan SCADA sangat penting karena jika komunikasi terputus, pengawasan sistem menjadi terbatas. Sistem ini juga membutuhkan suplai DC yang stabil agar tetap aktif dalam kondisi darurat.

3. Sistem Catu Daya AC (*Auxiliary AC Supply*)

Sistem catu daya AC di gardu induk merupakan sistem pendukung yang menyediakan suplai listrik arus bolak-balik untuk kebutuhan peralatan bantu. Peralatan yang menggunakan suplai AC antara lain:

- a. Motor penggerak pendingin transformator
- b. Sistem ventilasi dan AC ruangan
- c. Penerangan gardu induk
- d. Pompa pemadam kebakaran
- e. Stop kontak peralatan pemeliharaan

Sistem AC *auxiliary* biasanya diperoleh dari trafo pemakaian sendiri (*station service transformer*) yang mengambil daya dari jaringan utama. Keandalan suplai AC sangat penting karena mendukung operasi fasilitas bantu, namun apabila suplai AC gagal maka sistem DC harus mengambil alih peran kritis.

4. Sistem Catu Daya DC (Sistem DC 48 V / 110 V)

Sistem catu daya DC merupakan sistem pendukung yang menyediakan suplai arus searah untuk peralatan vital gardu induk, terutama peralatan proteksi dan kontrol.

Sistem DC biasanya terdiri dari:

- a. Baterai *stasioner* (48 VDC / 110 VDC)
- b. Battery charger
- c. Panel distribusi DC
- d. Beban proteksi dan kontrol

Sistem DC dirancang agar tetap dapat menyuplai beban penting ketika sumber AC hilang. Oleh sebab itu, sistem DC merupakan elemen utama yang menjamin keandalan operasi gardu induk dalam kondisi darurat. Baterai DC berfungsi sebagai cadangan energi utama yang memastikan *circuit breaker* tetap dapat melakukan operasi *trip/close* saat terjadi gangguan.

5. Sistem Penerangan Gardu Induk

Sistem penerangan merupakan sistem pendukung yang berfungsi untuk menyediakan pencahayaan di area gardu induk, baik di switchyard maupun di ruang kontrol. Penerangan diperlukan untuk mendukung kegiatan operasi dan pemeliharaan, terutama pada malam hari atau kondisi darurat.

Penerangan gardu induk biasanya dibagi menjadi:

- a. Penerangan normal (suplai AC)
- b. Penerangan darurat (suplai DC atau UPS)

Lampu darurat sangat penting agar operator tetap dapat bekerja ketika terjadi pemadaman.

6. Sistem Pentanahan (*Grounding System*)

Sistem pentanahan adalah sistem pendukung yang berfungsi untuk mengamankan gardu induk dari bahaya tegangan sentuh dan tegangan langkah, serta menyalurkan arus gangguan ke tanah.

Pentanahan diperlukan untuk:

- a. Mengurangi risiko sengatan listrik
- b. Melindungi peralatan dari tegangan lebih
- c. Menstabilkan referensi tegangan sistem

Sistem grounding yang baik meningkatkan keselamatan personel dan keandalan operasi gardu induk.

7. Sistem Proteksi Petir dan Tegangan Lebih

Gardu induk rentan terhadap gangguan petir dan tegangan lebih akibat *switching* maupun sambaran langsung. Untuk mengatasi hal tersebut digunakan peralatan seperti *lightning arrester* yang berfungsi menyalurkan tegangan lebih ke tanah

sehingga peralatan utama tidak mengalami kerusakan. Sistem ini mendukung keandalan gardu induk karena mencegah gangguan besar akibat *overvoltage*.

8. Sistem Pemadam Kebakaran

Sistem pemadam kebakaran merupakan sistem keselamatan yang sangat penting di gardu induk karena peralatan seperti transformator daya menggunakan minyak isolasi yang mudah terbakar.

Sistem pemadam kebakaran dapat berupa:

- a. *Fire alarm system*
- b. *Hydrant* dan *sprinkler*
- c. Sistem pemadam otomatis (foam atau gas)

Tujuannya adalah mencegah kebakaran meluas dan melindungi aset serta personel.

9. Sistem Ventilasi dan Pengkondisian Ruangan

Sistem ventilasi dan AC ruangan berfungsi menjaga suhu dan kelembaban ruang kontrol, ruang panel, dan ruang baterai.

Hal ini penting karena:

- a. Peralatan kontrol sensitif terhadap suhu tinggi
- b. Baterai lebih cepat rusak jika temperatur tidak terkontrol

Dengan demikian, sistem ventilasi mendukung umur pakai dan keandalan peralatan gardu induk.

2.1.2 Pengertian Sistem DC

Sistem tenaga listrik merupakan infrastruktur penting yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkitan menuju konsumen melalui jaringan transmisi dan distribusi. Dalam operasionalnya, gardu induk memiliki peranan strategis sebagai titik penghubung, pengatur, serta pengendali aliran daya listrik. Gardu induk tidak hanya terdiri dari peralatan utama seperti transformator daya, pemutus tenaga (*circuit breaker*), dan peralatan proteksi, tetapi juga memerlukan sistem pendukung agar seluruh

peralatan dapat bekerja dengan andal. Salah satu sistem pendukung yang sangat vital dalam gardu induk adalah sistem catu daya arus searah atau sistem DC (*Direct Current*).

Sistem DC gardu induk adalah suatu sistem penyediaan energi listrik arus searah yang digunakan sebagai sumber daya utama untuk mendukung pengoperasian peralatan kontrol, proteksi, komunikasi, dan peralatan bantu lainnya di gardu induk. Sistem ini dirancang agar mampu memasok energi listrik secara kontinu dan stabil, terutama pada kondisi darurat ketika sumber arus bolak-balik (AC) mengalami gangguan atau padam. Dengan demikian, keberadaan sistem DC menjadi komponen yang sangat penting dalam menjaga keandalan operasi gardu induk.

Pada umumnya, sistem DC di gardu induk menggunakan tegangan standar seperti 48 VDC atau 110 VDC, tergantung pada desain sistem dan kebutuhan peralatan yang dilayani. Tegangan DC tersebut disuplai dari baterai yang terhubung dengan *battery charger* (pengisi baterai). *Battery charger* berfungsi untuk mengubah tegangan AC menjadi DC serta menjaga baterai tetap dalam kondisi siap pakai dengan metode pengisian tertentu seperti *float charging* atau *boost charging*. Dalam kondisi normal, beban DC akan dipasok oleh *charger*, sementara baterai berada dalam kondisi *standby*. Namun apabila terjadi gangguan pada suplai AC, baterai akan secara otomatis mengambil alih peran sebagai sumber utama sehingga sistem kontrol dan proteksi tetap dapat berfungsi.

Sistem DC gardu induk memiliki peran yang sangat krusial karena berkaitan langsung dengan aspek keselamatan dan keandalan sistem tenaga listrik. Peralatan proteksi seperti rele proteksi membutuhkan suplai DC untuk dapat mendeteksi gangguan dan memberikan perintah trip kepada pemutus tenaga. Selain itu, pemutus tenaga modern yang menggunakan mekanisme operasi listrik juga memerlukan sumber DC untuk membuka atau menutup rangkaian. Tanpa adanya sistem DC yang handal, pemutus tenaga mungkin tidak dapat bekerja pada saat kondisi gangguan, sehingga dapat menyebabkan gangguan meluas dan berpotensi menimbulkan kerusakan peralatan.

Selain untuk fungsi proteksi dan *switching*, sistem DC juga digunakan untuk memasok kebutuhan sistem kontrol seperti *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), sistem telekomunikasi gardu induk, alarm, indikator panel, penerangan darurat,

serta sistem *monitoring* peralatan. Dengan kata lain, sistem DC merupakan sumber energi cadangan yang mendukung operasi gardu induk secara keseluruhan.

Secara umum, sistem DC gardu induk terdiri dari beberapa komponen utama yaitu baterai, *battery charger*, panel distribusi DC, sistem pengaman seperti MCB atau fuse, serta rangkaian *monitoring* dan alarm. Baterai yang digunakan biasanya merupakan baterai timbal-asam (*lead acid*) atau baterai nikel-kadmium (Ni-Cd) yang dirancang khusus untuk aplikasi *stasioner*. Pemilihan jenis baterai dipengaruhi oleh faktor keandalan, umur pakai, karakteristik pengisian, serta kondisi lingkungan operasi.

Keandalan sistem DC sangat bergantung pada kondisi baterai sebagai sumber utama cadangan. Oleh karena itu, diperlukan pemeliharaan rutin serta pengujian kapasitas baterai secara berkala untuk memastikan baterai masih mampu menyuplai beban sesuai desain waktu backup yang ditentukan. Pengujian kapasitas baterai bertujuan untuk mengetahui kemampuan aktual baterai dalam menyimpan energi dan mendeteksi penurunan performa akibat proses penuaan, sulfasi, atau kerusakan sel.

Dalam standar operasional gardu induk, sistem DC harus memenuhi persyaratan tertentu seperti kestabilan tegangan, kemampuan menyuplai beban dalam durasi tertentu, serta memiliki sistem proteksi yang memadai untuk mencegah gangguan internal. Sistem DC juga harus dilengkapi dengan sistem alarm yang dapat memberikan peringatan apabila terjadi tegangan rendah, kegagalan *charger*, atau kondisi abnormal pada baterai.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sistem DC gardu induk merupakan bagian yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi sebagai sumber daya utama untuk peralatan kontrol dan proteksi serta sebagai cadangan ketika suplai AC mengalami gangguan. Keandalan sistem DC secara langsung mempengaruhi keberlangsungan operasi gardu induk dan keamanan penyaluran energi listrik. Oleh sebab itu, pemeliharaan dan pengujian kapasitas baterai sebagai bagian utama sistem DC perlu dilakukan secara berkala untuk memastikan sistem selalu berada dalam kondisi optimal.

2.1.3 Tegangan Sistem DC Gardu Induk

Tegangan sistem DC yang umum digunakan di gardu induk adalah 48 VDC dan 110 VDC. Untuk gardu induk transmisi dan subtransmisi, sistem 110 VDC atau 220 VDC lebih banyak digunakan karena mampu menyuplai beban proteksi dan kontrol yang lebih besar.

Pada sistem DC 110 V, tegangan operasi tidak selalu berada tepat pada nilai nominal, melainkan berada dalam rentang tertentu. Umumnya, rentang tegangan operasi sistem DC 110 V berada antara 99 V hingga 121 V, tergantung pada kondisi baterai dan mode operasi *charger*.

2.1.4 Fungsi Sistem DC di Gardu Induk

Sistem catu daya arus searah (*Direct Current/DC*) merupakan salah satu sistem pendukung yang sangat penting dalam operasional gardu induk. Sistem DC tidak hanya berfungsi sebagai sumber daya cadangan, tetapi juga menjadi sumber utama bagi berbagai peralatan kontrol, proteksi, dan komunikasi. Keberadaan sistem DC yang andal akan menjamin kontinuitas operasi gardu induk, terutama ketika terjadi gangguan pada suplai arus bolak-balik (AC). Berikut ini merupakan fungsi utama sistem DC di gardu induk:

1. Menyediakan Catu Daya untuk Sistem Proteksi.

Fungsi utama sistem DC di gardu induk adalah sebagai sumber daya bagi peralatan proteksi, khususnya rele proteksi. Rele proteksi membutuhkan suplai tegangan DC agar dapat bekerja secara kontinu dalam mendeteksi gangguan seperti hubung singkat, gangguan tanah, atau beban lebih. Ketika terjadi gangguan pada sistem tenaga, rele proteksi harus segera memberikan sinyal perintah kepada pemutus tenaga (*circuit breaker*) untuk melakukan pemutusan rangkaian. Proses ini sangat bergantung pada keberadaan sumber DC yang stabil. Apabila sistem DC gagal beroperasi, maka rele proteksi tidak dapat bekerja optimal sehingga gangguan dapat meluas dan menyebabkan kerusakan peralatan yang lebih besar.

2. Mengoperasikan Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker*).

Sistem DC berfungsi sebagai sumber energi untuk mekanisme operasi pemutus tenaga, baik untuk perintah membuka (*trip*) maupun menutup (*close*). Pada kondisi

normal, *circuit breaker* harus dapat beroperasi kapan saja sesuai kebutuhan sistem, terutama saat kondisi gangguan. Karena proses *trip* harus berlangsung cepat dan tepat, maka diperlukan suplai DC yang selalu tersedia. Dengan adanya baterai pada sistem DC, pemutus tenaga tetap dapat dioperasikan meskipun suplai AC utama mengalami pemadaman. Hal ini menjadikan sistem DC sebagai komponen yang sangat penting dalam menjaga keandalan sistem *switching* di gardu induk.

3. Menjamin Keberlangsungan Sistem Kontrol dan *Monitoring*.

Fungsi berikutnya dari sistem DC adalah mendukung sistem kontrol dan *monitoring* gardu induk. Sistem kontrol meliputi panel kontrol lokal, sistem otomasi gardu induk, serta perangkat *monitoring* kondisi peralatan. Sistem DC memastikan bahwa perangkat-perangkat tersebut tetap dapat bekerja untuk memantau kondisi tegangan, arus, frekuensi, serta status peralatan *switching*. Dengan demikian, operator tetap dapat melakukan pengawasan dan pengendalian sistem meskipun terjadi gangguan pada sumber daya AC.

4. Menyuplai Sistem SCADA dan Telekomunikasi Gardu Induk

Pada gardu induk modern, sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) menjadi bagian yang sangat penting untuk pengawasan jarak jauh. SCADA membutuhkan suplai energi yang stabil agar dapat mengirimkan data operasi gardu induk secara *real-time* ke pusat pengendalian. Selain itu, sistem komunikasi seperti teleproteksi, *radio link*, atau *fiber optic equipment* juga menggunakan suplai DC. Apabila sistem DC mengalami kegagalan, maka komunikasi antara gardu induk dan pusat kontrol dapat terputus sehingga menyulitkan koordinasi penanganan gangguan.

5. Menyediakan Sumber Daya Cadangan Saat Suplai AC Padam

Sistem DC juga memiliki fungsi sebagai sumber daya cadangan utama di gardu induk. Dalam kondisi normal, suplai AC digunakan untuk memasok beban-beban bantu melalui *battery charger*. Namun ketika terjadi pemadaman AC, baterai akan langsung mengambil alih suplai energi. Kemampuan sistem DC dalam menyediakan *backup power* sangat krusial karena pada saat gangguan besar, sistem proteksi dan kontrol tetap harus berfungsi untuk mencegah terjadinya gangguan lanjutan. Oleh karena itu,

sistem DC sering disebut sebagai jantung operasional gardu induk pada kondisi darurat.

6. Mendukung Sistem Alarm dan Indikasi

Sistem DC berfungsi untuk memasok sistem alarm dan indikasi di panel gardu induk. Alarm digunakan untuk memberikan informasi kepada operator apabila terjadi kondisi abnormal seperti:

- a. Tegangan baterai rendah
- b. *Charger* gagal beroperasi
- c. Gangguan isolasi sistem DC
- d. Pemutus tenaga *trip*
- e. *Overload* pada sistem DC

Dengan adanya sistem alarm berbasis DC, operator dapat segera mengambil tindakan korektif sebelum gangguan berkembang menjadi lebih serius.

7. Menyediakan Energi untuk Penerangan Darurat

Dalam beberapa gardu induk, sistem DC juga dimanfaatkan untuk penerangan darurat (*emergency lighting*). Penerangan ini diperlukan untuk mendukung keselamatan personel ketika terjadi pemadaman listrik total, terutama pada malam hari atau kondisi darurat. Walaupun beban penerangan tidak sebesar beban proteksi, fungsi ini tetap penting dalam mendukung aspek keselamatan kerja dan operasional gardu induk.

8. Menjamin Keandalan Operasi Sistem Tenaga Listrik Secara Keseluruhan

Secara keseluruhan, sistem DC memiliki peran penting dalam menjaga keandalan sistem tenaga listrik. Keberhasilan sistem proteksi dalam mengamankan jaringan transmisi dan distribusi sangat bergantung pada ketersediaan suplai DC. Oleh karena itu, sistem DC harus dirancang dengan tingkat keandalan tinggi, dilengkapi dengan baterai yang memiliki kapasitas sesuai kebutuhan, serta dilakukan pemeliharaan dan pengujian kapasitas secara berkala.

2.1.3 Komponen Utama Sistem DC

Sistem DC 110 V di gardu induk merupakan sistem catu daya arus searah yang berfungsi untuk menyuplai kebutuhan peralatan proteksi, kontrol, komunikasi, serta peralatan bantu lainnya. Sistem ini harus dirancang dengan tingkat keandalan yang tinggi karena berperan penting dalam menjamin operasional gardu induk tetap berjalan meskipun terjadi gangguan pada sumber daya AC.

Secara umum, sistem DC 110 V terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terintegrasi untuk menghasilkan suplai tegangan DC yang stabil dan kontinu. Berikut merupakan komponen-komponen utama dalam sistem DC 110 V di gardu induk:

1. *Rectifier/Charger*

Rectifier atau *charger* berfungsi mengubah tegangan AC dari jaringan listrik utama menjadi tegangan DC yang sesuai dengan kebutuhan sistem (misal 48 VDC atau 110 VDC) dan sekaligus mengisi baterai. *Rectifier* pada umumnya terdiri dari *bridge diode* atau *thyristor controlled rectifier* yang mampu mengatur arus pengisian sehingga baterai tidak mengalami *overcharge* atau *undercharge*. Selain itu, *rectifier* modern dilengkapi regulator tegangan dan arus untuk menjaga stabilitas output dan memperpanjang umur baterai. Dengan *rectifier* yang andal, sistem DC dapat terus menerima suplai daya walaupun beban fluktuatif atau terjadi gangguan sementara pada jaringan AC.

Battery charger pada sistem gardu induk umumnya memiliki dua mode operasi, yaitu:

- a. *Float Charge*, yaitu mode pengisian pemeliharaan untuk menjaga baterai tetap penuh tanpa *overcharging*.
- b. *Boost Charge*, yaitu mode pengisian cepat setelah baterai mengalami *discharge*. Dalam kondisi normal, *charger* akan menyuplai beban DC sekaligus mengisi baterai. Apabila suplai AC hilang, baterai akan langsung mengambil alih suplai beban.

2. Baterai

Baterai merupakan sumber energi utama cadangan dalam sistem DC. Energi kimia

yang tersimpan di dalam sel baterai diubah menjadi energi listrik saat suplai AC terputus. Jenis baterai yang umum digunakan di gardu induk adalah *Lead Acid Battery* (FLA dan VRLA) dan *Nickel-Cadmium* (Ni-Cd), karena memiliki umur panjang dan stabilitas tegangan yang baik. Baterai disusun secara seri-paralel untuk mencapai tegangan dan kapasitas yang diperlukan, misalnya 110 VDC dengan beberapa sel 1,2 V dihubungkan seri. Keandalan baterai sangat mempengaruhi kontinuitas operasi sistem proteksi dan kontrol.

3. *DC Distribution Panel* (DCP)

DCP berfungsi menyalurkan daya DC dari baterai atau rectifier ke berbagai beban kritis seperti rele proteksi, *circuit breaker*, alarm, dan sistem SCADA. DCP dilengkapi beberapa busbar, MCB, dan fuse untuk membagi daya ke cabang yang berbeda. Selain itu, DCP juga mempermudah isolasi beban tertentu saat pemeliharaan tanpa memutus suplai ke beban lainnya. Panel distribusi yang dirancang baik dapat mencegah jatuh tegangan dan memastikan semua peralatan menerima suplai DC sesuai kebutuhan.

Panel distribusi DC biasanya dilengkapi dengan:

- a. Busbar positif dan negative
- b. MCB atau fuse untuk masing-masing feeder
- c. Terminal distribusi

Dengan adanya panel distribusi, pembagian beban DC dapat dilakukan secara teratur dan aman.

4. Busbar DC

Busbar DC merupakan penghantar utama dalam sistem DC yang berfungsi sebagai jalur distribusi tegangan 110 VDC. Busbar ini menghubungkan *output charger* dan baterai ke panel distribusi serta beban-beban DC.

Pada umumnya, sistem DC memiliki dua jalur busbar:

- a. Busbar Positif (+)
- b. Busbar Negatif (-)

Busbar harus dirancang dengan kapasitas arus yang memadai agar mampu menyalurkan daya tanpa mengalami pemanasan berlebih.

5. Fuse / MCB DC

Fuse dan *Mini Circuit Breaker* (MCB) berfungsi sebagai pengaman rangkaian dari arus lebih (*overcurrent*) dan hubung singkat (*short-circuit*). Fuse bekerja dengan meleleh saat arus melebihi nilai nominal, sedangkan MCB dapat otomatis memutuskan aliran arus dan dapat di-reset setelah gangguan dihilangkan. Penggunaan fuse dan MCB yang tepat sangat penting untuk melindungi baterai, DCP, dan peralatan beban dari kerusakan akibat arus abnormal.

6. DC Load

Beban DC adalah seluruh peralatan gardu induk yang membutuhkan suplai 110 VDC. Beban DC dapat dibagi menjadi beberapa kelompok utama, antara lain:

- a. Sistem proteksi (rele proteksi)
- b. Sistem kontrol *circuit breaker*
- c. Sistem SCADA dan telekomunikasi
- d. Alarm dan indikasi
- e. Motor operasi *disconnecting switch* tertentu

Keandalan sistem DC sangat bergantung pada kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan beban ini dalam kondisi normal maupun darurat.

7. Monitoring System

Sistem *monitoring* berperan untuk memantau kondisi baterai dan distribusi DC secara *real-time*, meliputi tegangan, arus, suhu, dan kapasitas baterai. Beberapa *monitoring system* modern menggunakan sensor digital dan modul komunikasi untuk menampilkan data di panel kontrol atau SCADA, serta memberikan alarm saat terjadi kondisi abnormal seperti tegangan rendah, arus bocor, atau sel baterai rusak. Dengan *monitoring* yang efektif, pemeliharaan dapat dilakukan secara proaktif sehingga meningkatkan keandalan sistem DC dan mencegah gangguan secara tiba-tiba pada operasi gardu induk .

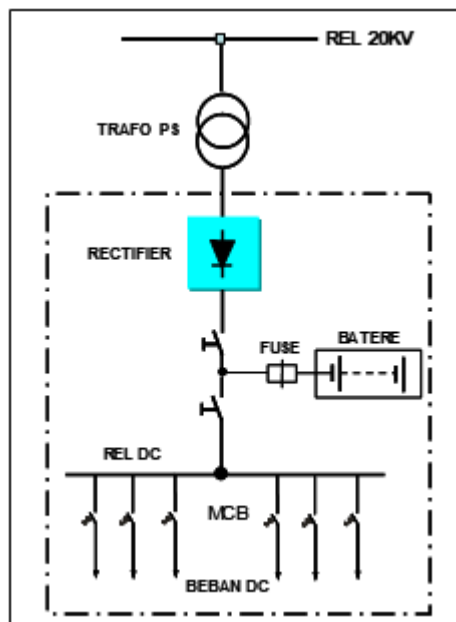
8. *Grounding* dan Sistem Deteksi Gangguan Tanah

Pada sistem DC gardu induk, salah satu aspek penting adalah deteksi gangguan tanah (*ground fault*). Sistem DC umumnya tidak langsung di-*grounding* (*floating system*), sehingga jika terjadi kebocoran isolasi yang dapat menimbulkan gangguan serius.

Earth fault detector berfungsi untuk mendeteksi adanya kebocoran arus ke tanah pada jalur positif maupun negatif. Dengan deteksi dini, operator dapat segera melakukan tindakan korektif sebelum terjadi gangguan besar.

9. Kabel dan Konektor Sistem DC

Komponen pendukung lainnya adalah kabel dan konektor yang digunakan untuk menghubungkan baterai, *charger*, panel distribusi, serta beban DC. Kabel sistem DC harus memiliki spesifikasi yang sesuai karena sistem ini harus mampu bekerja dalam kondisi darurat dan memiliki tingkat keandalan tinggi. Kualitas sambungan kabel sangat mempengaruhi performa sistem DC, sehingga inspeksi dan pemeliharaan rutin diperlukan untuk mencegah korosi atau longgar pada terminal.



Gambar 2.1. Diagram Instalasi Sistem DC

2.1.4 Baterai dalam Sistem DC

2.1.4.1 Pengertian Baterai

Baterai DC merupakan salah satu komponen yang sangat penting dalam sistem kelistrikan gardu induk. Secara umum, baterai DC di gardu induk adalah perangkat penyimpanan energi listrik yang berfungsi sebagai sumber catu daya arus searah (*Direct Current*) untuk mendukung pengoperasian peralatan kontrol, proteksi, serta sistem pendukung lainnya. Baterai ini memiliki peranan vital karena menjadi sumber energi cadangan utama ketika suplai listrik utama arus bolak-balik (AC) mengalami gangguan atau pemadaman.

Baterai DC gardu induk didefinisikan sebagai sumber energi listrik yang menyimpan energi dalam bentuk kimia dan mampu mengubahnya kembali menjadi energi listrik arus searah pada saat dibutuhkan. Sistem baterai ini biasanya dirancang sebagai baterai stasioner (*stationary battery*), yaitu baterai yang digunakan untuk aplikasi tetap dengan kemampuan menyediakan suplai daya dalam jangka waktu tertentu sesuai kebutuhan sistem. Baterai DC tidak digunakan untuk konsumsi daya utama secara terus-menerus, melainkan berfungsi sebagai cadangan yang selalu siap bekerja kapan saja ketika kondisi darurat terjadi.

Pada umumnya, baterai DC di gardu induk memiliki tegangan nominal standar seperti 48 VDC atau 110 VDC. Tegangan ini diperoleh dari rangkaian beberapa sel baterai yang disusun secara seri sehingga menghasilkan tegangan total sesuai kebutuhan sistem. Tegangan DC tersebut digunakan untuk memasok berbagai beban penting seperti rele proteksi, sistem kontrol pemutus tenaga, sistem alarm, indikasi panel, serta perangkat komunikasi dan SCADA. Keberadaan baterai menjadi sangat krusial karena pada saat terjadi gangguan sistem, peralatan proteksi harus tetap bekerja untuk mengamankan jaringan listrik dan mencegah gangguan meluas.

Selain berfungsi sebagai sumber cadangan, baterai DC gardu induk juga berperan dalam menjamin kontinuitas operasi gardu induk. Ketika suplai AC hilang, baterai akan langsung mengambil alih suplai daya tanpa jeda waktu, sehingga sistem kontrol dan proteksi tetap dapat beroperasi secara normal. Hal ini sangat penting karena pada kondisi gangguan

besar, pemutus tenaga harus tetap dapat melakukan operasi trip untuk memutus jaringan yang terganggu. Jika baterai tidak tersedia atau mengalami kegagalan, maka peralatan *switching* dan proteksi dapat kehilangan sumber daya, sehingga dapat menimbulkan risiko gangguan yang lebih luas dan membahayakan keandalan sistem tenaga listrik.

Baterai DC gardu induk umumnya terhubung dengan *battery charger* yang berfungsi untuk mengisi baterai serta menjaga tegangan sistem DC tetap stabil. Dalam kondisi normal, *battery charger* akan menyuplai beban DC sekaligus menjaga baterai dalam kondisi penuh melalui metode pengisian *float charge*. Dengan sistem ini, baterai selalu berada dalam kondisi siap pakai untuk digunakan sewaktu-waktu apabila diperlukan.

Karena baterai merupakan komponen vital dalam sistem DC gardu induk, maka diperlukan pemeliharaan rutin dan pengujian berkala untuk memastikan kapasitas dan performanya tetap optimal. Seiring waktu, baterai dapat mengalami penurunan kemampuan penyimpanan energi akibat proses penuaan, korosi, atau kerusakan internal sel. Oleh sebab itu, pengujian kapasitas baterai menjadi bagian penting dalam kegiatan pemeliharaan gardu induk agar sistem DC selalu andal.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa baterai DC gardu induk adalah perangkat penyimpan energi listrik arus searah yang berfungsi sebagai sumber catu daya cadangan utama untuk sistem proteksi, kontrol, dan komunikasi gardu induk. Keberadaannya sangat menentukan keandalan operasi gardu induk, terutama dalam kondisi darurat ketika suplai AC tidak tersedia. Oleh karena itu, baterai DC harus dirancang, dioperasikan, serta dipelihara dengan baik agar mampu mendukung kontinuitas dan keamanan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.



Gambar 2.2. Baterai

Jenis baterai yang umum digunakan di gardu induk adalah *Lead Acid Battery* (baterai timbal-asam) dan *Nickel-Cadmium* (Ni-Cd) karena kestabilannya jenis baterai tersebut.

2.1.4.2 Prinsip Kerja Baterai

Baterai merupakan perangkat elektrokimia yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia dan mengubahnya kembali menjadi energi listrik ketika dibutuhkan. Dalam sistem kelistrikan gardu induk, baterai DC memiliki peranan yang sangat penting karena menjadi sumber daya cadangan utama untuk peralatan proteksi, kontrol, komunikasi, serta sistem pendukung lainnya. Oleh karena itu, pemahaman mengenai prinsip kerja baterai menjadi bagian penting dalam kajian sistem DC gardu induk.

Secara umum, prinsip kerja baterai didasarkan pada reaksi kimia yang terjadi di dalam sel baterai. Setiap baterai terdiri dari beberapa sel yang masing-masing memiliki dua elektroda, yaitu elektroda positif (katoda) dan elektroda negatif (anoda), serta elektrolit sebagai media penghantar ion. Kombinasi antara elektroda dan elektrolit inilah yang memungkinkan terjadinya proses perubahan energi kimia menjadi energi listrik.

Pada saat baterai digunakan untuk menyuplai beban, baterai akan mengalami proses pengosongan atau *discharge*. Dalam kondisi *discharge*, reaksi kimia di dalam baterai menghasilkan aliran elektron dari elektroda negatif menuju elektroda positif melalui rangkaian luar. Aliran elektron tersebut membentuk arus listrik yang digunakan untuk memasok energi ke peralatan DC. Pada saat yang sama, ion-ion di dalam elektrolit bergerak untuk menjaga keseimbangan muatan listrik di dalam sel baterai. Proses ini berlangsung terus hingga kapasitas energi yang tersimpan dalam baterai berkurang atau mencapai batas tegangan minimum yang ditentukan.

Sebaliknya, ketika baterai diisi kembali, baterai mengalami proses pengisian atau *charge*. Proses *charge* terjadi ketika sumber listrik eksternal, seperti *battery charger*, memberikan arus listrik ke baterai dengan arah yang berlawanan dari proses *discharge*. Pada tahap ini, reaksi kimia di dalam baterai dipaksa kembali ke kondisi semula sehingga energi

listrik dari *charger* disimpan kembali dalam bentuk energi kimia. Dengan demikian, baterai dapat digunakan kembali untuk menyuplai beban pada saat diperlukan.

Dalam sistem DC gardu induk, baterai biasanya bekerja bersama dengan *battery charger* dalam kondisi operasi normal. Pada saat suplai AC tersedia, *battery charger* berfungsi untuk menyuplai beban DC sekaligus menjaga baterai dalam keadaan penuh melalui metode pengisian *float charging*. *Float charging* merupakan metode pengisian dengan memberikan tegangan konstan pada baterai agar kapasitasnya tetap terjaga tanpa menyebabkan *overcharge*. Dengan metode ini, baterai selalu berada dalam kondisi siap pakai sebagai sumber cadangan.

Apabila terjadi gangguan pada suplai AC atau kegagalan *charger*, maka baterai akan secara otomatis mengambil alih suplai beban DC. Proses perpindahan ini berlangsung tanpa jeda sehingga sistem proteksi dan kontrol tetap dapat beroperasi dengan normal. Kondisi ini sangat penting karena pada saat terjadi gangguan sistem tenaga listrik, rele proteksi dan pemutus tenaga harus tetap memiliki suplai energi untuk melakukan operasi trip dan mengamankan jaringan.

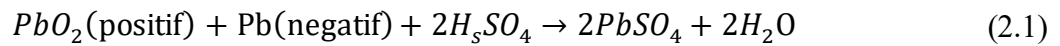
Selain itu, baterai DC gardu induk dirancang agar mampu memberikan arus besar dalam waktu singkat, terutama untuk kebutuhan operasi pemutus tenaga. Pemutus tenaga membutuhkan arus DC yang cukup besar untuk mengaktifkan koil *trip* maupun *close*. Oleh sebab itu, baterai stasioner di gardu induk memiliki karakteristik khusus yang berbeda dengan baterai pada aplikasi umum, yaitu mampu menyediakan suplai daya secara stabil dalam kondisi darurat.

Prinsip kerja baterai juga dipengaruhi oleh faktor kapasitas dan kondisi baterai itu sendiri. Kapasitas baterai dinyatakan dalam satuan *ampere-hour* (Ah), yang menunjukkan kemampuan baterai dalam menyuplai arus tertentu selama periode waktu tertentu. Seiring waktu dan pemakaian, baterai dapat mengalami penurunan kapasitas akibat proses penuaan, korosi pada elektroda, atau perubahan sifat kimia elektrolit. Oleh karena itu, diperlukan pemeliharaan rutin serta pengujian kapasitas secara berkala untuk memastikan baterai masih mampu bekerja sesuai dengan desain sistem.

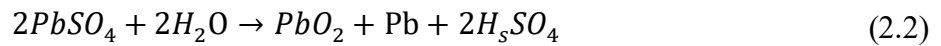
Dengan demikian, prinsip kerja baterai dapat dijelaskan sebagai proses elektrokimia yang memungkinkan baterai menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia pada saat pengisian dan mengubahnya kembali menjadi energi listrik pada saat pengosongan. Dalam sistem DC gardu induk, baterai berperan sebagai sumber daya cadangan yang sangat penting untuk menjaga kontinuitas operasi peralatan proteksi dan kontrol, terutama pada kondisi darurat ketika suplai AC tidak tersedia.

Pada baterai *Lead Acid*, reaksi elektrokimianya sebagai berikut:

Saat Discharge (mengalirkan arus):



Saat Charge (pengisian):



Reaksi kimia pada baterai timbal-asam bersifat *reversibel*, yaitu reaksi dapat berlangsung secara bolak-balik sehingga memungkinkan baterai untuk digunakan dan diisi ulang berulang kali. Pada saat baterai mengalami *discharge*, material aktif pada elektroda positif berupa timbal dioksida (PbO_2) dan elektroda negatif berupa timbal (Pb) bereaksi dengan elektrolit asam sulfat (H_2SO_4) membentuk timbal sulfat ($PbSO_4$) dan air (H_2O), disertai pelepasan energi listrik ke beban. Sebaliknya, pada saat proses *charge*, arus listrik dari sistem pengisi (*charger*) mengubah kembali timbal sulfat ($PbSO_4$) menjadi PbO_2 dan Pb , serta mengembalikan konsentrasi asam sulfat dalam elektrolit. Sifat reversibel ini merupakan prinsip utama yang memungkinkan baterai timbal-asam, seperti baterai 110 V DC di gardu induk, dapat digunakan sebagai sumber daya cadangan yang andal dalam sistem kontrol dan proteksi.

2.1.4.3 Jenis-jenis Baterai

Baterai merupakan komponen utama dalam sistem catu daya DC di gardu induk yang berfungsi sebagai sumber energi cadangan untuk peralatan proteksi, kontrol, dan komunikasi.

Dalam penerapannya, baterai yang digunakan pada gardu induk umumnya merupakan baterai stasioner (*stationary battery*), yaitu baterai yang dirancang untuk aplikasi tetap dengan tingkat keandalan tinggi dan umur pakai panjang.

Pemilihan jenis baterai sangat mempengaruhi kinerja sistem DC karena baterai harus mampu menyediakan suplai daya secara stabil, terutama pada kondisi darurat saat suplai AC tidak tersedia. Secara umum, terdapat beberapa jenis baterai yang sering digunakan dalam sistem DC gardu induk, antara lain sebagai berikut:

1. Baterai Timbal-Asam (*Lead Acid Battery*)

Baterai timbal-asam merupakan jenis baterai yang paling umum digunakan dalam sistem DC gardu induk. Baterai ini bekerja berdasarkan reaksi kimia antara elektroda timbal (Pb) dan timbal dioksida (PbO_2) dengan elektrolit berupa larutan asam sulfat (H_2SO_4).

Baterai timbal-asam memiliki beberapa karakteristik utama, yaitu:

- a. Tegangan nominal sekitar 2 volt per sel
- b. Kapasitas besar untuk aplikasi stasioner
- c. Biaya investasi relatif lebih murah dibandingkan jenis baterai lain
- d. Teknologi sudah matang dan mudah dalam pemeliharaan

Dalam sistem DC 110 V, baterai timbal-asam biasanya disusun sekitar 55 sel secara seri untuk mencapai tegangan yang dibutuhkan. Namun demikian, baterai jenis ini juga memiliki kelemahan, seperti:

- a. Sensitif terhadap suhu tinggi
- b. Memerlukan perawatan rutin, terutama untuk tipe *vented*
- c. Umur pakai dapat menurun jika sering mengalami *deep discharge*

2. Baterai Timbal-Asam Terbuka (*Vented Lead Acid/VLA*)

Baterai timbal-asam terbuka atau *vented lead acid* merupakan salah satu tipe baterai timbal-asam yang menggunakan elektrolit cair dan memiliki ventilasi untuk mengeluarkan gas hasil reaksi kimia selama proses pengisian.

Jenis baterai ini banyak digunakan pada gardu induk konvensional karena:

- a. Memiliki umur pakai cukup Panjang

- b. Mampu menyediakan arus besar dalam waktu singkat
- c. Cocok untuk aplikasi cadangan sistem proteksi

Namun, baterai VLA membutuhkan pemeliharaan yang lebih intensif, seperti:

- a. Pemeriksaan level elektrolit
- b. Penambahan air suling secara berkala
- c. Pengawasan terhadap gas hidrogen yang mudah terbakar

3. Baterai Timbal-Asam Tertutup (*Valve Regulated Lead Acid/VRLA*)

Baterai VRLA merupakan jenis baterai timbal-asam modern yang bersifat tertutup dan menggunakan katup pengatur tekanan (*valve regulated*). Elektrolit pada baterai ini biasanya berbentuk gel atau *absorbed glass mat* (AGM).

Keunggulan baterai VRLA antara lain:

- a. Tidak memerlukan penambahan air elektrolit
- b. Pemeliharaan lebih mudah dibandingkan VLA
- c. Cocok untuk ruang baterai dengan keterbatasan ventilasi

Baterai VRLA banyak digunakan pada gardu induk modern karena lebih praktis dan aman dalam pengoperasian. Namun, baterai ini lebih sensitif terhadap *overcharge* dan suhu tinggi sehingga membutuhkan sistem *charger* yang andal.

4. Baterai Nikel-Kadmium (Nickel Cadmium/Ni-Cd *Battery*)

Baterai nikel-kadmium merupakan jenis baterai yang banyak digunakan pada gardu induk dengan kebutuhan keandalan tinggi. Baterai ini menggunakan elektroda nikel oksida hidroksida sebagai katoda dan kadmium sebagai anoda, dengan elektrolit larutan kalium hidroksida (KOH).

Karakteristik baterai Ni-Cd meliputi:

- a. Tegangan nominal sekitar 1,2 volt per sel
- b. Umur pakai lebih panjang dibanding baterai timbal-asam
- c. Tahan terhadap suhu ekstrem
- d. Mampu bertahan pada kondisi *deep discharge*

Baterai Ni-Cd sangat cocok digunakan pada sistem DC gardu induk karena memiliki ketahanan tinggi dan keandalan yang baik, meskipun biaya investasinya lebih mahal.

5. Baterai Lithium-Ion (Li-Ion *Battery*)

Baterai lithium-ion merupakan teknologi baterai yang semakin berkembang dan mulai diterapkan pada beberapa sistem kelistrikan modern. Baterai ini memiliki kepadatan energi yang tinggi dan ukuran yang lebih ringkas dibandingkan baterai konvensional.

Keunggulan baterai lithium-ion antara lain:

- a. Kapasitas besar dengan ukuran lebih kecil
- b. Efisiensi tinggi
- c. Umur siklus Panjang
- d. Pemeliharaan lebih minimal

Namun, penerapan baterai lithium-ion pada gardu induk masih terbatas karena:

- a. Harga yang relatif mahal
- b. Membutuhkan sistem manajemen baterai (*Battery Management System/BMS*)
- c. Risiko *thermal runaway* jika tidak dikendalikan dengan baik

6. Baterai Alkaline lainnya

Selain Ni-Cd, terdapat jenis baterai alkaline lain seperti nickel-metal hydride (Ni-MH). Namun jenis ini jarang digunakan pada gardu induk karena tidak seandal Ni-Cd untuk aplikasi stasioner.

2.1.4.4 Parameter Utama Baterai

Baterai merupakan komponen vital dalam sistem DC gardu induk karena berfungsi sebagai sumber energi cadangan untuk peralatan proteksi, kontrol, dan komunikasi. Agar baterai dapat beroperasi secara andal, diperlukan pemahaman mengenai parameter-parameter utama yang menjadi indikator kinerja dan kondisi baterai. Parameter ini digunakan dalam perancangan, pemilihan, pengoperasian, serta pemeliharaan baterai di gardu induk.

Parameter utama baterai sangat penting karena berkaitan langsung dengan kemampuan baterai dalam menyuplai beban DC saat kondisi normal maupun darurat. Berikut

ini merupakan beberapa parameter utama baterai yang umum digunakan pada sistem 110 VDC gardu induk:

1. Tegangan Nominal (*Nominal Voltage*)

Tegangan nominal merupakan nilai tegangan standar yang dimiliki oleh baterai dalam kondisi operasi normal. Pada sistem DC gardu induk, tegangan nominal yang umum digunakan adalah 110 VDC atau 220 VDC. Tegangan nominal baterai diperoleh dari jumlah sel yang disusun secara seri. Sebagai contoh:

- a. Baterai timbal-asam memiliki tegangan sekitar 2 V per sel
- b. Baterai Ni-Cd memiliki tegangan sekitar 1,2 V per sel

Tegangan nominal sangat penting karena harus sesuai dengan kebutuhan peralatan proteksi dan kontrol yang disuplai.

2. Kapasitas Baterai (*Battery Capacity*)

Kapasitas baterai merupakan kemampuan baterai dalam menyimpan energi listrik dan dinyatakan dalam satuan *ampere-hour* (Ah). Kapasitas menunjukkan seberapa besar arus yang dapat disuplai baterai dalam waktu tertentu. Sebagai contoh, baterai dengan kapasitas 200 Ah secara teoritis mampu menyuplai arus 200 A selama 1 jam atau 20 A selama 10 jam, tergantung pada kondisi *discharge*. Dalam sistem gardu induk, kapasitas baterai harus cukup untuk menyuplai beban penting selama durasi *backup* yang ditentukan, misalnya 1–8 jam.

3. Arus Pengosongan (*Discharge Current*)

Arus pengosongan adalah arus yang dikeluarkan baterai saat menyuplai beban DC. Besarnya arus *discharge* dipengaruhi oleh jumlah beban yang terhubung pada sistem DC. Pada gardu induk, arus *discharge* dapat meningkat secara signifikan ketika terjadi operasi *trip* atau *close circuit breaker* karena membutuhkan arus tinggi dalam waktu singkat. Arus *discharge* yang terlalu besar dapat menyebabkan penurunan tegangan baterai secara cepat, sehingga perlu diperhitungkan dalam perancangan sistem.

4. Arus Pengisian (*Charging Current*)

Arus pengisian merupakan arus yang masuk ke baterai selama proses *charge* oleh *battery charger*. Pengisian baterai harus dilakukan sesuai karakteristik baterai agar tidak menyebabkan *overcharging* atau *overheating*. Metode pengisian yang umum digunakan adalah:

- a. *Float charge* untuk menjaga baterai tetap penuh
- b. *Boost charge* untuk pengisian cepat setelah discharge

Pengaturan arus charge sangat penting untuk memperpanjang umur baterai.

5. Tegangan Akhir Pengosongan (*End of Discharge Voltage*)

Tegangan akhir pengosongan adalah batas tegangan minimum baterai saat proses *discharge*. Jika baterai terus digunakan di bawah batas ini, maka dapat terjadi kerusakan sel dan penurunan umur pakai. Dalam sistem DC 110 V, tegangan akhir *discharge* biasanya berada pada kisaran tertentu sesuai standar pabrikan dan IEC/IEEE. Parameter ini digunakan sebagai acuan dalam pengujian kapasitas baterai (*discharge test*).

6. *State of Charge* (SOC)

State of Charge merupakan parameter yang menunjukkan tingkat kapasitas baterai yang tersisa dibandingkan kapasitas penuh, biasanya dinyatakan dalam persen (%). SOC sangat penting untuk mengetahui apakah baterai masih dalam kondisi penuh, setengah, atau hampir habis. Monitoring SOC membantu operator memastikan baterai selalu siap digunakan pada kondisi darurat.

7. *State of Health* (SOH)

State of Health adalah parameter yang menunjukkan kondisi kesehatan baterai secara keseluruhan. SOH digunakan untuk menilai sejauh mana baterai masih mampu bekerja sesuai kapasitas awalnya. Penurunan SOH dapat terjadi akibat:

- a. Penuaan baterai
- b. Korosi elektroda
- c. Sulfasi pada baterai timbal-asam
- d. Kerusakan sel internal

SOH biasanya menjadi dasar dalam menentukan waktu penggantian baterai.

8. Umur Pakai (*Battery Lifetime*)

Umur pakai baterai merupakan lamanya baterai dapat digunakan secara efektif sebelum kapasitasnya turun di bawah batas standar. Umur baterai dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti:

- a. Suhu lingkungan
- b. Pola *charge-discharge*
- c. Pemeliharaan rutin
- d. Kualitas *charger*

Baterai gardu induk umumnya memiliki umur desain sekitar 10–20 tahun tergantung jenisnya.

9. Temperatur Operasi (*Operating Temperature*)

Temperatur merupakan parameter penting karena sangat mempengaruhi reaksi kimia dalam baterai. Suhu yang terlalu tinggi dapat mempercepat degradasi baterai, sedangkan suhu terlalu rendah dapat menurunkan kapasitas efektif. Oleh karena itu, ruang baterai gardu induk biasanya dilengkapi sistem ventilasi dan kontrol suhu.

10. *Internal Resistance* (Tahanan Dalam)

Tahanan dalam adalah resistansi internal baterai yang mempengaruhi kemampuan baterai dalam menyuplai arus besar. Semakin tinggi tahanan dalam, maka semakin besar penurunan tegangan saat *discharge*. Pengukuran tahanan dalam sering digunakan untuk mendeteksi kondisi sel baterai yang mulai menurun sebelum terjadi kegagalan.

2.1.5 Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai merupakan salah satu parameter terpenting dalam sistem catu daya DC gardu induk karena berkaitan langsung dengan kemampuan baterai dalam menyuplai energi listrik kepada beban DC. Dalam sistem gardu induk, baterai DC berfungsi sebagai sumber daya cadangan utama yang harus mampu menjaga kontinuitas operasi peralatan proteksi, kontrol, dan komunikasi ketika terjadi gangguan atau pemadaman suplai AC. Oleh

karena itu, pemahaman mengenai kapasitas baterai menjadi sangat penting dalam perencanaan, pengoperasian, serta pemeliharaan sistem DC gardu induk.

Secara umum, kapasitas baterai DC gardu induk didefinisikan sebagai kemampuan baterai untuk menyuplai arus listrik dalam jangka waktu tertentu pada tegangan tertentu hingga mencapai batas tegangan akhir pengosongan (*end of discharge voltage*). Kapasitas baterai biasanya dinyatakan dalam satuan *ampere-hour* (Ah), yang menunjukkan besarnya arus yang dapat disuplai baterai selama satu jam atau kombinasi arus dan waktu yang setara.

Dalam penerapannya di gardu induk, kapasitas baterai tidak hanya ditentukan oleh nilai nominal yang tercantum pada nameplate baterai, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi operasi, karakteristik beban, serta kondisi kesehatan baterai. Kapasitas baterai harus dirancang agar mampu menyuplai seluruh beban DC yang terhubung selama durasi waktu tertentu sesuai dengan standar dan kebutuhan sistem, misalnya 1 jam, 3 jam, atau hingga 8 jam tergantung kebijakan operasional.

Kapasitas baterai DC gardu induk sangat berkaitan dengan jenis dan karakteristik beban DC. Beban DC pada gardu induk terdiri dari beban kontinu dan beban sesaat. Beban kontinu meliputi sistem proteksi, kontrol, SCADA, dan komunikasi yang bekerja secara terus-menerus. Sementara itu, beban sesaat biasanya berasal dari operasi pemutus tenaga (*trip* dan *close*) yang membutuhkan arus besar dalam waktu singkat. Dalam perhitungan kapasitas baterai, kedua jenis beban tersebut harus diperhitungkan agar baterai mampu memenuhi kebutuhan energi tanpa mengalami penurunan tegangan yang berlebihan.

Selain itu, kapasitas baterai juga dipengaruhi oleh laju pengosongan (*discharge rate*). Semakin besar arus yang ditarik dari baterai, maka kapasitas efektif baterai akan semakin menurun. Fenomena ini dikenal sebagai efek laju pengosongan, dimana kapasitas aktual baterai bisa lebih kecil dibandingkan kapasitas nominal yang tertera. Oleh sebab itu, dalam sistem DC gardu induk, perhitungan kapasitas baterai harus mempertimbangkan profil beban dan kondisi pengosongan yang mungkin terjadi saat kondisi darurat.

Seiring dengan bertambahnya umur baterai, kapasitas baterai akan mengalami penurunan akibat proses penuaan dan degradasi material internal. Faktor-faktor seperti suhu operasi yang tinggi, frekuensi pengosongan yang dalam (*deep discharge*), serta kualitas

sistem pengisian dapat mempercepat penurunan kapasitas baterai. Oleh karena itu, meskipun baterai masih berfungsi, kapasitas aktualnya dapat berada di bawah kapasitas awal saat pertama kali dipasang.

Dalam konteks pemeliharaan gardu induk, kapasitas baterai DC harus dipantau dan diuji secara berkala untuk memastikan baterai masih mampu menyuplai beban sesuai desain. Salah satu metode yang umum digunakan adalah pengujian kapasitas baterai (*discharge test*), yaitu dengan mengosongkan baterai pada arus tertentu hingga mencapai tegangan akhir pengosongan. Hasil pengujian ini digunakan untuk membandingkan kapasitas aktual baterai dengan kapasitas nominalnya. Jika kapasitas aktual berada di bawah batas yang ditentukan standar, maka baterai dianggap tidak lagi andal dan perlu dilakukan tindakan perbaikan atau penggantian.

Kapasitas baterai DC gardu induk juga memiliki peran penting dalam menjamin keandalan sistem proteksi. Pada saat terjadi gangguan besar pada sistem tenaga listrik, peralatan proteksi harus tetap beroperasi untuk memutus bagian sistem yang terganggu. Apabila kapasitas baterai tidak mencukupi, maka suplai DC dapat turun di bawah batas operasi peralatan proteksi sehingga berpotensi menyebabkan kegagalan sistem pengamanan.

Dengan demikian, kapasitas baterai DC gardu induk dapat diartikan sebagai kemampuan baterai dalam menyediakan energi listrik arus searah secara andal untuk mendukung operasional gardu induk pada kondisi normal maupun darurat. Kapasitas baterai yang memadai dan terjaga dengan baik akan memastikan sistem DC dapat menjalankan fungsinya secara optimal, sehingga keandalan dan keamanan sistem tenaga listrik secara keseluruhan dapat terjamin..

2.1.6 Uji Kapasitas Baterai

2.1.6.1 Pengertian Uji Kapasitas Baterai

Uji kapasitas baterai adalah suatu metode pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kemampuan aktual baterai dalam menyimpan dan menyuplai energi listrik sesuai dengan kapasitas nominalnya. Uji kapasitas dilakukan dengan cara memberikan beban

tertentu pada baterai (*discharge*) dalam periode waktu tertentu hingga tegangan baterai mencapai batas akhir pengosongan (*end of discharge voltage*).

Dalam sistem DC gardu induk, uji kapasitas baterai sangat penting karena baterai berfungsi sebagai sumber daya cadangan utama apabila suplai AC mengalami gangguan atau padam. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa baterai masih mampu memberikan suplai energi yang cukup untuk menjalankan peralatan vital seperti rele proteksi, pemutus tenaga, sistem SCADA, alarm, dan kontrol.

Uji kapasitas baterai biasanya dinyatakan dalam satuan *ampere-hour* (Ah) atau persentase (%) terhadap kapasitas nominal baterai. Sebagai contoh, jika baterai memiliki kapasitas nominal 200 Ah, maka hasil uji kapasitas menunjukkan apakah baterai masih mampu menyuplai mendekati nilai tersebut atau sudah mengalami penurunan.

Hasil dari pengujian ini dinyatakan dalam persentase kapasitas:

$$\text{Capacity (\%)} = \frac{t_{\text{actual}}}{t_{\text{nominal}}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Dimana t_{actual} adalah waktu pengosongan aktual hingga tegangan akhir tercapai, dan t_{nominal} adalah waktu nominal.

Dengan demikian, uji kapasitas merupakan cara paling akurat untuk mengevaluasi performa baterai secara menyeluruh dibandingkan hanya pengukuran tegangan atau inspeksi visual.

2.1.6.2 Tujuan Uji Kapasitas Baterai

Pengujian kapasitas baterai dilakukan bukan hanya sebagai prosedur pemeliharaan rutin, tetapi juga sebagai langkah penting untuk menjamin keandalan sistem DC gardu induk. Tujuan utama dari uji kapasitas baterai dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Mengetahui Kapasitas Aktual Baterai.

Tujuan utama pengujian kapasitas adalah untuk mengetahui kemampuan aktual baterai dalam menyuplai energi dibandingkan kapasitas nominalnya. Seiring waktu, kapasitas baterai akan menurun akibat proses penuaan dan degradasi sel, sehingga diperlukan pengujian untuk memastikan kapasitas masih sesuai standar.

2. Menjamin Keandalan Sistem DC Gardu Induk.

Sistem DC di gardu induk sangat bergantung pada baterai sebagai cadangan utama saat terjadi gangguan suplai AC. Jika kapasitas baterai tidak mencukupi, maka peralatan proteksi dan kontrol dapat gagal beroperasi. Oleh sebab itu, uji kapasitas dilakukan untuk menjamin baterai selalu siap mendukung operasi gardu induk.

3. Mendeteksi Penurunan Performa atau Kerusakan Sel.

Uji kapasitas dapat digunakan untuk mendeteksi adanya sel baterai yang lemah, kerusakan internal, sulfasi pada baterai timbal-asam, atau peningkatan tahanan dalam baterai. Dengan deteksi dini, tindakan perbaikan atau penggantian dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan sistem.

4. Menentukan Jadwal Penggantian Baterai

Hasil uji kapasitas dapat menjadi dasar dalam menentukan apakah baterai masih layak digunakan atau sudah harus diganti. Standar IEEE umumnya menyatakan bahwa baterai perlu dipertimbangkan untuk diganti apabila kapasitasnya turun di bawah batas tertentu, misalnya 80% dari kapasitas nominal.

5. Memenuhi Standar dan Prosedur Pemeliharaan

Pengujian kapasitas baterai juga dilakukan untuk memenuhi standar pemeliharaan yang berlaku seperti IEEE, IEC, maupun pedoman internal perusahaan (PLN). Dengan adanya pengujian rutin, sistem pemeliharaan gardu induk dapat berjalan sesuai prosedur yang ditetapkan.

2.1.6.3 Jenis-jenis Uji Kapasitas Baterai

Dalam praktiknya, terdapat beberapa jenis metode uji kapasitas baterai yang digunakan pada sistem DC gardu induk. Pemilihan metode pengujian disesuaikan dengan kondisi baterai, kebutuhan sistem, serta standar yang diterapkan. Jenis-jenis uji kapasitas baterai antara lain sebagai berikut:

1. Uji Pelepasan Penuh (*Full Discharge Test*)
Uji pelepasan penuh merupakan metode pengujian kapasitas dengan cara mengosongkan baterai secara penuh menggunakan arus beban tertentu hingga mencapai tegangan akhir pengosongan yang ditentukan. Metode ini dianggap sebagai pengujian paling akurat karena memberikan gambaran kapasitas baterai secara menyeluruh. Namun, uji ini memerlukan waktu lama dan dapat mengganggu operasional jika tidak dilakukan dengan perencanaan yang baik.
2. Uji Pelepasan Parsial (*Partial Discharge Test*)
Uji pelepasan parsial dilakukan dengan cara mengosongkan baterai hanya sampai persentase tertentu, tidak sampai habis sepenuhnya. Metode ini lebih cepat dan mengurangi risiko stres berlebihan pada baterai. Uji ini sering digunakan sebagai pemeriksaan berkala untuk memantau kondisi baterai tanpa harus melakukan *full discharge*.
3. Uji Beban Konstan (*Constant Current Discharge Test*)
Pada metode ini, baterai diuji dengan memberikan arus discharge konstan sesuai standar tertentu, misalnya $C/10$ atau $C/8$, hingga mencapai tegangan akhir. Metode *constant current* merupakan metode yang umum digunakan dalam pengujian kapasitas baterai gardu induk karena hasilnya lebih mudah dianalisis dan sesuai dengan standar IEEE.
4. Uji Beban Konstan Tegangan (*Constant Power/Voltage Test*)
Pada metode ini, baterai diuji dengan beban daya atau tegangan yang dijaga konstan. Metode ini lebih kompleks karena memerlukan alat pengujian khusus, namun dapat menggambarkan kondisi operasi nyata pada beban tertentu.
5. Uji Kapasitas Berdasarkan *Internal Resistance*
Selain *discharge test*, terdapat metode tidak langsung dengan mengukur tahanan dalam (*internal resistance*) baterai. Jika tahanan meningkat, maka kapasitas baterai cenderung menurun. Metode ini lebih cepat dan tidak memerlukan pengosongan baterai, tetapi hasilnya bersifat indikatif dan biasanya digunakan sebagai monitoring tambahan.

2.1.7 Keandalan Sistem Baterai

2.1.7.1 Pengertian Keandalan Sistem Baterai

Keandalan sistem baterai gardu induk dapat didefinisikan sebagai kemampuan baterai untuk menyediakan energi listrik DC secara stabil, aman, dan mencukupi sesuai kapasitas yang dirancang dalam jangka waktu tertentu, terutama pada kondisi darurat ketika sumber utama tidak tersedia. Dalam sistem tenaga listrik, gardu induk membutuhkan sumber daya DC untuk menjalankan berbagai peralatan penting seperti rele proteksi, pemutus tenaga (*circuit breaker*), sistem kontrol, alarm, dan sistem telekomunikasi. Baterai berfungsi sebagai cadangan utama yang harus selalu siap menyuplai beban DC apabila terjadi pemadaman suplai AC atau kegagalan *battery charger*.

Keandalan baterai tidak hanya diukur dari besarnya kapasitas nominal yang tertera pada *nameplate*, tetapi lebih pada kemampuan aktual baterai dalam menyuplai arus beban sesuai kebutuhan operasional. Dengan kata lain, baterai yang andal adalah baterai yang mampu bekerja optimal saat diperlukan, tanpa mengalami penurunan tegangan yang signifikan, serta mampu mempertahankan suplai hingga durasi backup terpenuhi. Keandalan sistem baterai juga berkaitan erat dengan aspek keselamatan operasi gardu induk. Apabila baterai gagal berfungsi, maka sistem proteksi tidak dapat melakukan operasi *trip* atau *close* pada pemutus tenaga, sehingga gangguan pada jaringan dapat berkembang lebih luas dan berpotensi menyebabkan kerusakan peralatan serta pemadaman sistem tenaga listrik. Dengan demikian, keandalan sistem baterai gardu induk merupakan salah satu faktor utama yang mendukung keamanan, kestabilan, dan kontinuitas operasi gardu induk secara keseluruhan.

2.1.7.2 Faktor Yang Mempengaruhi Keandalan Sistem Baterai

Keandalan sistem baterai di gardu induk dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis maupun operasional. Faktor-faktor tersebut harus diperhatikan agar baterai selalu berada dalam kondisi siap pakai. Beberapa faktor utama yang mempengaruhi keandalan sistem baterai antara lain sebagai berikut:

1. Kapasitas dan Kondisi Kesehatan Baterai.

Kapasitas baterai merupakan parameter utama yang menunjukkan kemampuan baterai dalam menyimpan dan menyuplai energi listrik. Seiring dengan umur pemakaian, kapasitas aktual baterai akan mengalami penurunan akibat degradasi kimia internal. Penurunan ini dapat menyebabkan baterai tidak mampu menyuplai beban sesuai durasi yang dirancang. Kondisi kesehatan baterai (*battery state of health*) menjadi indikator penting untuk menentukan apakah baterai masih layak digunakan atau sudah mendekati akhir masa pakainya.

2. Umur Pemakaian dan Proses Penuaan.

Baterai memiliki umur operasi terbatas. Proses penuaan menyebabkan terjadinya korosi pada elektroda, peningkatan tahanan dalam, serta penurunan kemampuan reaksi kimia. Pada baterai timbal-asam, fenomena sulfasi juga dapat terjadi apabila baterai sering mengalami kondisi *undercharge*. Semakin tua baterai, semakin besar kemungkinan terjadinya kegagalan saat kondisi darurat.

3. Suhu dan Kondisi Lingkungan Operasi.

Faktor lingkungan seperti temperatur ruang baterai sangat mempengaruhi performa dan umur baterai. Suhu tinggi dapat mempercepat reaksi kimia yang menyebabkan degradasi lebih cepat, sedangkan suhu rendah dapat menurunkan kapasitas efektif baterai. Oleh karena itu, sistem baterai gardu induk biasanya ditempatkan dalam ruang khusus dengan ventilasi dan pengaturan suhu yang memadai.

4. Sistem Pengisian dan Kinerja *Battery Charger*.

Keandalan baterai juga dipengaruhi oleh kualitas sistem pengisian. *Battery charger* harus mampu menjaga baterai dalam kondisi penuh melalui metode *float charging* dan memberikan *boost charging* setelah *discharge*.

Charger yang tidak bekerja normal dapat menyebabkan:

- a. *Overcharge* (pengisian berlebih)
- b. *Undercharge* (pengisian kurang)

Kedua kondisi tersebut dapat mempercepat kerusakan baterai dan menurunkan keandalannya.

5. Pemeliharaan dan Pengujian Berkala

Keandalan baterai sangat bergantung pada program pemeliharaan rutin, seperti:

- a. Pemeriksaan tegangan tiap sel
- b. Pengukuran arus pengisian
- c. Pemeriksaan koneksi terminal
- d. Pembersihan baterai
- e. Uji kapasitas (*discharge test*)

Uji kapasitas merupakan metode paling akurat untuk memastikan baterai masih mampu menyuplai beban sesuai standar.

6. Beban Sistem DC dan Kebutuhan *Backup Time*

Baterai harus dirancang sesuai kebutuhan beban DC di gardu induk. Jika terjadi penambahan beban tanpa perhitungan ulang kapasitas, maka baterai dapat mengalami *overload* sehingga tidak mampu memenuhi durasi backup yang dibutuhkan. Dengan demikian, kesesuaian kapasitas baterai dengan profil beban DC sangat menentukan tingkat keandalan sistem.

2.1.7.3 Standar Keandalan Sistem Baterai

Untuk menjamin bahwa sistem baterai di gardu induk memiliki tingkat keandalan yang sesuai, diperlukan penerapan standar dan pedoman teknis yang berlaku secara internasional maupun nasional. Standar ini mencakup aspek perancangan, pengujian, pemeliharaan, dan kriteria kelayakan baterai.

Beberapa standar yang umum digunakan dalam sistem baterai gardu induk antara lain:

1. IEEE Std 450-2010: *Maintenance, Testing, and Replacement of Vented Lead-Acid Batteries for Stationary Applications*.

IEEE 450 memberikan pedoman pemeliharaan dan pengujian baterai timbal-asam stasioner yang digunakan pada sistem tenaga listrik. Standar ini mengatur prosedur

inspeksi rutin, pengukuran parameter baterai, serta pelaksanaan uji kapasitas secara periodik.

2. IEEE Std 1188-2005: *VRLA Battery Maintenance and Testing*
IEEE 1188 merupakan standar yang digunakan untuk baterai jenis *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA). Standar ini menekankan pentingnya pengujian performa baterai serta monitoring kondisi internal untuk mencegah kegagalan mendadak.
3. IEC 60896: *Stationary Lead-Acid Batteries*.
IEC 60896 merupakan standar internasional yang mengatur persyaratan umum untuk baterai timbal-asam stasioner, termasuk aspek performa, kapasitas, dan metode pengujian. Standar ini merekomendasikan pengujian kapasitas minimal setiap 2–3 tahun atau setelah ada indikasi penurunan performa.
4. Kriteria Kelayakan Kapasitas Baterai
Secara umum, standar IEEE menyatakan bahwa baterai perlu dipertimbangkan untuk diganti apabila hasil uji kapasitas menunjukkan nilai di bawah sekitar 80% dari kapasitas nominal. Hal ini menunjukkan bahwa baterai sudah mengalami penurunan performa yang signifikan dan berpotensi gagal saat kondisi darurat.
5. Pedoman Internal PLN
Selain standar internasional, PLN juga memiliki pedoman internal terkait pemeliharaan sistem DC gardu induk, termasuk inspeksi level 1 dan level 2, jadwal uji kapasitas, serta prosedur keselamatan kerja dalam penanganan baterai.

2.2. Penelitian yang Relevan

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

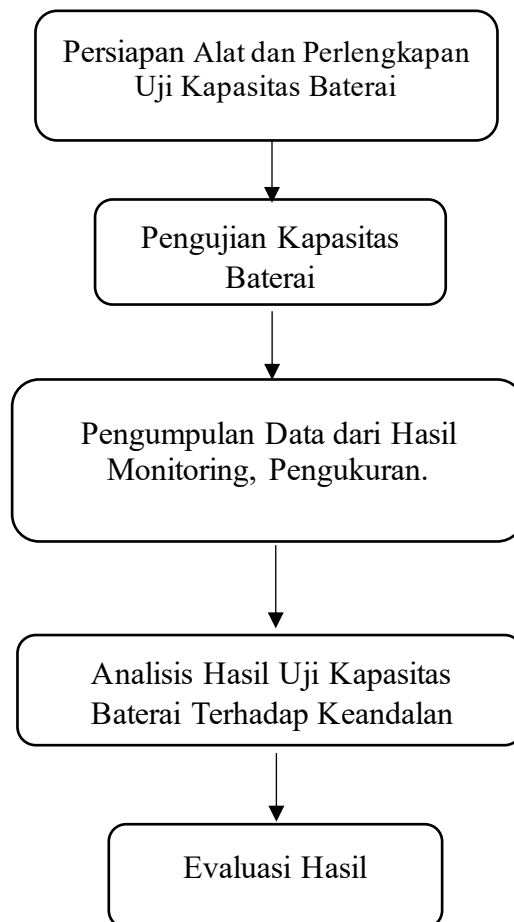
1. Menurut Meliala, Rijal, dan Taufiq, 2021, dalam penelitiannya berjudul “Studi Kapasitas Baterai 110 VDC Unit I pada GI 150 kV Bireuen” menyatakan bahwa sistem baterai DC pada gardu induk berfungsi sebagai sumber daya utama ketika pasokan AC terganggu, sehingga keandalan kapasitas baterai sangat penting untuk

menjamin kontinuitas suplai terhadap sistem proteksi dan kontrol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas efektif baterai mengalami penurunan dibandingkan kapasitas nominal akibat faktor umur dan suhu operasi, namun masih berada dalam batas toleransi standar PLN untuk operasi normal.

2. Menurut Rifa'i dan Jatmiko (2019) dalam penelitian “Analisis Kebutuhan Kapasitas Baterai 110 VDC (Gardu Bawen)” menyatakan bahwa penentuan kapasitas baterai harus mempertimbangkan total beban DC, durasi *backup*, serta efisiensi sistem *charger*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas baterai eksisting masih mencukupi kebutuhan beban selama gangguan AC dalam durasi tertentu, namun rekomendasi peningkatan kapasitas disarankan untuk mengantisipasi penambahan peralatan baru dan degradasi baterai di masa depan. [3].
3. Menurut Kelen dan Budiyanto (2020) dalam tugas akhirnya berjudul “Pengujian Kapasitas Baterai 110 VDC Unit 2 Pemeliharaan Rutin 2 Tahunan di Gardu Induk 150 kV Pati” menyatakan bahwa uji kapasitas baterai merupakan langkah penting untuk mengetahui kemampuan aktual baterai dalam menyuplai beban selama kondisi darurat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas aktual baterai mengalami penurunan sebesar $\pm 15\%$ dari kapasitas nominal, disebabkan oleh penuaan sel dan ketidakseimbangan antar sel, sehingga perlu dilakukan perawatan dan penggantian beberapa sel yang menurun. [12].
4. Menurut Istiqlal, Priatna, dan Sutisna (2023) dalam jurnal “Analisa Kapasitas Baterai sebagai Sumber DC pada Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV PT PLN (Persero) Tasikmalaya” menyatakan bahwa keandalan sistem DC pada gardu induk bergantung pada kinerja baterai sebagai penyedia energi cadangan untuk sistem proteksi dan telekomunikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas baterai VRLA yang digunakan masih dalam kondisi baik dengan efisiensi pengisian mencapai lebih dari 90%, namun ditemukan perbedaan tegangan antar sel yang perlu dimonitor secara berkala.[13].
5. Menurut Hidayat dan Prasetyo (2022) dalam penelitian “Studi Kapasitas Baterai 110VDC pada Gardu Induk 150KV Mojosongo Boyolali” menyatakan bahwa analisis

kapasitas dan kondisi kesehatan baterai penting untuk menjamin keandalan sistem DC selama gangguan daya utama. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian sel baterai mengalami penurunan tegangan dan kapasitas akibat umur pakai lebih dari lima tahun, sehingga diperlukan uji *discharge* rutin serta penjadwalan penggantian baterai untuk menjaga keandalan sistem darurat..[14].

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.3. Kerangka Pemikiran

Sesuai dengan kerangka pemikiran penulis, sebelum dimulainya pengujian kapasitas baterai, diperlukan persiapan alat dan perlengkapan pengujian. Pada proses persiapan ini terdiri dari mempersiapkan alat yang akan dibutuhkan, dokumen *Standard Operating*

Procedure (SOP) serta bekerja sesuai langkah-langkah SOP yang berlaku. Setelah segala persiapan tersebut dipenuhi, penulis dapat melaksanakan pengujian kapasitas baterai. Setelah dilakukannya pengujian tersebut, maka penulis akan mendapatkan data yang akan diolah oleh penulis ke tahap berikutnya yaitu proses analisis, sehingga penulis dapat memahami hasil dari pengujian kapasitas baterai terhadap keandalan sistem DC di gardu induk.