

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Beberapa penelitian dan literatur terdahulu digunakan sebagai acuan dalam menganalisis penerapan sistem sentralisasi DC *source* pada sistem proteksi dan *starting* mesin diesel. Kajian-kajian tersebut memberikan landasan teoretis, hasil pengujian, serta pembelajaran teknis yang relevan terhadap permasalahan sistem DC yang terjadi di PLTD Sawai Baru.

Salas-Puente et al. [1] dalam penelitiannya berjudul “*Experimental Study of a Centralized Control Strategy of a DC Microgrid*” menjelaskan bahwa sistem DC dengan pengendalian terpusat mampu meningkatkan stabilitas tegangan dan keandalan distribusi daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan kontrol terpusat dapat memperbaiki efisiensi aliran daya serta mempermudah pengaturan beban. Konsep ini relevan untuk diterapkan pada lingkungan pembangkit diesel, khususnya dalam meningkatkan kestabilan suplai DC dan mengurangi gangguan akibat fluktuasi sumber pengisian.

Prabhala et al. [2] dalam ulasannya yang berjudul “*An Overview of Direct Current Distribution Systems*” menguraikan berbagai aspek teknis penting pada sistem distribusi DC, meliputi rugi tegangan (*voltage drop*), efisiensi sistem pengisian, serta kebutuhan akan standar keselamatan dan keandalan. Literatur ini menjadi dasar dalam melakukan analisis rugi daya dan efisiensi distribusi pada sistem sentralisasi DC *source* yang diterapkan di PLTD Sawai Baru.

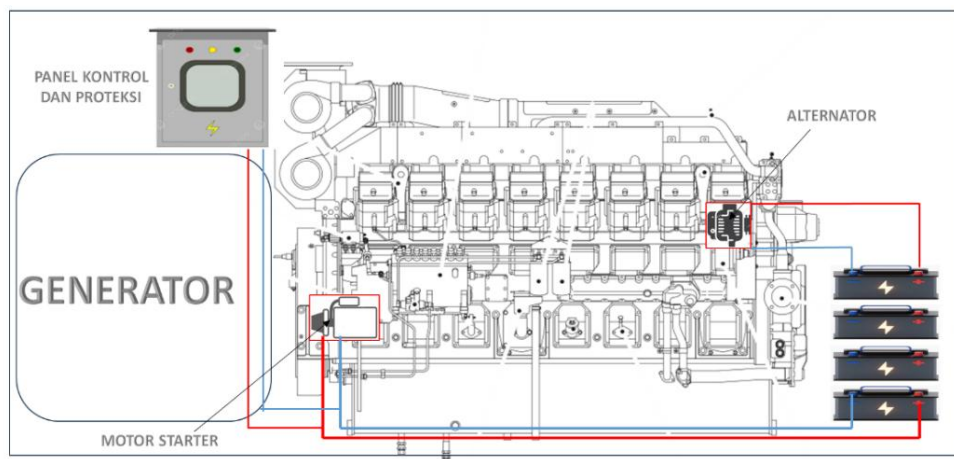
Berdasarkan kajian penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar penelitian masih berfokus pada sistem DC secara umum atau pada aplikasi mikrogrid dan distribusi modern. Penelitian ini memiliki posisi yang lebih spesifik, karena mengkaji langsung kondisi eksisting sistem DC berbasis alternator pada PLTD daerah serta menganalisis penerapan sistem sentralisasi DC *source* pada sistem proteksi dan *starting* mesin diesel Mitsubishi S16R PTA-S. Dengan demikian, penelitian ini

diharapkan dapat memberikan kontribusi teknis yang aplikatif dalam meningkatkan keandalan operasi pembangkit diesel.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem DC pada PLTD

Sistem arus searah (*Direct Current/DC*) pada pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) berfungsi sebagai sumber daya utama bagi rangkaian kontrol, proteksi, dan sistem *starting* mesin. Pada umumnya, sistem DC pada PLTD menggunakan tegangan nominal 24 VDC yang disuplai oleh baterai dan diisi ulang melalui sistem pengisian berupa alternator mesin atau DC *charger* eksternal.



Gambar 2.1 Kondisi eksisting wiring proteksi dan *starting* mesin

Secara fungsional, sistem DC merupakan sistem esensial (*essential system*) karena berperan langsung dalam menjamin kesiapan operasi dan keselamatan mesin diesel. Sistem ini menyuplai daya bagi motor starter untuk memutar poros engkol mesin pada saat *starting*, serta menyediakan catu daya kontinu bagi sistem proteksi, sistem kontrol, dan rangkaian monitoring selama mesin beroperasi. Kondisi eksisting sistem DC pada PLTD ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Komponen utama dalam sistem DC PLTD meliputi baterai (*accumulator*) sebagai media penyimpan energi, sistem pengisian baterai berupa alternator atau DC *charger*, sistem distribusi dan proteksi DC, serta beban DC yang terdiri dari motor *starter*, *relay* proteksi, sensor, alarm, dan sistem monitoring. Keandalan sistem DC sangat ditentukan oleh kemampuan sistem pengisian dalam menjaga tegangan kerja baterai tetap berada dalam rentang aman, umumnya antara 22–28 VDC.

Pada mesin diesel tipe Mitsubishi S16R PTA-S, sistem DC tidak hanya berfungsi untuk kebutuhan *starting*, tetapi juga menjadi sumber utama bagi sistem kontrol elektronik, sistem proteksi mesin, serta sistem *annunciator* dan *interlock*. Penurunan tegangan atau kegagalan suplai DC dapat menyebabkan kegagalan *starting*, tidak bekerjanya sistem proteksi, serta potensi terjadinya *trip* tidak terencana atau kerusakan mesin akibat fungsi pengamanan yang tidak optimal.

Selain itu, sistem DC juga menyuplai sistem komunikasi *internal* panel kontrol dan sistem *monitoring* kondisi mesin. Oleh karena itu, kegagalan sistem DC dapat menyebabkan hilangnya fungsi pengawasan dan proteksi secara simultan. Dalam praktik operasi pembangkit, sistem DC harus dirancang dengan tingkat keandalan tinggi, ketersediaan daya kontinu, serta konfigurasi proteksi yang memadai untuk menghindari kegagalan tunggal (*single point of failure*). Kondisi inilah yang menjadi dasar perlunya evaluasi terhadap konfigurasi sistem DC eksisting dan kajian penerapan sistem sentralisasi DC *source* pada PLTD Sawai Baru.

2.2.2 Baterai (*Accumulator*) pada Sistem DC

Baterai (*accumulator*) merupakan komponen utama pada sistem DC pembangkit listrik tenaga diesel yang berfungsi sebagai media penyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia. Energi yang tersimpan dalam baterai digunakan untuk menyuplai daya bagi sistem *starting* mesin, sistem proteksi, sistem kontrol, serta rangkaian monitoring ketika mesin belum beroperasi atau ketika sumber pengisian mengalami gangguan. Oleh karena itu, kondisi dan karakteristik baterai sangat menentukan keandalan sistem DC secara keseluruhan.



Gambar 2.2 Sistem Baterai DC PLTD Sawai Baru

a. Jenis Baterai pada Sistem DC PLTD

Jenis baterai yang umum digunakan pada sistem DC PLTD adalah baterai timbal-asam (*lead-acid battery*), baik tipe aki basah (*flooded lead-acid*) maupun maintenance free (MF).

1. Baterai Lead-Acid Tipe Aki Basah

Baterai jenis ini menggunakan elektrolit cair berupa larutan asam sulfat (H_2SO_4) dan memerlukan perawatan berkala seperti pengecekan level elektrolit dan pengisian air aki. Keunggulan baterai ini adalah kemampuan memberikan arus besar saat *starting* dan biaya investasi yang relatif rendah. Namun, baterai ini lebih rentan terhadap penguapan elektrolit dan degradasi akibat suhu tinggi di ruang mesin.

2. Baterai *Maintenance Free* (MF)

Baterai MF dirancang dengan sistem tertutup sehingga tidak memerlukan penambahan air aki selama masa pakai normal. Jenis ini lebih tahan terhadap getaran dan memiliki tingkat kehilangan elektrolit yang lebih rendah. Pada lingkungan PLTD dengan suhu dan getaran tinggi, baterai MF lebih banyak digunakan karena kemudahan pemeliharaan dan kestabilan performanya, meskipun biaya awalnya lebih tinggi dibanding aki basah.

b. Kapasitas Baterai, *State of Charge* (SOC), dan Umur Baterai

Kapasitas baterai dinyatakan dalam satuan *ampere-hour* (Ah) yang menunjukkan kemampuan baterai dalam menyuplai arus listrik dalam durasi tertentu. Sebagai contoh, baterai berkapasitas 200 Ah secara teoritis mampu menyuplai arus sebesar 20 A selama 10 jam pada kondisi ideal.

Parameter penting dalam evaluasi kondisi baterai adalah *State of Charge* (SOC), yaitu persentase kapasitas baterai yang masih tersedia dibandingkan kapasitas nominalnya. SOC dipengaruhi oleh tegangan terminal baterai, arus beban, serta riwayat pengisian dan pemakaian. Pada sistem DC PLTD, baterai diharapkan beroperasi pada kondisi SOC yang cukup tinggi agar selalu siap digunakan untuk *starting* dan proteksi.

Umur baterai dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

- pola pengisian dan pengosongan baterai,
- suhu lingkungan,
- kualitas sistem pengisian,

- serta frekuensi arus *starting* yang besar.

Penggunaan baterai pada kondisi SOC rendah secara berulang akan mempercepat degradasi material aktif baterai dan menurunkan kapasitas efektifnya.

c. Pengaruh *Overcharge* dan *Undercharge* terhadap Baterai

Kinerja dan umur baterai sangat dipengaruhi oleh kestabilan sistem pengisian. Kondisi *overcharge* dan *undercharge* merupakan dua kondisi yang paling sering menyebabkan kerusakan baterai pada sistem DC PLTD.

Overcharge terjadi ketika tegangan atau arus pengisian melebihi batas kerja yang direkomendasikan. Kondisi ini dapat menyebabkan pemanasan berlebih, penguapan elektrolit, korosi pelat, serta peningkatan tekanan internal baterai. Dalam jangka panjang, *overcharge* akan mempercepat penurunan umur baterai dan meningkatkan risiko kegagalan sistem DC.

Sebaliknya, *undercharge* terjadi ketika baterai tidak mendapatkan pengisian yang cukup akibat gangguan sistem *charging* atau operasi mesin yang tidak kontinu. *Undercharge* menyebabkan baterai sering berada pada kondisi SOC rendah, yang dapat memicu proses sulfasi pada pelat baterai. Sulfasi ini menurunkan kemampuan baterai dalam menyimpan dan melepaskan energi, sehingga mengurangi kemampuan *starting* dan keandalan suplai DC untuk sistem proteksi.

d. Keterkaitan Kondisi Baterai dengan Keandalan Sistem DC

Kondisi baterai yang tidak optimal, baik akibat *overcharge* maupun *undercharge*, akan berdampak langsung terhadap kestabilan tegangan sistem DC. Penurunan tegangan DC dapat menyebabkan motor *starter* tidak mampu bekerja secara maksimal serta mengganggu fungsi *relay* proteksi dan sistem kontrol. Oleh karena itu, pemilihan jenis baterai, penentuan kapasitas yang sesuai, serta pengaturan sistem pengisian yang stabil merupakan faktor penting dalam menjaga keandalan sistem DC pada PLTD.

2.2.3 Sistem Pengisian DC (Alternator & DC Charger)

a. Sistem Pengisian Baterai Menggunakan Alternator

Alternator merupakan mesin listrik yang berfungsi mengubah energi mekanik dari putaran mesin diesel menjadi energi listrik arus bolak-balik (AC), yang selanjutnya disearahkan menjadi arus searah (DC) melalui rangkaian dioda rectifier untuk keperluan

pengisian baterai. Tegangan keluaran alternator dikendalikan oleh regulator tegangan (*voltage regulator*) agar sesuai dengan kebutuhan sistem DC dan karakteristik baterai.



Gambar 2.3 Alternator Mesin Mitsubishi S16R PTA-S

Komponen utama alternator meliputi rotor, stator, dioda penyearah, sikat (*brush*), dan regulator tegangan. Rotor menghasilkan medan magnet ketika dialiri arus eksitasi, sedangkan stator menghasilkan tegangan AC akibat perubahan fluks magnet. Tegangan AC tersebut kemudian disearahkan oleh dioda sehingga menghasilkan tegangan DC yang digunakan untuk mengisi baterai.

Pada sistem PLTD konvensional, alternator umumnya dipasang terpisah pada masing-masing mesin diesel, sehingga setiap unit memiliki sistem pengisian baterai sendiri yang bergantung langsung pada kondisi operasi mesin tersebut.

b. Karakteristik Pengisian Alternator

Karakteristik pengisian baterai menggunakan alternator sangat dipengaruhi oleh:

- Kecepatan putaran mesin
- Kondisi beban listrik
- Kinerja regulator tegangan
- Kondisi fisik baterai

Secara umum, arus pengisian baterai dari alternator dapat mencapai 10–15% dari kapasitas baterai (Ah) pada kondisi normal. Tegangan pengisian dijaga pada kisaran 13,5–14,4 V untuk sistem 12 V atau 27–28,8 V untuk sistem 24 V. Namun, karena alternator mengikuti karakteristik putaran mesin, kestabilan arus dan tegangan pengisian tidak selalu terjaga secara optimal.

c. Permasalahan dan Kelemahan Pengisian Berbasis Alternator Mesin

Beberapa permasalahan yang umum terjadi pada sistem pengisian baterai menggunakan alternator antara lain:

1. *Overcurrent Charging*

Terjadi ketika arus pengisian melebihi batas aman baterai, khususnya saat kondisi baterai lemah atau regulator tegangan tidak bekerja optimal. *Overcurrent charging* menyebabkan peningkatan suhu baterai, penguapan elektrolit berlebih, serta mempercepat degradasi umur baterai.

2. Kerusakan Komponen Alternator

Beban pengisian yang tinggi dan berkelanjutan dapat menyebabkan kumparan stator mengalami *overheating*, sikat (*brush*) aus akibat kontak mekanis terus-menerus, serta kegagalan IC regulator dalam menjaga kestabilan tegangan keluaran.

3. Tegangan dan Arus Fluktuatif

Fluktuasi terjadi akibat perubahan putaran mesin diesel, terutama saat *start-up*, perubahan beban, atau kondisi *idle*. Hal ini menyebabkan proses pengisian baterai menjadi tidak stabil dan berpotensi menurunkan efisiensi pengisian.

4. Ketergantungan pada Operasi Mesin

Alternator hanya dapat melakukan pengisian ketika mesin diesel beroperasi. Pada kondisi mesin berhenti (*standby* atau *gangguan*), baterai tidak memperoleh suplai pengisian sehingga berisiko mengalami penurunan SOC secara signifikan.

Kelemahan utama sistem ini adalah sifatnya yang terpisah (*standalone*) pada masing-masing mesin. Apabila alternator pada satu unit mengalami gangguan, maka baterai unit tersebut akan kehilangan sumber pengisian, yang dapat berdampak langsung pada sistem *starting* mesin dan keandalan sistem proteksi.

2.2.4 Sistem Proteksi Mesin Diesel

Sistem proteksi pada mesin diesel PLTD berfungsi untuk melindungi mesin dan peralatan pendukung dari kondisi operasi tidak normal serta mencegah terjadinya kerusakan yang lebih serius. Proteksi ini bekerja dengan memantau parameter-parameter penting mesin dan memberikan peringatan (*alarm*) atau perintah penghentian operasi (*trip*) apabila nilai parameter melampaui batas operasi yang diizinkan.

Beberapa proteksi utama yang umum diterapkan pada mesin diesel meliputi proteksi tekanan oli pelumas rendah (*low lube oil pressure*), temperatur air pendingin tinggi (*high jacket water temperature*), kecepatan lebih (*overspeed*), tekanan bahan bakar rendah, serta sistem *emergency shutdown*. Seluruh fungsi proteksi tersebut dirancang untuk bekerja secara otomatis dan cepat guna mencegah kerusakan mekanis maupun kegagalan sistem yang lebih luas.

Pada sistem proteksi modern, fungsi pengamanan mesin diintegrasikan dalam modul kontrol elektronik seperti *engine control unit* (ECU) atau genset *controller* (misalnya *Deepsea*). Modul kontrol ini bekerja sepenuhnya menggunakan suplai tegangan DC sebagai sumber energi utama. Tegangan DC digunakan untuk mencatu rangkaian logika internal, sensor-sensor pengukuran, relai proteksi, serta rangkaian keluaran *trip*. Oleh karena itu, kestabilan dan kontinuitas suplai DC menjadi faktor yang sangat menentukan keandalan sistem proteksi mesin.

Fungsi DC pada relai proteksi tidak hanya sebagai sumber daya, tetapi juga sebagai energi untuk mengaktifkan kumparan relai, menjaga kondisi *holding* relai, serta memastikan sinyal *trip* dapat diteruskan ke aktuator penghenti mesin. Apabila terjadi penurunan tegangan DC di bawah batas kerja minimum, relai proteksi dapat gagal *pick-up* atau *drop-out* secara tidak terkendali, sehingga menyebabkan proteksi tidak bekerja sesuai desain atau memicu *trip* palsu (*false trip*).

Selain itu, penurunan tegangan DC juga dapat menyebabkan modul kontrol mengalami *reset*, gangguan pembacaan sensor, atau kesalahan logika proteksi. Kondisi ini berpotensi menghilangkan fungsi pengamanan mesin secara simultan, sehingga mesin dapat beroperasi tanpa proteksi yang memadai atau justru mengalami penghentian operasi yang tidak diperlukan. Fenomena tersebut sering dijumpai pada sistem DC yang memiliki keandalan rendah atau konfigurasi sumber DC yang masih terpisah dan tidak terpusat.

Dengan demikian, keandalan sistem proteksi mesin diesel sangat bergantung pada kualitas suplai DC yang stabil dan kontinu. Gangguan pada sistem DC dapat berdampak langsung terhadap efektivitas proteksi, keselamatan peralatan, serta kontinuitas operasi pembangkit, sebagaimana menjadi permasalahan utama yang dibahas dalam penelitian ini.

2.2.5 Sistem *Starting* Mesin Diesel

Sistem *starting* mesin diesel merupakan proses awal yang sangat krusial dalam operasi pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD). Keberhasilan proses *starting* sangat bergantung pada ketersediaan energi listrik DC yang memadai, baik dari sisi tegangan, arus, maupun kapasitas baterai. Pada mesin diesel berkapasitas besar seperti Mitsubishi S16R PTA-S, sistem *starting* umumnya menggunakan motor starter DC dengan suplai tegangan nominal 24 VDC yang bersumber dari baterai.

Motor starter berfungsi mengubah energi listrik DC menjadi energi mekanik untuk memutar poros engkol (*crankshaft*) hingga mesin mencapai kecepatan minimum yang diperlukan untuk proses pembakaran awal (*self-ignition*). Oleh karena itu, sistem DC tidak hanya berperan sebagai sumber kontrol dan proteksi, tetapi juga sebagai penentu utama keberhasilan *starting* mesin.

a. Kebutuhan Arus Motor *Starter*

Motor starter merupakan beban DC dengan kebutuhan arus yang sangat besar dalam waktu singkat. Pada saat *starting* awal, motor starter mengalami kondisi inrush current, yaitu arus awal yang jauh lebih tinggi dibandingkan arus nominalnya.

Secara umum, karakteristik arus motor starter dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Arus awal (*starting current*) dapat mencapai 5–10 kali arus nominal motor.
- Besarnya arus dipengaruhi oleh:
 - kapasitas dan kondisi baterai,
 - resistansi internal baterai,
 - kondisi kabel dan sambungan,
- serta kondisi mekanis mesin (gesekan, temperatur, beban awal).

Pada mesin diesel besar, arus *starting* motor *starter* dapat mencapai ratusan hingga ribuan *ampere* dalam durasi beberapa detik. Oleh karena itu, baterai harus memiliki kapasitas arus sesaat (*cranking capability*) yang cukup, serta sistem distribusi DC harus mampu menyalurkan arus besar tersebut tanpa menyebabkan penurunan tegangan yang signifikan.

Apabila arus yang tersedia tidak mencukupi, motor *starter* tidak mampu memutar mesin hingga kecepatan minimum *starting*, sehingga proses penyalaan gagal meskipun sistem kontrol dan proteksi berada dalam kondisi normal.

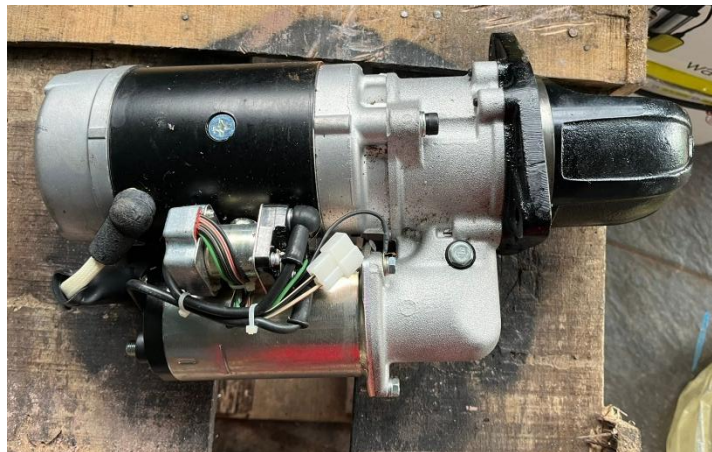
b. Hubungan Tegangan DC dengan Keberhasilan *Starting*

Selain kebutuhan arus yang besar, tegangan DC juga merupakan parameter kritis dalam sistem *starting* mesin diesel. Tegangan yang diterima oleh motor *starter* harus berada dalam batas kerja tertentu agar torsi yang dihasilkan cukup untuk memutar mesin. Pada sistem DC 24 V, penurunan tegangan yang terjadi selama proses *starting* disebabkan oleh:

- resistansi internal baterai,
- drop tegangan pada kabel dan koneksi,
- serta besarnya arus *starting* motor.

Hubungan antara tegangan DC dan kinerja motor *starter* bersifat langsung, di mana penurunan tegangan akan menyebabkan:

- penurunan torsi motor *starter*,
- penurunan kecepatan putar mesin,
- kegagalan mencapai kecepatan minimum pembakaran.



Gambar 2.4 Motor Starter Mesin Mitsubishi S16R PTA-S

Secara praktis, jika tegangan DC turun di bawah batas minimum (umumnya $< 18\text{--}20$ VDC pada sistem 24 V) saat *starting*, maka motor *starter* tidak mampu bekerja secara optimal dan proses *starting* berpotensi gagal. Kondisi ini sering terjadi pada baterai dengan *state of charge* (SOC) rendah, baterai yang telah mengalami degradasi, atau sistem pengisian yang tidak stabil.

Selain itu, tegangan DC yang tidak stabil juga dapat berdampak pada sistem kontrol elektronik yang bekerja secara simultan selama proses *starting*, seperti ECU atau modul

kontrol mesin. Tegangan yang terlalu rendah dapat menyebabkan modul kontrol *reset* atau tidak berfungsi, sehingga perintah *starting* tidak dapat dilanjutkan meskipun motor *starter* masih berputar.

2.2.6 Hubungan Sistem DC dengan Sistem Proteksi, *Starting* Mesin Diesel, dan Daya yang Dihasilkan

Sistem DC memiliki peran sentral dalam keberlangsungan operasi mesin diesel PLTD karena menjadi sumber utama bagi sistem *starting* dan sistem proteksi. Proses operasi unit pembangkit diawali dengan *starting* mesin menggunakan energi dari baterai DC untuk menggerakkan motor *starter* hingga mesin mencapai putaran minimum dan dapat menghasilkan daya listrik.

Setelah mesin beroperasi, sistem DC tetap diperlukan untuk menjaga fungsi sistem kontrol dan proteksi agar mesin bekerja dalam batas aman. Sistem proteksi memantau parameter operasi dan memberikan perintah *trip* apabila terjadi kondisi abnormal yang dapat membahayakan mesin atau sistem kelistrikan.

Hubungan antara sistem DC dan daya yang dihasilkan bersifat tidak langsung namun sangat menentukan. Kegagalan *starting* akibat tegangan DC rendah menyebabkan unit tidak dapat menghasilkan daya. Gangguan pada sistem DC juga dapat menyebabkan sistem proteksi tidak aktif, sehingga mesin beroperasi tanpa pengamanan dan berpotensi mengalami kerusakan berat yang berujung pada *trip* unit dan hilangnya pasokan daya.

Akibat gangguan sistem DC antara lain meliputi kegagalan *starting* mesin, tidak bekerjanya sistem proteksi, *trip* unit tidak terencana, penurunan keandalan operasi, serta meningkatnya risiko kerusakan mesin dan peralatan listrik. Oleh karena itu, keandalan sistem DC menjadi faktor kunci dalam menjaga kontinuitas pembangkitan dan kualitas pasokan daya di PLTD.

Dengan demikian, sistem DC dapat dipandang sebagai fondasi utama dari seluruh rangkaian operasi pembangkit diesel, mulai dari proses *starting*, pengendalian operasi, hingga pengamanan mesin. Keandalan pembangkitan tidak hanya ditentukan oleh kualitas mesin dan generator, tetapi juga sangat bergantung pada kualitas suplai DC. Dalam konteks ini, kegagalan sistem DC dapat dikategorikan sebagai kegagalan sistem kritis (*critical system failure*) karena berpotensi menghentikan produksi daya sekaligus menghilangkan fungsi proteksi. Oleh sebab itu, peningkatan konfigurasi sistem DC

melalui pendekatan sentralisasi menjadi relevan untuk meningkatkan tingkat keandalan, keselamatan operasi, serta kontinuitas pasokan daya.

2.2.7 Sistem DC Terpusat (*Centralized DC Source*)

Sistem sentralisasi DC *source* merupakan konfigurasi sistem di mana satu unit baterai dan *charger* DC utama digunakan untuk menyuplai kebutuhan daya DC bagi beberapa sistem atau unit mesin secara bersamaan. Distribusi daya DC dilakukan melalui panel utama yang dilengkapi dengan sistem proteksi, pemisahan *feeder*, dan pengaturan beban untuk masing-masing unit. Konsep ini bertujuan untuk meningkatkan keandalan suplai DC serta menyederhanakan pengelolaan dan pemeliharaan sistem.

Dibandingkan dengan sistem DC terpisah yang menggunakan baterai dan alternator pengisian pada masing-masing mesin, sistem DC terpusat secara teoritis memiliki beberapa keunggulan. Pengisian baterai dilakukan oleh satu sistem *charger* DC dengan kontrol otomatis yang presisi, sehingga mampu menjaga kestabilan tegangan dan arus pengisian dalam rentang kerja yang aman. Selain itu, pemantauan kondisi baterai, status pengisian, dan gangguan sistem menjadi lebih terpusat dan mudah dikendalikan.



Gambar 2.5 Sistem DC Terpusat unit 7 dan unit 8

Keunggulan utama sistem DC terpusat antara lain efisiensi energi yang lebih tinggi, kemudahan pemeliharaan karena hanya berfokus pada satu sistem baterai dan *charger*, serta peningkatan stabilitas tegangan suplai DC. Sistem ini juga memungkinkan

penerapan redundansi baterai dan *charger* , sehingga risiko kegagalan suplai DC dapat diminimalkan. Dengan adanya sistem proteksi arus lebih dan pemisahan *feeder* untuk tiap unit, gangguan pada satu beban tidak langsung mempengaruhi suplai DC ke unit lainnya.

Namun demikian, penerapan sistem DC terpusat memerlukan perencanaan distribusi yang baik. Salah satu tantangan utama adalah potensi terjadinya penurunan tegangan (voltage drop) pada jalur distribusi DC akibat panjang kabel dan besarnya arus beban. Oleh karena itu, pemilihan ukuran konduktor, pengaturan proteksi *feeder*, serta penerapan sistem selektivitas proteksi menjadi aspek penting dalam perancangan sistem. Mitigasi risiko dilakukan melalui pembagian beban yang jelas, penggunaan proteksi individual pada tiap *feeder*, serta perhitungan kapasitas baterai dan *charger* yang memadai untuk mendukung seluruh beban DC secara simultan.

2.2.8 Parameter Kinerja Sistem DC

Evaluasi terhadap kinerja sistem DC dilakukan dengan mengukur beberapa parameter utama yang menggambarkan efisiensi, kestabilan, dan keandalan sistem. Parameter-parameter ini digunakan secara luas dalam analisis sistem tenaga DC sebagaimana dijelaskan dalam IEEE Std 946-2020, IEC 60364-5-52, serta beberapa penelitian terdahulu (Prabhala, 2018; Putra et al., 2023; Salas-Puente et al., 2017).

a. Efisiensi Sistem (η)

Efisiensi sistem menggambarkan seberapa besar daya keluaran (*output*) yang benar-benar dapat dimanfaatkan dibandingkan dengan total daya masukan (*input*) dari sumber atau *charger* DC.

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\% \quad 2.1$$

Dimana :

η : Efisiensi sistem (%)

Poutput : Daya DC yang diterima oleh beban (Watt)

Pinput : Daya yang disuplai dari *charger* atau sumber utama (Watt)

Menurut Prabhala (2018), efisiensi sistem DC ideal berada pada kisaran 90–95%, tergantung pada rugi energi di konverter, kabel, dan sambungan terminal. Nilai efisiensi

yang rendah menandakan adanya rugi energi signifikan, baik akibat resistansi konduktor maupun ketidakseimbangan distribusi beban. [3]

b. Penurunan Tegangan (*Voltage Drop*)

Penurunan tegangan (*voltage drop*) merupakan salah satu parameter utama dalam menilai kualitas distribusi daya pada sistem DC, khususnya dalam memastikan bahwa tegangan yang diterima oleh beban masih berada dalam batas kerja yang aman. Penurunan tegangan terjadi akibat adanya resistansi pada penghantar yang dilalui arus listrik, sehingga sebagian tegangan sumber hilang sepanjang jalur distribusi.

Besarnya penurunan tegangan secara kuantitatif dapat dinyatakan dalam bentuk persentase terhadap tegangan nominal sistem. Persentase penurunan tegangan digunakan untuk mengevaluasi kelayakan sistem distribusi berdasarkan standar teknis yang berlaku.

Persentase penurunan tegangan dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\% \Delta V = \left(\frac{\Delta V}{V_{\text{nominal}}} \right) \times 100\% \quad 2.2$$

Dimana :

$\% \Delta V$: Persentase penurunan tegangan (%)

ΔV : Penurunan tegangan (Volt)

V_{nominal} : Tegangan nominal sistem (Volt)

Dalam IEC 60364-5-52 disebutkan bahwa untuk sistem kontrol dan proteksi DC, batas maksimal penurunan tegangan yang diizinkan adalah 5% dari tegangan nominal. Jika melebihi nilai tersebut, maka fungsi *relay*, indikator, dan motor starter dapat terganggu (Salas-Puente et al., 2017).[4]

Selain itu, rugi tegangan juga dapat dihitung berdasarkan panjang kabel dan luas penampang konduktor menggunakan persamaan empiris (Arifin & Mahendra, 2022)[5]:

$$\Delta V = \frac{2 \times I \times L \times \rho}{A} \quad 2.3$$

Dimana :

L : Panjang kabel (meter)

P : Tahanan jenis konduktor (Ohm.mm²/m)

A : Luas penampang kabel (mm²)

Rumus ini digunakan untuk menentukan ukuran kabel minimum agar rugi tegangan tetap di bawah batas aman.

c. Keandalan Sistem (*Availability*)

Keandalan sistem menunjukkan seberapa besar kemungkinan sistem DC dapat beroperasi dengan baik tanpa gangguan dalam periode waktu tertentu. Parameter ini umumnya dinyatakan dalam bentuk rasio antara waktu operasi yang berhasil (*uptime*) terhadap total waktu sistem beroperasi.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad 2.4$$

Dimana :

A : *Availability* (tingkat keandalan sistem)

MTBF : *Mean Time Between Failure* (rata-rata waktu antar kegagalan)

MTTR : *Mean Time To Repair* (rata-rata waktu perbaikan)

Menurut IEEE Std 493-2007 (Gold Book), sistem suplai daya yang dikategorikan andal umumnya memiliki nilai *availability* > 0,999, atau dikenal dengan istilah three nines reliability. Dalam konteks sistem DC pembangkit, nilai keandalan dipengaruhi oleh faktor umur baterai, keandalan *charger* , dan konfigurasi proteksi.

Putra et al. (2023) menunjukkan bahwa penerapan sistem DC terpusat dengan redundansi proteksi mampu meningkatkan nilai *availability* dari 0,985 menjadi 0,998 pada sistem proteksi panel 20 kV.[6]

d. Arus Pengisian Baterai Maksimum

Arus pengisian baterai harus dijaga agar tidak melampaui batas aman untuk menghindari overheating dan degradasi elektrolit. Nilai arus maksimum pengisian (*I_c*) umumnya dihitung dengan:

$$I_c = 0.1C \text{ sampai } 0.2C \quad 2.5$$

Dimana :

I_c : Arus pengisian maksimum (*Ampere*)

C : Kapasitas baterai (*Ampere-hour, Ah*)

Menurut IEEE Std 1188-2021 tentang pemeliharaan baterai stasioner, pengisian dengan arus di atas $0.2C$ dapat mempercepat korosi pelat dan meningkatkan suhu internal baterai hingga di atas batas aman ($50-55^{\circ}\text{C}$). Kondisi inilah yang sering terjadi pada sistem eksisting PLTD Sawai Baru, di mana alternator menghasilkan arus pengisian tidak terkontrol akibat kegagalan regulator.

e. Rugi Daya Distribusi

Selain rugi tegangan, rugi daya juga menjadi indikator penting dalam menilai efisiensi keseluruhan sistem distribusi DC.

$$P_{loss} = I^2 \times R \quad 2.6$$

Dimana :

P_{loss} : Rugi daya pada penghantar (*Watt*)

I : Arus beban (*Ampere*)

R : Resistansi kabel atau konduktor (*Ohm*)

Nilai *power loss* yang tinggi tidak hanya menurunkan efisiensi, tetapi juga menyebabkan pemanasan pada kabel distribusi yang dapat memperpendek umur isolasi (Prabhala, 2018).[7]

Parameter-parameter kinerja sistem DC tersebut menjadi dasar dalam melakukan evaluasi kondisi sistem DC eksisting pada pembangkit, khususnya dalam menilai tingkat efisiensi, kestabilan tegangan, dan keandalan suplai DC. Analisis berdasarkan parameter ini akan dibahas lebih lanjut pada Bab IV.