TUGAS AKHIR

DAMPAK PERUBAHAN BEBAN TERHADAP EFISIENSI PADA GENERATOR SET DIESEL CUMMINS 275 KVA DI PTPN IV REGIONAL I GUNUNG PAMELA

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh

Gelar Sarjana Teknik Elektro Pada Fakultas Teknik

Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Oleh:

REYNALDI IKHSAN PURBA
2207220103

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

MEDAN

2026

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama	: Reynaldi Ikhsan Purba
NPM	2207220103
Program Studi	: Teknik Elektro
Judul Skripsi	: Dampak Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Pada Generator Set Diesel Cummins 275 KVA Di PTPN IV Regional 1 Gunung Pamela
Bidang ilmu	: Sistem Tenaga

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 3 September 2026

Mengetahui dan menyetujui:
Dosen Pembimbing

Benny Oktrialdi,S.T.,M.T.

Dosen Pembanding I/Penguji

Dr. Rimbawati, S.T., M.T.

Dosen Pembanding II/Penguji

Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

Program Studi Teknik Elektro
Ketua,

Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap	: Reynaldi Ikhsan Purba
Tempat/Tgl Lahir	: Gunung Pamela, 30 Agustus 2004
NPM	2207220103
Fakultas	: Teknik
Program Studi	: Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul:

"DAMPAK PERUBAHAN BEBAN TERHADAP EFISIENSI PADA GENERATOR SET DIESEL CUMMINS 275 KVA DI PTPN IV REGIONAL 1 GUNUNG PAMELA"

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 3 September 2026
Saya yang menyatakan,



Reynaldi Ikhsan Purba

ABSTRAK

Kebutuhan pasokan energi listrik cadangan di PTPN IV Regional I Gunung Pamela didukung oleh fasilitas generator set diesel Cummins dengan kapasitas 275 kVA. Kondisi operasional fasilitas yang menyuplai perkantoran, perumahan, dan pompa air ini menghasilkan profil pembebanan yang sangat fluktuatif. Variasi pembebanan tersebut secara langsung memengaruhi kinerja operasional, tingkat konsumsi bahan bakar, dan efisiensi sistem konversi energi generator. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak perubahan beban terhadap tingkat efisiensi dan *Specific Fuel Consumption* (SFC) pada generator set diesel tersebut. Metode yang digunakan adalah pendekatan deskriptif kuantitatif melalui observasi lapangan dan perhitungan data operasional (logbook) yang diklasifikasikan ke dalam empat skenario pembebanan representatif, yaitu dari beban terendah 35 kVA hingga beban puncak 110 kVA. Hasil analisis matematis menunjukkan adanya korelasi positif antara persentase beban dengan efisiensi sistem. Pada kondisi beban terendah (35 kVA atau 12,72% dari kapasitas), efisiensi operasional berada di titik terendah yaitu 14,15% dengan nilai SFC yang sangat boros sebesar 0,714 Liter/kWh. Sebaliknya, pada saat beban puncak siang hari (110 kVA atau 40,00%), tingkat efisiensi meningkat secara signifikan mencapai 32,36% dengan konsumsi bahan bakar yang lebih efektif di angka SFC 0,312 Liter/kWh. Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa generator set Cummins 275 kVA bekerja secara terus-menerus dalam kondisi *underload* karena belum menyentuh titik pembebanan optimal mesin diesel di kisaran 60% – 80%. Kondisi ini mengakibatkan generator beroperasi dengan efisiensi yang kurang maksimal akibat dominasi rugi-rugi daya konstan pada saat beban kelistrikan rendah.

Kata Kunci: Efisiensi, Generator Set Diesel, Perubahan Beban, *Specific Fuel Consumption*, *Underload*.

ABSTRACT

The requirement for a reliable standby power supply at PTPN IV Regional I Gunung Pamela is supported by a 275 kVA Cummins diesel generator set. The operational condition of this facility, which supplies offices, housing, and water pumps, generates a highly fluctuating load profile. These load variations directly affect operational performance, fuel consumption levels, and the energy conversion efficiency of the generator. This study aims to analyze the impact of load changes on the efficiency and Specific Fuel Consumption (SFC) of the diesel generator set. The research method used is a quantitative descriptive approach through field observation and calculation of operational data (logbook) classified into four representative load scenarios, ranging from a minimum load of 35 kVA to a peak load of 110 kVA. The mathematical analysis results show a positive correlation between load percentage and system efficiency. At the lowest load condition (35 kVA or 12.72% of capacity), the operational efficiency is at its minimum of 14.15% with a highly inefficient SFC value of 0.714 Liters/kWh. Conversely, during the daytime peak load (110 kVA or 40.00%), the efficiency level significantly increases to 32.36% with a more effective fuel consumption at an SFC of 0.312 Liters/kWh. The conclusion of this study indicates that the 275 kVA Cummins generator set continuously operates under an underload condition as it has not reached the optimal diesel engine load point in the range of 60% – 80%. This condition causes the generator to operate with suboptimal efficiency due to the dominance of constant power losses when the electrical load is low.

Keywords: *Efficiency, Diesel Generator Set, Load Variations, Specific Fuel Consumption, Underload.*

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَٰنِ الرَّحِيمِ

Assalamualaikum Wr. Wb.

Tidak ada kata lain untuk menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Allah SWT kecuali ucapan syukur atas segala nikmat dengan curahan kasih sayang-nya atas selesainya penelitian ini dengan baik, dengan judul "Dampak Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Pada Generator Set Diesel Cummins 275kVA Di PTPN IV Regional I Gunung Pamela".

Penulisan penelitian ini dimaksudkan untuk melengkapi sebagian persyaratan meraih gelar sarjana di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Jurusan Teknik Elektro.dalam menyusun penelitian ini penulis tidak dapat melupakan jasa orang-orang yang telah ikut berperan serta sehingga penelitian ini dapat selesai.

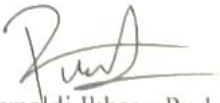
Oleh karena itu,pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Pada Allah SWT dan terkhusus kepada kedua orang tua saya: Ayahanda Junaidi Amonangan Purba Dan Ibu Wulandari Terimakasih selalu berjuang tanpa mengenal kata lelah dan menyerah demi mengupayakan yang terbaik untuk kehidupan penulis,beliau memang tidak sempat merasakan pendidikan sampai bangku perkuliahan,namun beliau mampu mendidik penulis,memotivasi penulis,memberikan dukungan dan semangat serta selalu mengajarkan kebaikan dalam hidup sehingga penulis mampu menyelesaikan studinya sampai sarjana.sekali lagi,terimakasih setiap cucur keringat dan kerja keras yang engkau tukarkan menjadi sebuah nafkah hingga anakmu bisa sampai di tahap ini.
2. Bapak Prof.Dr. Agussani,M,AP.,selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Assoc.Prof.Ir.Ade Faisal ST,M.Sc.PH.D.,selaku Dekan Fakultas Teknik,Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

5. Kepada Bapak Benny Oktrialdi,S.T.,M.T.,sebagai Sekretaris Program Studi Teknik Elektro,Universitas muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Kepada Bapak Benny Oktrialdi,S.T.,M.T.,sebagai dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas akhir ini.
7. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di program Studi Teknik Elektro,Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara,yang telah banyak memberikan ilmu tentang keteknikelektroan kepada penulis.
8. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik,Universitas Muhammdiyah Sumatera Utara.
9. Sahabat-sahabat penulis seperjuangan : M Khoirul Ikhsan, Irshandi Mahdani Nst, M Dede Taufik. serta sahabat-sahabat yang selalu membersamai penulis.
10. Saya ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada "Annisa Qomariah" atas kesabaran dan dukunganmu selama proses penyelesaian skripsi ini. Saya sangat beruntung karena memiliki seseorang yang sangat baik hati sepertimu.
11. Dan seluruh keluarga yang selalu mendoakan dan mensupport penulis sehingga skripsi ini dapat selesai.

Semoga segala bentuk bantuan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang setimpal dari Tuhan Yang Maha Esa. Penulis menyadari bahwa proposal ini masih jauh dari kesempurnaan, baik dari bentuk penyusunan maupun materinya. Kritik konstruktif dari pembaca sangat penulis harapkan untuk penyempurnaan proposal selanjutnya. Akhir kata, semoga proposal ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca sekalian.

Medan, Mei 2026



Reynaldi Ikhsan Purba

DAFTAR ISI

ABSTRAK ..... **i**
KATA PENGANTAR ..... **iii**
DAFTAR ISI ..... **v**
DAFTAR GAMBAR ..... **viii**
DAFTAR TABEL ..... **ix**
DAFTAR LAMPIRAN ..... **x**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Manfaat Penelitian 4
1.5 Batasan Masalah 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **6**
2.1 Generator Set Diesel 6
2.2 Mesin Diesel 11
2.3 Generator Sinkron 12
2.4 Generator Set Diesel Cummins 275kVA 18
2.5 Beban Listrik pada Generator Set 20
2.6 Pembebanan Generator Set 21
2.6.1 Overload 22
2.6.2 Underload 24
2.7 Konsumsi Bahan Bakar Generator Diesel 24
2.8 Efisiensi Generator Set Diesel 25
2.9 Rugi-Rugi pada Generator 26
2.9.1 Rugi Tembaga (*Copper Losses*) 27
2.9.2 Rugi Besi (*Core/Iron Losses*) 27
2.10 Daya Listrik Generator 28
2.10.1 Daya Aktif 29
2.10.3 Faktor Daya 30
2.10.5 Single Line Diagram (SLD) 1 Fasa dan 3 Fasa 32
2.11 Penelitian Terdahulu 37
BAB III METODOLOGI PENELITIAN **39**
3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian 39
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian 39

3.2.1 Tempat Penelitian 39
3.2.2 Waktu Penelitian 39
3.3 Objek dan Subjek Penelitian 40
3.4 Variabel Penelitian 40
3.4.1 Variabel Bebas (*Independent Variable*) 40
3.5 Alat dan Bahan 42
3.5.1 Alat 42
3.5.2 Bahan 42
3.6 Prosedur Penelitian 42
3.7 Teknik Analisis Data 42
3.7.1 Perhitungan Daya Generator 43
3.7.2 Perhitungan Persentase Beban 44
3.7.3 Perhitungan Efisiensi Generator 44
3.7.4 Perhitungan Specific Fuel Consumption 45
3.8 Pengambilan Data Penelitian 46
3.9 Teknik Pengumpulan Data 47
3.10 Diagram Alir Penelitian 49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 52
4.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian 52
4.2 Data Hasil Penelitian 52
4.2.1 Karakteristik Pembebanan Generator 53
4.2.2 Data Operasional dan Konsumsi Bahan Bakar 53
4.2.3 Parameter Operasional Mesin dan Kelistrikan 55
4.2.4 Sampel Fluktuasi Durasi Operasional Harian 55
4.2.5 Analisis Awal Layar Instrumen Panel Kontrol (HMI) 56
4.3 Analisis Data 56
4.3.1 Perhitungan Persentase Pembebanan 57
4.3.2 Perhitungan Specific Fuel Consumption (SFC) 57
4.3.3 Perhitungan Efisiensi Aktual Generator Set 58
4.3.4 Rekapitulasi Hasil Analisis 59
4.4 Pembahasan 59
4.4.1 Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator Set Diesel. 60

4.4.2 Hubungan Perubahan Beban dengan Konsumsi Bahan Bakar 62
4.4.3 Evaluasi Kondisi Operasional dan Fenomena *Underload* 64
BAB V KESIMPULAN 66
5.1 Kesimpulan 66
5.2 Saran 66
DAFTAR PUSTAKA 68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Generator Set Diesel..... 7
Gambar 2.2 Generator Set Bensin..... 8
Gambar 2.3 Generator Set gas 9
Gambar 2.4 Generator Set Portable 10
Gambar 2.5 Generator Set Silent 10
Gambar 2.6 Generator 3 Fasa..... 14
Gambar 2.8 Gambar Rangkaian 3 Fasa..... 17
Gambar 2.7 Nameplate Generator Set Cummins 275 kVA 19
Gambar 2.8 Nameplate Alternator Generator Set Cummins 275 kVA..... 20
Gambar 2.9 Segitiga Daya(Power Triangel)..... 31
Gambar 2.10 Single line diagram 1 Fasa 32
Gambar 2.11 Single line diagram 3 Fasa 33
Gambar 2.12 Visualisasi Faktor daya (Faktor Beban)..... 35
Gambar 4.1 Grafik Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator... 61
Gambar 4.2 Grafik hubungan pembebabnan dengan spesific fuel consumption.. 63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data Sistem 1 Fasa 16
Tabel 2.2 Data Sistem 3 Fasa 17
Tabel 2.3 Spesifikasi Generator Set Cummins 275kVA 18
Tabel 2.4 Penelitian Terdahulu 37
Tabel 3.1 Waktu Pelaksanaan Penelitian 39
Tabel 3.2 Alat dan Bahan penelitian 42
Tabel 4.1 Waktu Operasi dan Konsumsi Bahan Bakar (Mei - Juni 2026) 54
Tabel 4.2 Sampel Durasi Operasional dan Konsumsi BBM (Mei 2026) 55
Tabel 4.3 Hasil Analisis Kinerja Generator Set Cummins 275 kVA 59

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Penelitian 69
Lampiran 2 Logbook Penelitian 69
Lampiran 3 Spesifikasi Generator 69

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik yang andal dan berkelanjutan merupakan aspek penting dalam mendukung aktivitas perkantoran, pemukiman, serta fasilitas umum. Pada wilayah yang pasokan listriknya masih berpotensi mengalami gangguan atau pemadaman dari jaringan PLN, keberadaan generator set (genset) diesel menjadi solusi utama sebagai sumber listrik cadangan. Oleh karena itu, keandalan dan kinerja generator set perlu dijaga agar mampu menyuplai beban listrik secara optimal saat dibutuhkan.

Kamar mesin generator set di PTPN IV Regional I Gunung Pamela merupakan fasilitas kelistrikan yang telah beroperasi dalam jangka waktu yang cukup lama. Pada awalnya, kamar mesin ini difungsikan untuk menyuplai kebutuhan listrik sebuah pabrik karet yang beroperasi di kawasan tersebut. Namun, sejak memasuki tahun 2000-an, pabrik tersebut tidak lagi beroperasi sehingga fungsi sistem kelistrikan mengalami perubahan. Saat ini, generator set lebih difokuskan sebagai sumber listrik cadangan untuk mendukung kebutuhan operasional rumah staff, kantor, serta fasilitas umum lainnya.

Pada masa sebelumnya, kamar mesin ini mengoperasikan tiga unit generator set diesel yang memiliki usia pemakaian relatif lama. Namun, akibat faktor umur peralatan dan keterbatasan kondisi teknis, saat ini hanya tersisa dua unit generator set, dan dari jumlah tersebut hanya satu unit generator yang masih dapat beroperasi secara normal, yaitu generator set diesel merek Cummins dengan kapasitas 275 kVA yang mulai dipasang dan dioperasikan sejak tahun 2015.

Generator set Cummins 275 kVA tersebut saat ini berfungsi sebagai sumber listrik cadangan ketika terjadi pemadaman listrik dari PLN. Beban listrik yang disuplai meliputi rumah-rumah karyawan pimpinan, kantor PTPN IV Regional I Gunung Pamela, tempat ibadah, mesin air, serta penerangan jalan. Seiring berjalannya waktu, perubahan beban listrik dapat terjadi akibat bertambahnya fasilitas, peningkatan kebutuhan energi, maupun perubahan pola pemakaian listrik di kawasan tersebut.

Perubahan beban pada generator set diesel memberikan pengaruh langsung terhadap kinerja operasional generator, khususnya terhadap efisiensi kerja. Efisiensi generator merupakan perbandingan antara daya keluaran listrik dengan energi masukan dari bahan bakar yang digunakan. Generator yang bekerja pada kondisi beban terlalu rendah maupun mendekati kapasitas maksimum berisiko mengalami penurunan efisiensi, peningkatan konsumsi bahan bakar, serta menurunnya performa operasional. Kondisi ini dapat menyebabkan pemborosan energi dan mempercepat penurunan umur pakai generator.

Selain itu, generator set Cummins 275 kVA telah beroperasi sejak tahun 2015 dan menjadi satu-satunya unit generator aktif yang digunakan sebagai sumber listrik cadangan. Oleh karena itu, diperlukan kajian teknis untuk mengetahui sejauh mana perubahan beban memengaruhi efisiensi generator tersebut. Analisis ini penting dilakukan untuk mengetahui kondisi operasi yang paling optimal, menghindari pembebanan yang tidak efisien, serta menjadi dasar dalam pengelolaan sistem kelistrikan yang lebih baik.

Secara teoritis, pembebanan pada generator set diesel sangat memengaruhi karakteristik kinerja mesin dan generator. Peningkatan beban akan menyebabkan kenaikan arus keluaran yang berdampak pada meningkatnya daya mekanik yang harus disuplai oleh mesin diesel. Kondisi ini berpengaruh terhadap efisiensi konversi energi, konsumsi bahan bakar, dan kestabilan kerja generator. Generator yang beroperasi pada beban yang tidak sesuai kapasitas kerjanya akan mengalami penurunan efisiensi sistem.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perubahan beban sangat memengaruhi efisiensi generator set diesel. Penelitian yang dilakukan oleh UNM tahun 2022 menunjukkan bahwa efisiensi generator mengalami penurunan akibat perubahan beban yang tidak stabil. Selain itu, penelitian lain mengenai karakteristik performa generator diesel menyatakan bahwa efisiensi generator cenderung optimal pada kondisi pembebanan sekitar 60%–80% dari kapasitas generator. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa perubahan beban berpengaruh terhadap konsumsi bahan bakar dan performa operasional generator set diesel.

Apabila perubahan beban tidak dianalisis dengan baik, generator set dapat beroperasi pada kondisi yang tidak optimal, sehingga menyebabkan pemborosan

bahan bakar, penurunan efisiensi, serta meningkatnya risiko kerusakan pada generator. Kondisi ini sangat penting diperhatikan karena generator set Cummins 275 kVA merupakan satu-satunya unit generator aktif yang digunakan sebagai sumber listrik cadangan di PTPN IV Regional I Gunung Pamela.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu penelitian untuk menganalisis dampak perubahan beban terhadap efisiensi pada generator set diesel Cummins 275 kVA di PTPN IV Regional I Gunung Pamela. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran kondisi operasional generator berdasarkan variasi beban yang terjadi, serta menjadi bahan pertimbangan dalam pengoperasian generator secara lebih efektif, efisien, dan andal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi generator set diesel Cummins 275 kVA di PTPN IV Regional I Gunung Pamela?
2. Bagaimana hubungan perubahan beban dengan konsumsi bahan bakar pada generator set diesel Cummins 275 kVA?
3. Bagaimana kondisi pembebanan generator set diesel Cummins 275 kVA bekerja pada tingkat efisiensi yang paling optimal?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi generator set diesel Cummins 275 kVA di PTPN IV Regional I Gunung Pamela.
2. Mengetahui hubungan antara perubahan beban dengan konsumsi bahan bakar generator set diesel.
3. Menentukan kondisi pembebanan yang menghasilkan tingkat efisiensi operasional paling optimal pada generator set.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan gambaran mengenai kondisi efisiensi generator set diesel Cummins 275 kVA berdasarkan perubahan beban yang terjadi di PTPN IV Regional I Gunung Pamela.
2. Menjadi bahan pertimbangan bagi pihak pengelola dalam menentukan pengoperasian generator set yang lebih efisien, hemat bahan bakar, dan sesuai dengan kapasitas kerja generator.
3. Membantu dalam mengetahui batas pembebanan yang optimal sehingga dapat menghindari terjadinya overload maupun underload yang dapat menurunkan performa generator.
4. Menjadi dasar evaluasi dalam perencanaan pemeliharaan dan pengembangan sistem kelistrikan berbasis generator set agar lebih andal dan berkelanjutan.
5. Menambah referensi ilmiah di bidang teknik elektro, khususnya mengenai pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi generator set diesel, serta dapat menjadi acuan untuk penelitian selanjutnya.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan, maka diperlukan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan pada generator set diesel merek Cummins dengan kapasitas 275 kVA yang digunakan sebagai sumber listrik cadangan di PTPN IV Regional I Gunung Pamela.
2. Analisis penelitian hanya membahas dampak perubahan beban terhadap efisiensi operasional generator set diesel.
3. Perubahan beban yang dimaksud adalah variasi beban listrik yang disuplai generator set untuk rumah staff, kantor, tempat ibadah, mesin air, dan fasilitas umum lainnya.
4. Parameter yang dianalisis meliputi daya keluaran generator, konsumsi bahan bakar, dan efisiensi generator berdasarkan kondisi pembebanan yang terjadi.

5. Penelitian tidak membahas secara mendalam mengenai kerusakan mekanis mesin diesel, sistem proteksi generator, maupun gangguan dari jaringan PLN.
6. Data penelitian diperoleh berdasarkan kondisi operasional aktual generator set pada saat digunakan sebagai sumber listrik cadangan selama terjadi pemadaman listrik dari PLN.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator Set Diesel

Generator set atau genset merupakan suatu perangkat yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Generator set terdiri dari dua komponen utama, yaitu mesin penggerak (engine) dan generator atau alternator. Mesin penggerak berfungsi menghasilkan energi mekanik berupa putaran, sedangkan generator berfungsi mengubah energi mekanik tersebut menjadi energi listrik(Prasetyo, Zaki Latif Abrori, and Nurfauzi 2021).

Pada umumnya, mesin penggerak yang digunakan pada generator set berupa mesin diesel berbahan bakar solar maupun mesin bensin. Sementara itu, generator atau alternator terdiri dari komponen stator dan rotor. Stator merupakan bagian diam yang berisi kumparan, sedangkan rotor merupakan bagian yang berputar untuk menghasilkan medan magnet sehingga terjadi induksi elektromagnetik. Generator listrik menghasilkan energi listrik dari sumber energi mekanik yang diperoleh melalui proses pembakaran bahan bakar pada mesin diesel. Oleh karena itu, diesel generator dapat diartikan sebagai suatu sistem pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utama generator dengan memanfaatkan bahan bakar diesel atau solar.

Berdasarkan jenis arus yang dihasilkan, generator dibedakan menjadi dua jenis, yaitu generator arus bolak-balik (AC) dan generator arus searah (DC). Pada generator AC, energi listrik dihasilkan melalui perputaran kumparan dalam medan magnet sehingga menghasilkan tegangan bolak-balik. Dalam penggunaannya, generator set banyak dimanfaatkan sebagai sumber listrik cadangan ketika terjadi gangguan atau pemadaman pada jaringan listrik utama. Selain itu, generator set juga digunakan pada daerah atau instalasi tertentu yang membutuhkan kontinuitas suplai energi listrik secara handal(Kemenkeu RI 2026).

Generator adalah konverter yang digunakan untuk mengubah energi kimia atau kinetik menjadi energi listrik pada sebuah pembangkit listrik. Generator memiliki peranan beserta fungsi yang sangat penting dalam kelangsungan proses kinerja sebuah pembangkit listrik. Kemampuan generator untuk mengkoversi

suatu energi menjadi suatu energi listrik yang sangat bermanfaat, ditunjang pula oleh suatu perangkat dan controlling lainnya. Dimana perangkat controlling tersebut berpengaruh terhadap kemampuan optimal sebuah generator dalam menjalankan fungsingnya yang berperan untuk memenuhi kebutuhan pasokan listrik dilingkungan perusahaan industri dengan menggunakan generator sebagai alat konverternya (Manguma, Sompotan, and Nusa 2021).

2.1.1 Jenis-Jenis Generator Set

Generator set (genset) memiliki berbagai jenis dan kapasitas yang digunakan sesuai kebutuhan sistem tenaga listrik. Perbedaan generator set dapat dilihat berdasarkan jenis bahan bakar, kapasitas daya, sistem fasa, dan fungsi operasionalnya.Berikut merupakan beberapa jenis generator set yang umum dijual di pasaran:

1. Generator Set Diesel

Generator set diesel merupakan genset yang menggunakan bahan bakar solar sebagai sumber energi utama. Jenis generator ini banyak digunakan pada industri, perkantoran, rumah sakit, dan sistem cadangan listrik karena memiliki daya yang besar dan konsumsi bahan bakar yang relatif efisien(Fadilah, Yahya, and Ilman 2024).



Gambar 2.1 Generator Set Diesel

Sumber : Dokumentasi. kamar generator PTPN IV Gunung Pamela

Spesifikasi umum:

Kapasitas: 5 kVA – 2000 kVA

Tegangan: 220/380 V

Frekuensi: 50 Hz

Sistem: 1 fasa dan 3 fasa

2. Generator Set Bensin

Generator set bensin menggunakan bahan bakar bensin dan umumnya digunakan untuk kebutuhan rumah tangga atau usaha kecil dengan kapasitas daya rendah.



Gambar 2.2 Generator Set Bensin

Sumber : honda-et-12000-generator-bensin

Spesifikasi umum:

Kapasitas: 1 kVA – 10 kVA

Tegangan: 220 V

Frekuensi: 50 Hz

Sistem: 1 fasa

3. Generator Set Gas

Generator set gas menggunakan bahan bakar gas alam atau LPG. Generator jenis ini memiliki emisi gas buang yang lebih rendah dibandingkan generator diesel.



Gambar 2.3 Generator Set gas

Sumber : powerline.co.id

Spesifikasi umum:

Kapasitas: 10 kVA – 1000 kVA

Tegangan: 220/380 V

Frekuensi: 50 Hz

4. Generator Set Portable

Generator set portable merupakan genset berukuran kecil yang mudah dipindahkan dan biasanya digunakan untuk kegiatan lapangan atau kebutuhan darurat. Generator set portable merupakan suatu perangkat pembangkit listrik yang dirancang untuk menghasilkan energi listrik dan dapat dipindahkan dari satu tempat ke tempat lainnya sesuai dengan kebutuhan. Generator set ini bekerja dengan mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh mesin penggerak menjadi energi listrik melalui alternator atau generator. Mesin penggerak yang digunakan dapat berupa mesin diesel, bensin, maupun jenis mesin lainnya yang sesuai dengan kapasitas dan kebutuhan pengguna.

Berbeda dengan generator set yang dipasang secara permanen, generator set portable memiliki konstruksi yang lebih sederhana, ringkas, dan mudah dipindahkan. Pada umumnya, generator set portable dilengkapi dengan rangka atau frame sebagai tempat pemasangan mesin dan alternator. Beberapa jenis juga

dilengkapi dengan roda dan pegangan sehingga lebih mudah dibawa atau dipindahkan ke lokasi yang membutuhkan sumber listrik.



Gambar 2.4 Generator Set Portable

Sumber : jual-genset-portable

Spesifikasi umum:

1. Kapasitas: 1 kVA – 5 kVA
2. Tegangan: 220 V
3. Sistem: 1 fasa

5. Generator Set Silent

Generator set silent merupakan genset yang dilengkapi peredam suara sehingga tingkat kebisingan lebih rendah dibandingkan genset konvensional.



Gambar 2.5 Generator Set Silent

Sumber : pengertian-generator-set-penjelasan-lengkap-dari-hartech

Spesifikasi umum:

1. Kapasitas: 5 kVA – 1000 kVA
2. Tegangan: 220/380 V
3. Sistem: 1 fasa dan 3 fasa

Dari berbagai jenis generator set yang tersedia di pasaran, generator set diesel memiliki tingkat keandalan yang tinggi untuk digunakan pada sistem kelistrikan industri maupun sumber listrik cadangan. Generator set diesel juga mampu bekerja pada kapasitas daya besar dengan efisiensi operasional yang relatif baik dibandingkan jenis generator lainnya. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan generator set diesel Cummins 275 kVA sebagai objek penelitian untuk menganalisis dampak perubahan beban terhadap efisiensi generator pada kondisi operasional aktual di PTPN IV Regional I Gunung Pamela.

2.2 Mesin Diesel

Mesin diesel merupakan mesin pembakaran dalam yang menggunakan bahan bakar solar sebagai sumber energi utama. Mesin diesel bekerja berdasarkan prinsip pembakaran akibat tekanan tinggi tanpa menggunakan busi seperti pada mesin bensin.

Mesin diesel merupakan jenis mesin dengan pembakaran internal, di mana proses pembakaran terjadi di dalam mesin itu sendiri. Proses ini diawali dengan pemampatan udara murni di dalam ruang bakar (silinder), yang menghasilkan tekanan dan suhu yang sangat tinggi. Pada saat yang bersamaan, bahan bakar disemprotkan atau dikabutkan ke dalam ruang bakar, menyebabkan terjadinya pembakaran. Ledakan yang dihasilkan dari pembakaran tersebut meningkatkan tekanan di dalam ruang bakar, yang kemudian mendorong piston bergerak ke bawah, dan gerakan ini diteruskan untuk memutar poros engkol (Syahrial, 2018). Berdasarkan gerakan piston dalam menjalankan satu siklus pembakaran, mesin diesel dibagi menjadi dua jenis, yaitu mesin diesel 4 langkah (4 tak) dan mesin diesel 2 langkah (2 tak)(Ardiansyah, Syahputra, and Maimun 2024).

Pada mesin diesel 4 tak, satu kali siklus pembakaran membutuhkan empat kali gerakan piston atau dua kali putaran poros engkol. Sementara itu, pada mesin diesel 2 tak, hanya dibutuhkan dua kali gerakan piston atau satu kali putaran poros engkol untuk menyelesaikan satu siklus pembakaran (Rahman, 2018).

Langkah kerja pada mesin diesel 4 tak terdiri dari empat tahapan utama, yaitu langkah hisap, langkah kompresi, langkah usaha atau kerja, dan langkah pembuangan. Mesin diesel 4 tak memiliki beberapa keunggulan, antara lain sistem pelumasan yang lebih sempurna, interval perbaikan (overhaul) yang lebih panjang, daya tahan mesin yang lebih baik untuk penggunaan jarak jauh, serta konsumsi bahan bakar yang lebih efisien dan ramah lingkungan karena sistem pembakaran yang lebih optimal serta minimnya gas yang terbuang. Namun, mesin diesel 4 tak juga memiliki beberapa kelemahan, seperti konstruksinya yang lebih rumit serta akselerasi yang lebih lambat dibandingkan mesin jenis lain (Rahman, 2018).

2.3 Generator Sinkron

Sejarah generator sinkron dimulai dari pergeseran paradigma ilmu pengetahuan pada abad ke-19, di mana para ilmuwan mulai beralih dari penggunaan baterai kimia ke induksi mekanis untuk menghasilkan listrik. Penemuan Michael Faraday pada tahun 1831 mengenai induksi elektromagnetik menjadi batu pijakan utama. Namun, pada masa itu, fokus utama dunia adalah arus searah (DC). Baru pada tahun 1880-an, Nikola Tesla membawa revolusi dengan konsep sistem polifase. Tesla menyadari bahwa untuk mengirimkan tenaga listrik melintasi jarak yang luas, diperlukan arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan oleh mesin yang berputar selaras (sinkron) dengan frekuensi sistemnya. Keberhasilan sistem ini diuji secara besar-besaran pada proyek Air Terjun Niagara tahun 1895, yang menandai berakhirnya "Perang Arus" (War of Currents) antara Edison dan Tesla. Memasuki abad ke-20, desain generator sinkron mengalami penyempurnaan teknis. Penggunaan elektromagnet sebagai pengganti magnet permanen pada rotor memungkinkan pengendalian tegangan yang lebih presisi. Munculnya turbin uap berkecepatan tinggi juga memaksa perubahan bentuk rotor dari kutub menonjol (salient pole) menjadi rotor silinder yang lebih aerodinamis dan kuat secara mekanis untuk menahan gaya sentrifugal(Propulsion, Ditinjau, and Konsumsi 2018).

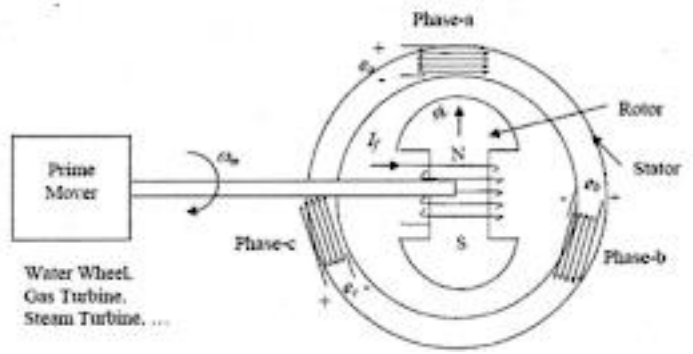
Generator arus bolak-balik disebut juga generator sinkron atau alternator, memberikan hubungan penting dalam proses perubahan energi ke dalam bentuk yang bermanfaat. Generator sinkron adalah mesin sinkron yang mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik. Generator bekerja berdasarkan prinsip kerja induksi elektromagnetik atau fluksi yang kemudian mengubah energi listrik. Azas

generator yang bekerja berdasarkan : Hukum Induksi Faraday : “Apabila jumlah garis gaya yang melalui kumparan diubah, maka gaya gerak listrik diinduksikan dalam kumparan itu. Besarnya gaya gerak listrik yang diinduksikan berbanding lurus dengan laju perubahan jumlah garis gaya melalui kumparan”(S Armansyah 2016).

Generator sinkron merupakan alat listrik yang mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik dengan prinsip induksi elektromagnetik. Dalam sistem pembangkitan generator yang umum digunakan adalah generator sinkron dimana frekuensi keluaran generator sama dengan putaran rotor generator. Ketika generator menanggung beban listrik yang bervariasi, generator umum dioperasikan secara paralel. Dikatakan generator sinkron karena kecepatan putaran medan magnet sama dengan kecepatan putaran rotor generator, sehingga kecepatan sinkron dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Kumparan medan generator sinkron terdapat pada rotor, sedangkan kumparan jangkar terdapat pada stator. Rotor generator sinkron yang terdiri dari belitan medan yang disuplai dengan arus searah akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan putar rotor. Karena kecepatan putaran medan magnet sama dengan kecepatan putaran rotor generator, maka generator sinkron ini akan menghasilkan energi listrik bolak balik (AC) (Tambunan et al. 2026).

Generator sinkron adalah mesin listrik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak–balik (AC) yang bekerja dengan cara mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet. Generator ini dikatakan sebagai generator sinkron dikarenakan jumlah putaran rotornya sesuai dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Rotor generator sinkron diputar oleh penggerak mula (*prime mover*) yang terdiri dari belitan medan yang disuplai dengan arus searah akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan dan arah putaran yang sama dengan putaran rotor tersebut. Medan putar yang dihasilkan pada rotor, akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga kumparan jangkar yang di stator akan dihasilkan fluks magnetik yang besarnya berubah–ubah terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu

kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung–ujung kumparan tersebut (Mustofa and Roihatin 2024).



Gambar 2.6 Generator 3 Fasa

Generator tiga fasa menghasilkan tegangan listrik AC pada tiga saluran keluaran, yaitu Phase a, Phase b, dan Phase c. Di bagian tengah sistem terdapat rotor berupa magnet dengan kutub utara (N) dan selatan (S) yang berputar. Perputaran rotor ini menghasilkan medan magnet berputar yang menjadi sumber utama pembangkitan tegangan listrik seperti pada gambar 2.2 (Miftah Farhan, Rahmat Hidayat 2021).

Pada generator terdapat sistem penguatan medan (sistem eksitasi) yang mempunyai fungsi sangat penting untuk proses pembangkitan. Sistem eksitasi dapat mempengaruhi kinerja generator jika sistem tersebut diberikan pembebanan seperti beban resistif, induktif dan kapasitif. Oleh karena itu, generator harus mampu membangkitkan daya listrik sesuai dengan besarnya beban yang diberikan(Muchsin Harahap, Nugraha, and M SolehNasution 2021).

Dalam mengoperasikan motor sinkron sebagai generator sinkron adalah motor sinkron tidak memiliki penguatan medan atau eksitasi sendiri (self excitation), sehingga dibutuhkan catu daya tegangan DC yang dapat diatur untuk kebutuhan eksitasi medan rotor. Penguat atau eksitasi sendiri digunakan untuk menghasilkan eksitasi medan pada motor sinkron agar dapat beroperasi sebagai generator sinkron. Rangkaian catu daya DC dapat berupa rangkaian yang terpisah dari generator ataupun rangkaian yang tidak terpisah dalam hal ini tegangan keluaran (output) generator disearahkan dan digunakan sebagai catu daya eksitasi medan (M. J. Denny R. Pattiapon 2019).

Generator sinkron merupakan generator arus bolak-balik (AC) yang menghasilkan tegangan listrik berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Generator ini disebut sinkron karena kecepatan putaran rotor selalu sinkron dengan frekuensi listrik yang dihasilkan(Pratama et al. 2021).

Pada generator sinkron, energi mekanik dari mesin diesel diubah menjadi energi listrik melalui perputaran rotor di dalam medan magnet stator.

Frekuensi generator sinkron dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$f = \frac{P \times n}{120} \quad \text{.....(2.1)}$$

Keterangan:

f = Frekuensi (Hz)

P = Jumlah kutub

n = Putaran generator (rpm)

Generator sinkron banyak digunakan pada generator set diesel karena mampu menghasilkan tegangan yang stabil dan sesuai untuk kebutuhan sistem tenaga listrik.

2.3.1 Sistem dan Rangkaian 1 Fasa dan 3 Fasa

Sistem tenaga listrik pada generator set dibedakan menjadi sistem 1 fasa dan sistem 3 fasa berdasarkan jumlah penghantar, bentuk gelombang tegangan, dan kapasitas daya yang digunakan. Perbedaan sistem tersebut memengaruhi kemampuan generator dalam menyuplai beban listrik.

1. Sistem dan Rangkaian 1 Fasa

Sistem 1 fasa merupakan sistem tenaga listrik yang menggunakan satu penghantar fasa dan satu penghantar netral. Sistem ini umumnya digunakan pada beban rumah tangga dan peralatan listrik berkapasitas kecil.

Pada sistem 1 fasa, tegangan kerja yang digunakan umumnya sebesar 220 V dengan frekuensi 50 Hz.

Persamaan daya pada sistem 1 fasa adalah:

$$P = V \times I \times cos\,\phi \quad \text{.....(2.2)}$$

Keterangan:

P = daya aktif (W)

$\sqrt{3}$ = *Konstanta sistem 3 fasa (1,732)*

V = tegangan (V)

I = arus (A)

$cos\ \phi$ = faktor daya

Data sistem 1 fasa:

Tabel 2.1 Data Sistem 1 Fasa

No	Parameter	Nilai
1	Tegangan	220 V
2	Frekuensi	50 Hz
3	Jumlah penghantar	2
4	Jenis beban	Rumah tangga

Sistem 1 fasa terdiri dari satu penghantar fasa dan satu penghantar netral dengan tegangan kerja sebesar 220 Volt. Pada instalasi tersebut terdapat beberapa komponen utama yaitu kWh meter, Miniature Circuit Breaker (MCB), saklar, lampu, stop kontak, dan beban listrik.

kWh meter berfungsi sebagai alat pengukur energi listrik yang digunakan oleh beban. MCB digunakan sebagai sistem pengaman instalasi listrik terhadap gangguan arus lebih dan hubungan singkat (short circuit). Saklar berfungsi untuk menghubungkan dan memutus aliran arus listrik menuju lampu sebagai beban penerangan. Stop kontak digunakan sebagai titik penghubung peralatan listrik seperti televisi dan komputer.

Pada Generator Set Cummins sistem 1 fasa, energi listrik dihasilkan oleh alternator yang digerakkan oleh mesin diesel. Energi listrik tersebut kemudian disalurkan melalui panel distribusi menuju beban listrik. Sistem 1 fasa umumnya digunakan untuk menyuplai beban dengan kapasitas kecil hingga menengah seperti penerangan, peralatan elektronik, dan peralatan rumah tangga.

Penggunaan sistem 1 fasa pada generator set memiliki kelebihan berupa instalasi yang sederhana, biaya pemasangan yang lebih rendah, dan pengoperasian yang mudah. Namun demikian, kapasitas daya yang dihasilkan relatif lebih kecil dibandingkan sistem 3 fasa sehingga penggunaannya terbatas pada beban ringan.

2. Sistem dan Rangkaian 3 Fasa

Sistem 3 fasa merupakan sistem tenaga listrik yang menggunakan tiga penghantar fasa dengan perbedaan sudut fasa sebesar 120°. Sistem ini banyak

digunakan pada industri dan generator set kapasitas besar karena mampu menyalurkan daya yang lebih stabil dan efisien dibandingkan sistem 1 fasa [32].

Generator set Cummins 275 kVA yang digunakan pada penelitian ini termasuk generator sistem 3 fasa dengan tegangan kerja sebesar 380 V.

Persamaan daya sistem 3 fasa yaitu:

$P = \sqrt{3} \times V \times I \times cos\ \phi$……(2.3)

Keterangan:

$\boldsymbol{P}$ = daya aktif (W)

$\boldsymbol{V}$ = tegangan line to line (V)

$\boldsymbol{I}$ = arus line (A)

$\boldsymbol{cos\ \phi}$ = faktor daya

Data sistem 3 fasa:

Tabel 2.2 Data Sistem 3 Fasa

No	Parameter	Nilai
1	Tegangan	380 V
2	Frekuensi	50 Hz
3	Jumlah penghantar	4
4	Jenis beban	Industri

Rangkaian sistem kelistrikan 3 fasa yang terdiri dari tiga penghantar utama yaitu fasa R, fasa S, dan fasa T serta satu penghantar netral (N). Sistem 3 fasa merupakan sistem tenaga listrik yang banyak digunakan pada generator set berkapasitas besar karena mampu menghasilkan daya yang lebih stabil dan efisien.(Setiawan 2022).

Pada sistem ini, masing-masing fasa memiliki perbedaan sudut sebesar 120° sehingga menghasilkan medan magnet putar yang mampu meningkatkan kestabilan daya listrik. Generator Set Cummins sistem 3 fasa umumnya digunakan untuk menyuplai beban besar seperti motor listrik, pompa, sistem pendingin, panel distribusi, dan peralatan industri lainnya.

Gambar tersebut juga menunjukkan dua jenis hubungan pada sistem 3 fasa yaitu hubungan bintang (star/Y) dan hubungan segitiga (delta/Δ). Hubungan bintang digunakan dengan menghubungkan salah satu ujung kumparan pada titik netral sehingga menghasilkan tegangan yang lebih stabil dan dapat digunakan untuk

melayani beban 1 fasa maupun 3 fasa. Sementara itu, hubungan segitiga dilakukan dengan menghubungkan ujung kumparan membentuk rangkaian tertutup tanpa netral sehingga mampu menghasilkan daya dan arus yang lebih besar.

Pada Generator Set Cummins, sistem 3 fasa digunakan karena memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sistem 1 fasa. Selain itu, pembagian beban pada tiap fasa dapat dilakukan secara merata sehingga rugi-rugi daya dapat dikurangi. Ketidakseimbangan beban antar fasa dapat mempengaruhi performa generator, meningkatkan konsumsi bahan bakar, serta menurunkan efisiensi kerja generator set. Oleh karena itu, pengaturan dan distribusi beban pada sistem 3 fasa sangat penting dalam pengoperasian generator set.(Pambudi, Suyanto, and Yogaswara 2021).

2.4 Generator Set Diesel Cummins 275kVA

Generator set yang digunakan pada penelitian ini merupakan generator set diesel merek Cummins dengan kapasitas 275 kVA yang berada di PTPN IV Regional I Gunung Pamela. Generator set ini digunakan sebagai sumber listrik cadangan untuk menyuplai kebutuhan listrik rumah staff, kantor, tempat ibadah, mesin air, dan fasilitas umum lainnya ketika terjadi pemadaman listrik dari jaringan PLN.

Generator set ini mulai dioperasikan sejak tahun 2015 dan hingga saat ini masih menjadi satu-satunya unit generator aktif yang digunakan sebagai sumber listrik cadangan di lokasi penelitian. Dalam pengoperasiannya, generator set bekerja pada berbagai kondisi pembebanan sesuai kebutuhan listrik yang digunakan. Spesifikasi umum generator set diesel Cummins 275 kVA ditunjukkan pada Tabel 2.3 berikut.

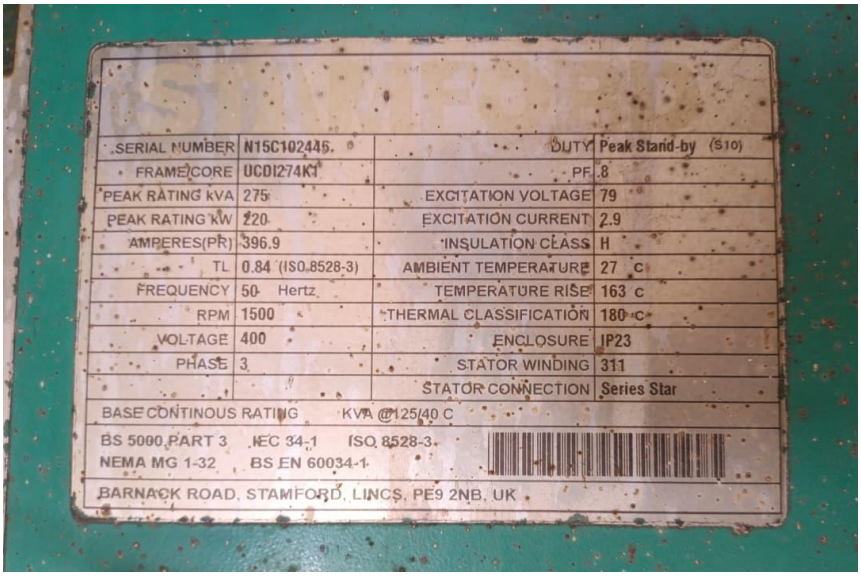
Tabel 2.3 Spesifikasi Generator Set Cummins 275kVA

No	Parameter	Spesifikasi
1	Merek	Cummins Power Generation
2	Model	C275D5
3	Kapasitas Daya	275 kVA
4	Daya Aktif	220 kW
5	Tegangan Kerja	380 V
6	Frekuensi	50 Hz
7	Arus Nominal	417,8 A
8	Faktor Daya	0,8

No	Parameter	Spesifikasi
9	Jumlah Fasa	3 Fasa
10	Putaran Mesin	1500 rpm
11	Tahun Pembuatan	2015
12	Sistem Koneksi Stator	Series Star
13	Kelas Isolasi	H
14	Enclosure Protection	IP23
15	Jenis Bahan Bakar	Solar



Gambar 2.7 Nameplate Generator Set Cummins 275 kVA



Gambar 2.8 Nameplate Alternator Generator Set Cummins 275 kVA

Berdasarkan spesifikasi generator set tersebut, diketahui bahwa generator menggunakan sistem tiga fasa dengan tegangan kerja 380 V dan frekuensi 50 Hz. Generator memiliki daya maksimum sebesar 275 kVA atau setara dengan 220 kW pada faktor daya 0,8. Selain itu, generator beroperasi pada putaran 1500 rpm yang umum digunakan pada sistem generator sinkron dengan frekuensi 50 Hz.

2.5 Beban Listrik pada Generator Set

Menemukan bahwa efisiensi dipengaruhi oleh ukuran beban dan rugi-rugi total dalam generator, terutama oleh arus pada generator dan arus eksitasi. Menurut "(Clever 2023)", beban harian generator unit 1 dan 2 bersifat sangat fluktuatif dengan puncak pada pukul 19.00–21.00 WIB. Perubahan beban tidak terlalu mempengaruhi tegangan output karena adanya peran AVR sebagai stabilisator. Perubahan beban berbanding lurus dengan perubahan arus beban dan arus eksitasi pada exciter. Selain itu, perubahan beban juga mempengaruhi cos phi generator yang berdampak langsung pada efisiensi generator, dengan rentang efisiensi sebesar 97,12% hingga 98,73%.

Simulasi menggunakan Simulink Matlab menunjukkan bahwa gangguan pada input dan output generator harus dihindari untuk menjaga kestabilan dan mencegah kerusakan. Untuk menjaga kestabilan generator, perubahan beban perlu diatur agar tidak terlalu signifikan dan batas maksimum beban harus diperhatikan.

Beban listrik merupakan seluruh peralatan atau sistem yang menggunakan energi listrik dari sumber pembangkit. Besarnya beban listrik sangat memengaruhi performa generator set.

Pada saat generator mensuplai beban, arus listrik akan mengalir dari generator menuju peralatan yang terhubung. Besarnya beban yang digunakan akan mempengaruhi kinerja generator, seperti tegangan keluaran, arus, faktor daya (cos φ), frekuensi, serta efisiensi generator.

Berdasarkan karakteristiknya, beban listrik pada generator dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Beban Resistif

   Beban yang mengubah energi listrik menjadi panas atau cahaya, seperti lampu pijar dan setrika listrik.
2. Beban Induktif

   Beban yang memanfaatkan medan magnet dan biasanya menggunakan kumparan, seperti motor listrik, pompa air, dan transformator.
3. Beban Kapasitif

   Beban yang memiliki sifat menyimpan energi listrik dalam medan listrik, seperti kapasitor bank yang digunakan untuk perbaikan faktor daya.

2.6 Pembebanan Generator Set

Pembebanan generator set merupakan kondisi jumlah daya listrik yang digunakan dibandingkan dengan kapasitas maksimum generator. Besarnya pembebanan sangat memengaruhi performa operasional generator set diesel, khususnya terhadap efisiensi, konsumsi bahan bakar, temperatur kerja, dan kestabilan tegangan generator.

Persentase pembebanan generator dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\%\,Beban = \frac{Pbeban}{Pmaks} \times 100 \quad \text{.....(2.4)}$$

Keterangan:

P_{beban} = Daya beban (kW)

P_{maks}= Kapasitas maksimum generator (kW)

Dalam pengoperasiannya, generator set diesel tidak selalu bekerja pada kondisi pembebanan tetap. Perubahan beban dapat terjadi akibat perubahan

kebutuhan energi listrik pada sistem yang disuplai generator. Semakin besar beban yang digunakan, maka arus keluaran generator juga akan meningkat sehingga mesin diesel memerlukan daya mekanik yang lebih besar.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Nur et al. 2022) mengenai pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi generator, perubahan pembebanan menyebabkan perubahan efisiensi generator akibat meningkatnya rugi-rugi dan konsumsi bahan bakar selama proses operasional. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa generator yang bekerja pada pembebanan tidak stabil mengalami penurunan efisiensi operasional.

Selain itu, penelitian lain mengenai karakterisasi performa generator diesel menunjukkan bahwa efisiensi generator cenderung optimal pada kondisi pembebanan sekitar 60%–80% dari kapasitas generator. Pada kondisi tersebut, penggunaan bahan bakar lebih efisien dibandingkan pada kondisi beban terlalu rendah maupun mendekati kapasitas maksimum generator.

2.6.1 Overload

Overload atau beban lebih merupakan suatu kondisi operasional kelistrikan di mana akumulasi daya beban yang ditarik oleh sistem melampaui batas kapasitas daya maksimal (rated capacity atau nameplate rating) yang didesain dan diizinkan pada sebuah generator. Dalam pengoperasian Generator Set (Genset), kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem dipaksa beroperasi melewati ambang batas 100% dari spesifikasi daya berkelanjutannya (prime power). Terjadinya fenomena overload di lapangan umumnya bermula dari kurangnya manajemen beban, penambahan fasilitas listrik yang tidak terkendali, atau adanya tarikan arus kejut (inrush current) yang terlalu masif dari peralatan-peralatan induktif.

Secara teknis, pembebanan lebih ini memberikan tekanan kerja ekstrem pada dua komponen fundamental generator secara bersamaan, yakni sisi alternator (sebagai pengkonversi listrik) dan sisi prime mover / mesin diesel (sebagai penghasil energi mekanis). Dari perspektif kelistrikan, overload terjadi saat beban menuntut suplai daya semu (kVA) maupun penarikan arus (Ampere) yang jauh lebih besar dari kemampuan hantar aman pada kawat kumparan stator alternator. Sementara itu, dari perspektif mekanis dan termodinamika, overload memaksa mesin diesel untuk memproduksi tenaga torsi mekanik (daya aktif / kW) yang

melampaui kurva performa puncak ruang bakarnya, semata-mata demi mempertahankan kecepatan putaran poros rotor agar tetap sinkron. Kondisi operasional yang dipaksakan melampaui batas desain kapasitas ini pada akhirnya akan memicu berbagai masalah pada sistem, yang dapat menyebabkan:

1. Temperatur generator meningkat Pada kondisi *overload*, beban akan menarik arus kelistrikan (*Ampere*) yang jauh lebih besar dari batas nominal kawat kumparan. Berdasarkan prinsip kelistrikan, besaran arus yang berlebih ini akan terkonversi menjadi energi panas. Apabila sistem pendingin (radiator) tidak mampu meredam laju peningkatan panas tersebut, suhu di dalam ruang alternator dan ruang bakar mesin diesel akan melonjak secara drastis (Stephen J. 2012).
2. Peningkatan rugi-rugi generator Arus kelistrikan berlebih akibat *overload* sangat berdampak pada peningkatan kerugian daya, khususnya Rugi Tembaga (I^2R). Karena nilai rugi tembaga berbanding lurus dengan kuadrat arus, penambahan beban yang melampaui batas 100% akan memicu lonjakan rugi-rugi variabel ini secara eksponensial (berkali-kali lipat). Selain itu, mesin diesel juga akan mengalami peningkatan rugi gesekan mekanis karena harus mengerahkan torsi ekstra (Ritonga, M. F., & Saragih, M. 2024).
3. Penurunan efisiensi operasional Efisiensi merupakan perbandingan antara daya keluaran yang berguna dengan total daya masukan (bahan bakar) ditambah rugi-rugi. Ketika generator mengalami *overload*, nilai rugi-rugi (terutama rugi panas dan rugi tembaga) melonjak jauh lebih cepat dibandingkan dengan daya keluaran kelistrikannya. Ketidakseimbangan ini menyebabkan bahan bakar yang dibakar lebih banyak terbuang menjadi panas daripada menjadi listrik, sehingga grafik efisiensi generator akan menurun secara tajam (Hajar, I., 2019).
4. Risiko kerusakan pada sistem generator Generator yang dibiarkan bekerja secara terus-menerus pada kondisi *overload* akan mengalami penurunan umur operasional (*life span*). Temperatur berlebih yang terjadi terus-menerus dapat melelehkan lapisan isolasi (*email*) pada kumparan stator, yang berisiko memicu korsleting (*short circuit*) fatal. Di sisi lain, mesin

diesel yang terus-menerus dipaksa menarik beban di atas kemampuannya akan mengalami kelelahan material (*fatigue*), pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna, serta risiko kerusakan komponen poros mesin (Annisa, Winarso, & Dwiono, W. 2019).

Generator yang bekerja secara terus-menerus pada kondisi overload dapat mengalami penurunan umur operasional akibat meningkatnya beban kerja mesin diesel dan alternator.

2.6.2 Underload

Underload merupakan kondisi ketika generator bekerja pada beban yang terlalu rendah dibandingkan kapasitas generator. Meskipun generator masih dapat beroperasi, kondisi underload menyebabkan konsumsi bahan bakar menjadi tidak efisien karena daya listrik yang dihasilkan relatif kecil dibandingkan energi masukan dari bahan bakar diesel.

Menurut beberapa penelitian, generator diesel yang bekerja pada beban terlalu rendah dalam waktu lama dapat mengalami penurunan performa pembakaran serta meningkatnya pemborosan bahan bakar.

Underload terjadi ketika generator bekerja pada beban terlalu rendah. Kondisi ini menyebabkan penggunaan bahan bakar menjadi tidak efisien dan dapat menurunkan performa mesin diesel.

Secara umum, generator diesel memiliki efisiensi optimal pada pembebanan sekitar 60%–80% dari kapasitas maksimum generator.

2.7 Konsumsi Bahan Bakar Generator Diesel

Generator set diesel memerlukan bahan bakar solar sebagai sumber energi utama untuk menghasilkan energi mekanik pada mesin diesel. Konsumsi bahan bakar generator set dipengaruhi oleh besar pembebanan, kondisi mesin, serta lama waktu operasi generator. Semakin besar beban listrik yang disuplai generator, maka kebutuhan bahan bakar juga akan meningkat karena mesin diesel harus menghasilkan daya mekanik yang lebih besar untuk memutar generator. Menurut penelitian (Fatih and Idris 2024), konsumsi bahan bakar generator set diesel dipengaruhi oleh kondisi pembebanan generator. Pada kondisi pembebanan tinggi,

konsumsi bahan bakar meningkat akibat bertambahnya kebutuhan daya mesin diesel.

Penelitian lain yang dilakukan oleh (Nathanael Gultom 2025) menunjukkan bahwa peningkatan beban generator menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar dan perubahan efisiensi operasional generator set diesel. Generator cenderung bekerja lebih efisien pada pembebanan menengah dibandingkan pada kondisi underload maupun overload.

Konsumsi bahan bakar spesifik generator dapat dihitung menggunakan persamaan: Besarnya konsumsi bahan bakar dipengaruhi oleh:

1. Besar pembebanan generator.
2. Kondisi mesin diesel.
3. Lama waktu operasi.
4. Efisiensi pembakaran bahan bakar.

Semakin besar beban generator, maka konsumsi bahan bakar juga akan meningkat karena mesin diesel harus menghasilkan daya mekanik yang lebih besar.

Konsumsi bahan bakar spesifik dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$SFC = \frac{mf}{P} \quad \text{.....(2.5)}$$

Keterangan:

SFC = Specific Fuel Consumption

mf = Konsumsi bahan bakar

P = Daya keluaran generator

Nilai specific fuel consumption digunakan untuk mengetahui tingkat efisiensi penggunaan bahan bakar terhadap daya listrik yang dihasilkan generator set diesel.

2.8 Efisiensi Generator Set Diesel

Efisiensi adalah ketepatan cara (usaha, kerja) dalam menjalankan sesuatu (dengan tidak membuang waktu, tenaga, dan biaya) atau kemampuan menjalankan tugas dengan baik dan tepat (dengan tidak membuang waktu, tenaga, biaya) (Candra Dan Fikri 2023).

Efisiensi adalah suatu cara atau usaha dalam menjalankan sesuatu untuk menghasilkan suatu hal dengan maksimal. Suatu peralatan atau mesin yang mengubah energi tidak mungkin dapat mengubah seluruh energi yang diterimanya

(daya masukan /Pin) menjadi energi yang diharapkan (daya keluaran /Pout). Sebagian energi akan diubah menjadi energi yang tidak diharapkan. Proses tersebut merupakan sifat alami sehingga ditemukan konsep efisiensi (daya guna). Efisiensi generator adalah perbandingan antara daya output generator dengan daya input generator. Daya masukan merupakan daya keluaran turbin karena turbin dengan generator dikopel dan bekerja bersama (Azharny 2021).

Analisis mengenai perbandingan daya masukan dan daya keluaran sangat penting dalam sistem tenaga listrik untuk mengetahui tingkat keandalan alat saat menerima variasi beban, sebagaimana yang telah dikaji dalam pengujian sistem inverter.

Efisiensi generator merujuk pada perbandingan antara daya output dan daya input. Konsep ini berlaku tidak hanya pada generator sinkron tetapi juga pada mesin listrik lainnya seperti transformator. Maka efesiensi generator sinkron dapat dituliskan seperti persamaan berikut ini (Ardiansyah, Syahputra, and Maimun 2024).:

$$\eta = \frac{Pout}{Pin} \times 100\% \quad \text{.....(2.6)}$$

Untuk melakukan perhitungan efisiensi generator sinkron secara tidak langsung, dapat digunakan persamaan dengan melibatkan penghitungan rugi-rugi daya total yang terjadi pada generator seperti pada persamaan berikut ini:

$$\eta = \frac{Pout}{Pin + Rugi - rugi\ daya\ total} \times 100\%$$

Keterangan:

η = Efisiensi (%)

$Pout$ = Daya keluaran generator

Pin = Daya masukan dari bahan bakar

2.9 Rugi-Rugi pada Generator

Dalam hukum termodinamika dan prinsip konversi energi kelistrikan, tidak ada satupun mesin listrik yang memiliki tingkat efisiensi 100%. Rugi-rugi generator merupakan akumulasi dari sebagian energi masukan (energi mekanik dari poros *prime mover*) yang gagal dikonversi menjadi energi listrik (*output*), melainkan terbuang sia-sia atau terdisipasi dalam bentuk panas (kalor). Berdasarkan letak dan

karakteristik operasionalnya, rugi-rugi pada generator AC secara komprehensif diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama, yaitu:

2.9.1 Rugi Tembaga (*Copper Losses*)

Rugi tembaga merupakan kerugian daya elektrikal yang terjadi murni akibat adanya nilai resistansi (hambatan murni) pada material kawat tembaga penyusun kumparan, baik pada belitan stator maupun belitan medan di rotor. Ketika generator dibebani, arus listrik akan mengalir melewati kumparan tersebut dan menghasilkan panas.

Rugi tembaga ini sangat krusial dalam analisis pembebanan karena sifatnya sebagai Rugi Variabel. Artinya, besaran rugi ini tidaklah tetap, melainkan akan terus berubah dan melonjak secara kuadratik seiring dengan penambahan arus beban yang ditarik oleh sistem. Besarnya rugi tembaga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$P_{cu} = I^2R$……..…….....(2.7)

Keterangan:

Pcu = Rugi tembaga

I = Arus

R = Hambatan

Karena nilainya yang berbanding lurus dengan kuadrat arus (I^2), maka ketika generator beroperasi pada beban puncak (*overload*), porsi rugi tembaga ini akan mendominasi dan menjadi penyebab utama merosotnya efisiensi generator secara drastis.

2.9.2 Rugi Besi (*Core/Iron Losses*)

Berbeda dengan rugi tembaga, rugi besi (kerugian inti) terjadi pada bagian material inti baja atau besi lunak tempat kumparan digulung. Rugi ini bersifat sebagai Rugi Konstan, karena nilainya sangat dipengaruhi oleh tegangan dan frekuensi sistem yang dijaga tetap stabil, sehingga besaran ruginya akan selalu sama terlepas dari apakah generator sedang beroperasi tanpa beban (*no-load*) ataupun beban penuh *(full-load)*. Rugi besi terbagi menjadi dua fenomena elektromagnetik, yaitu:

1. Rugi Histeresis: Kerugian daya akibat gesekan antar molekul material inti besi ketika dipaksa untuk terus-menerus mengubah arah orientasi magnetiknya mengikuti siklus arus bolak-balik (AC).
2. Rugi Arus Pusar (*Eddy Current*): Kerugian yang timbul akibat adanya arus induksi liar yang bersirkulasi dan berputar-putar di dalam material inti besi itu sendiri, yang pada akhirnya memicu panas berlebih.

2.9.3 Rugi Mekanis (*Mechanical Losses*)

Rugi mekanis murni diakibatkan oleh pergerakan fisik dari komponen poros dan rotor generator yang berputar pada kecepatan tinggi. Sama halnya dengan rugi besi, rugi mekanis ini juga dikategorikan sebagai Rugi Konstan. Hal ini dikarenakan generator harus selalu berputar pada kecepatan sinkronnya (misalnya konstan di 1500 RPM untuk menghasilkan frekuensi 50 Hz), tidak peduli berapapun besaran beban listrik yang ditarik. Rugi mekanis bersumber dari dua hal, yakni:

1. Gesekan Bantalan (*Bearing Friction*): Hambatan mekanis akibat pergesekan antara poros rotor yang berputar dengan *bearing* atau bantalan penyangganya.
2. Gesekan Udara (*Windage Friction*)**:** Hambatan aerodinamis yang dialami oleh rotor dan kipas pendingin (*cooling fan*) saat membelah udara di dalam ruang sirip generator dengan kecepatan putar yang tinggi.

Secara keseluruhan, total penjumlahan dari rugi tembaga, rugi besi, dan rugi mekanis ini akan berbanding terbalik dengan performa mesin. Semakin besar akumulasi rugi-rugi yang terdisipasi menjadi panas, maka semakin kecil daya keluaran bersih yang dihasilkan, yang bermuara pada menurunnya tingkat efisiensi generator.

2.10 Daya Listrik Generator

Dalam sistem kelistrikan Arus Bolak-Balik (AC) tiga fasa pada generator, daya listrik tidak hanya diukur berdasarkan satu parameter tunggal. Aliran daya yang disuplai oleh generator ke sistem beban dianalisis menggunakan konsep Segitiga Daya (*Power Triangle*), yang terdiri dari tiga komponen besaran daya yang saling berkaitan erat, yaitu:

1. Daya Aktif (P): Sering disebut sebagai daya nyata (dalam satuan Watt atau kW). Ini adalah daya aktual yang benar-benar terserap oleh beban dan dikonversi menjadi kerja nyata atau energi mekanis yang berguna, seperti putaran motor pada pompa air atau pendaran cahaya pada lampu.
2. Daya Reaktif Q): Diukur dalam satuan Volt-Ampere Reaktif (VAR atau kVAR). Ini merupakan daya "buta" yang tidak melakukan kerja mekanis secara nyata, namun sangat mutlak dibutuhkan oleh peralatan induktif (seperti transformator dan motor listrik) untuk membentuk medan magnet agar alat tersebut dapat beroperasi.
3. Daya Semu (S): Diukur dalam satuan Volt-Ampere (VA atau kVA). Daya semu merupakan daya total hasil penjumlahan vektor (geometris) antara daya aktif dan daya reaktif. Daya semu inilah yang selalu dijadikan patokan utama dalam menentukan kapasitas maksimal atau *rating nameplate* dari sebuah generator (misalnya: Generator Cummins 275 kVA).

2.10.1 Daya Aktif

Daya aktif, atau yang sering disebut sebagai daya nyata (*real power*), merupakan porsi daya kelistrikan yang secara aktual terkonversi menjadi bentuk energi lain yang bermanfaat, seperti kerja mekanis pada motor pompa atau energi panas.

Secara fundamental, daya didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam sirkuit listrik. Satuan international daya listrik adalah Watt yang menyatakan banyaknya tenaga listrik yang mengalir per satuan waktu. Dalam pengoperasian sistem generator, porsi daya listrik yang secara aktual terkonversi menjadi bentuk energi lain yang bermanfaat atau melakukan kerja nyata disebut sebagai daya aktif (*real power*) (Oktrialdi et al., 2021).

Daya inilah yang menjadi representasi beban kerja sesungguhnya yang harus ditanggung oleh poros putar mesin diesel (*prime mover*). Pada sistem instalasi kelistrikan industri yang menggunakan sistem arus bolak-balik (AC) tiga fasa, besarnya daya aktif dirumuskan sebagai berikut:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times cos\ \phi$$

Keterangan:

P = Daya aktif (*Watt* atau kW)

$\sqrt{3}$ = Konstanta sistem 3 fasa (1,732)

V = Tegangan (*Volt*)

I = Arus Beban (*Ampere*)

$cos\ \phi$ = Faktor daya

2.10.2 Daya Semu

Daya semu (*apparent power*) merepresentasikan kapasitas total energi kelistrikan yang mampu dibangkitkan dan disuplai oleh sebuah generator sebelum dipengaruhi oleh sifat resistif atau induktif dari beban. Secara kelistrikan, daya ini merupakan hasil perkalian matematis langsung antara tegangan sistem dan arus yang mengalir. Oleh karena itu, daya semu selalu dijadikan sebagai nilai acuan standar atau kapasitas *nameplate rating* dari sebuah generator listrik (misalnya berkapasitas 275 kVA). Pada generator sinkron tiga fasa, persamaan daya semu dirumuskan sebagai:

$S = V \times I$……(2.8)

Keterangan:

S = Daya semu (VA atau kVA)

$\sqrt{3}$ = Konstanta sistem 3 fasa (1,732)

V = Tegangan antar fasa / *Line-to-Line (Volt)*

I = Arus beban (Ampere)

2.10.3 Faktor Daya

Faktor daya (*power factor*) adalah suatu rasio yang menunjukkan seberapa efisien daya semu (total kapasitas generator) mampu diubah menjadi daya aktif (kerja nyata). Secara elektroteknik, faktor daya merepresentasikan nilai kosinus dari sudut pergeseran fasa (φ) yang terbentuk antara gelombang tegangan dan gelombang arus listrik akibat adanya beban-beban induktif (seperti kumparan motor) di lapangan. Semakin besar daya aktif yang mampu diserap dibandingkan daya semunya, maka nilai faktor daya akan semakin mendekati angka ideal 1,0. Persamaan faktor daya dirumuskan sebagai berikut:

$cos\ \phi = \frac{P}{S}$……...……...(2.9)

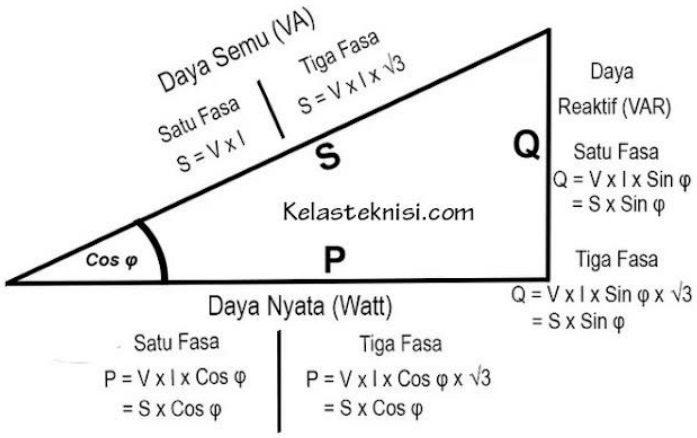
Keterangan: $cos\ \varphi$ = Faktor daya

P = Daya aktif (*Watt* atau kW)

S = Daya semu (VA atau kVA)

2.10.4 Segitiga Daya (Power Triangle) 1 Fasa dan 3 Fasa

Segitiga daya merupakan representasi visual secara geometris yang menunjukkan hubungan antara tiga jenis daya dalam sistem arus bolak-balik (AC), yaitu Daya Aktif (P), Daya Reaktif (Q), dan Daya Semu (S). Bentuk segitiga daya pada sistem 1 fasa dan 3 fasa pada dasarnya adalah sama (berupa segitiga siku-siku), namun yang membedakan adalah persamaan matematis yang digunakan untuk menghitung besaran nilai dayanya.



Gambar 2.9 Segitiga Daya(Power Triangel)

Sumber : Kelasteknisi.com

Berdasarkan gambar segitiga daya di atas, sisi horizontal mewakili Daya Aktif (P), sisi vertikal mewakili Daya Reaktif (Q), dan sisi miring (hipotenusa) mewakili Daya Semu (S). Sudut yang diapit oleh sisi Daya Semu dan Daya Aktif adalah sudut fasa (φ).

a. Rumus Daya pada Sistem 1 Fasa:

Sistem 1 fasa menggunakan satu penghantar fasa dan satu netral. Persamaannya adalah:

Daya Semu (S) = $V \times I$ *(satuan: VA)*……..(2.10)

Daya Aktif (P) = $V \times I \times cos\ \varphi$ *(satuan: Watt)*…….....(2.11)

Daya Reaktif (Q) = $V \times I \times sin\ \varphi$ *(satuan: VAR)*……...(2.12)

b. Rumus Daya pada Sistem 3 Fasa:

Sistem 3 fasa (seperti pada Generator Cummins 275 kVA) menggunakan tiga penghantar fasa (R, S, T) sehingga daya yang dihasilkan lebih besar. Terdapat faktor akar tiga ($\sqrt{3} \approx 1{,}732$) pada persamaannya:

Daya Semu (S) = $\sqrt{3} \times V \times I$ *(satuan: VA)*……(2.13)

Daya Aktif (P) = $\sqrt{3} \times V \times I \times cos\ \varphi$ *(satuan: Watt)*……(2.14)

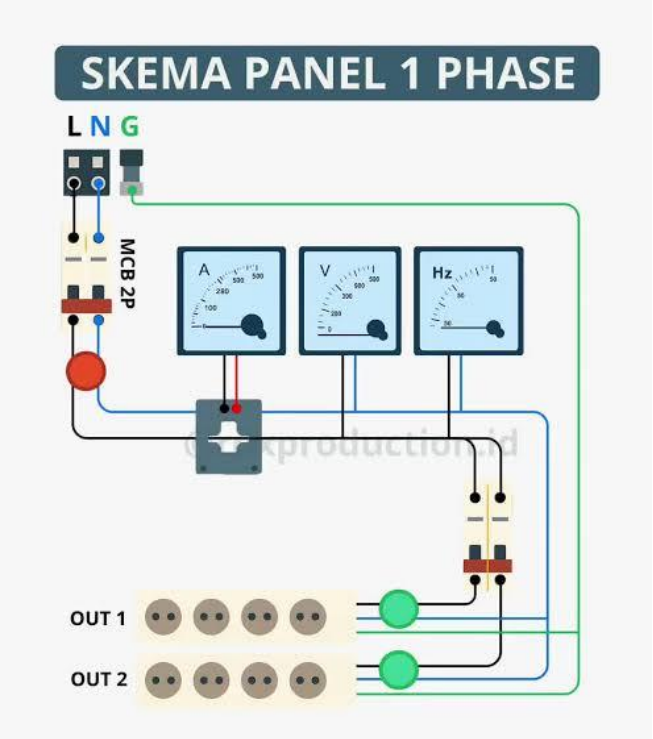
Daya Reaktif (Q) = $\sqrt{3} \times V \times I \times sin\ \varphi$ *(satuan: VAR)*…….(2.15)

2.10.5 Single Line Diagram (SLD) 1 Fasa dan 3 Fasa

Single Line Diagram (Bagan Garis Tunggal) adalah diagram yang disederhanakan untuk mewakili sistem tenaga listrik tiga fasa maupun satu fasa dalam bentuk satu garis pencatatan. SLD berfungsi untuk memudahkan pembacaan aliran daya dari sumber (generator) menuju beban.

1. Single Line Diagram 1 Fasa

Pada SLD 1 fasa, aliran listrik mengalir dari sumber tegangan melewati sistem proteksi pengaman (seperti MCB 1 kutub) lalu menuju langsung ke beban 1 fasa (misalnya lampu atau alat elektronik rumah tangga).



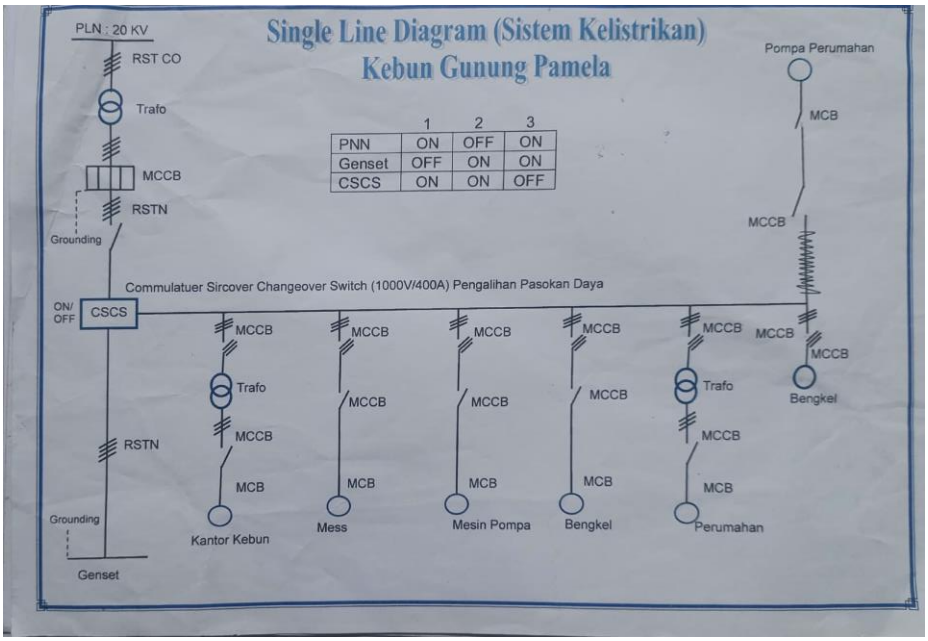
Gambar 2.10 Single line diagram 1 Fasa

Sumber : rdxprouction.id

Gambar tersebut mengilustrasikan skema dasar *wiring* (pengawatan) pada panel distribusi instrumen pengukuran listrik satu fasa. Aliran listrik masuk melalui kutub Fasa (L) dan Netral (N) yang diproteksi oleh pemutus daya utama (MCB 2P).

2. Single Line Diagram 3 Fasa

Pada SLD 3 fasa, instalasi lebih kompleks. Aliran daya dari generator 3 fasa akan melewati sirkuit pemutus 3 kutub (MCCB 3 Pole), kemudian masuk ke *busbar* utama pembagi fasa (R, S, T, dan Netral). Dari *busbar* ini, daya didistribusikan ke beban 3 fasa (seperti motor listrik/pompa air) maupun dipecah menjadi beban 1 fasa.



Gambar 2.11 Single line diagram 3 Fasa

Sumber : Kamar Generator Gunung Pamela

Gambar tersebut merupakan *Single Line Diagram* (SLD) atau diagram garis tunggal yang merepresentasikan topologi sistem kelistrikan terintegrasi di Kebun Gunung Pamela, PTPN IV. Diagram ini memetakan alur distribusi daya mulai dari sumber pembangkitan hingga ke titik beban akhir (*end-user*). Secara teknis, sistem ini ditopang oleh dua sumber energi utama yang bekerja secara *interlock* (bergantian), yaitu:

1. Sumber Utama (Jaringan PLN): Suplai daya primer bersumber dari jaringan tegangan menengah PLN (20 kV), yang kemudian diturunkan

melalui transformator (*step-down*) menjadi tegangan rendah (380/220V) fasa tiga (R-S-T-N) dengan sistem pentanahan (*grounding*). Aliran ini diproteksi oleh pemutus daya MCCB (*Molded Case Circuit Breaker*).

2. Sumber Cadangan (Generator Set): Bertindak sebagai *standby power* yang akan mengambil alih beban fasilitas apabila terjadi pemadaman dari grid PLN. (Generator inilah yang menjadi objek utama dalam penelitian ini).

Pengalihan pasokan daya antara PLN dan Generator diatur secara terpusat melalui panel CSCS (*Commutatuer Sircover Changeover Switch*) berkapasitas 1000V/400A. Berdasarkan tabel kebenaran (*truth table*) pada diagram, sistem ini dirancang dengan pengamanan agar kedua sumber tidak berbenturan (Kondisi 3: Jika PLN ON dan Genset ON secara bersamaan, maka saklar CSCS akan berada pada posisi OFF/Netral demi keamanan jaringan).

Setelah melewati panel CSCS, daya didistribusikan melalui *busbar* utama menuju berbagai sentral beban yang masing-masing diproteksi oleh MCCB dan MCB. Beban tersebut sangat bervariasi, meliputi: Kantor Kebun, Mess, Mesin Pompa, Bengkel, Perumahan, dan Pompa Perumahan.

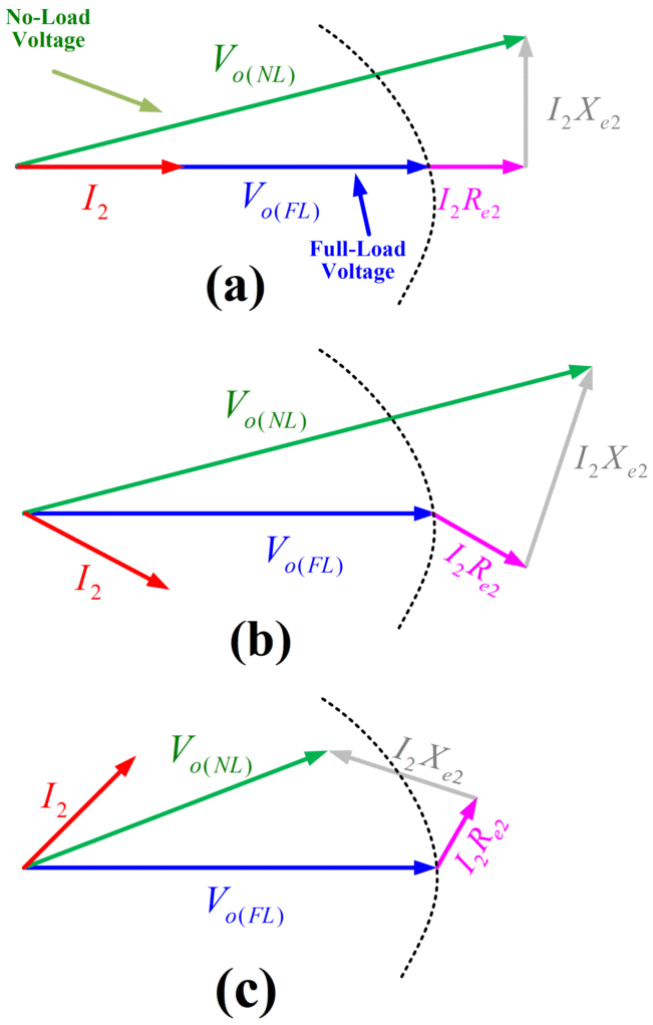
Keterkaitan dengan Penelitian: Berdasarkan topologi SLD tersebut, terlihat jelas bahwa generator menanggung jenis beban yang sangat heterogen (campuran antara fasilitas operasional siang hari dan fasilitas hunian). Keberagaman titik beban pada diagram inilah yang menjadi penyebab fundamental terjadinya fluktuasi pembebanan yang sangat ekstrem antara siang hari (saat kantor dan pompa aktif) dan malam hari (saat hanya perumahan yang aktif) pada Generator Cummins 275 kVA.

2.10.6 Visualisasi Faktor Daya (Faktor Beban)

Faktor daya atau *Power Factor* ($cos\ \varphi$) adalah rasio perbandingan antara daya aktif (P) yang digunakan untuk melakukan kerja nyata dengan daya semu (S) yang disuplai oleh generator. Nilai faktor daya sangat dipengaruhi oleh jenis beban yang terhubung ke sistem.

Secara karakteristik kelistrikan Arus Bolak-Balik (AC), beban terbagi menjadi tiga klasifikasi utama, yakni beban resistif, induktif, dan kapasitif. Pada beban resistif murni (seperti elemen pemanas atau lampu pijar), gelombang arus dan tegangan berosilasi pada fasa yang sama, sehingga seluruh daya semu berhasil

dikonversi menjadi daya aktif dengan nilai faktor daya ideal atau *unity* ($cos\ \varphi\ =$ 1,0). Namun, pada kondisi riil di lapangan, khususnya pada fasilitas operasional perkebunan industri seperti PTPN IV, mayoritas beban yang terpasang memiliki karakteristik induktif.



Gambar 2.12 Visualisasi Faktor daya (Faktor Beban)

Sumber : electricalacademia.com

Gambar tersebut mengilustrasikan diagram fasor vektor tegangan dan rugi-rugi impedansi pada kondisi tanpa beban (*No-Load Voltage*) hingga kondisi berbeban penuh (*Full-Load Voltage*). Berdasarkan diagram tersebut, interaksi antara arus beban ($I_2 2$), resistansi internal (R_{e2}), dan reaktansi reaktif (X_{e2}) menyebabkan terjadinya jatuh tegangan (*voltage drop*) yang nilainya sangat bergantung pada karakteristik faktor daya beban:

1. Gambar (a) - Beban Resistif ($cos\ \varphi\ =\ 1$): Vektor arus (I_2) sefasa dengan tegangan beban. Jatuh tegangan yang dominan disebabkan oleh komponen resistif ($I_2\ R_{e2}$), sementara komponen reaktansi ($I_2 2\ X_{e2}$) memberikan efek geseran yang kecil terhadap selisih tegangan antara kondisi tanpa beban dan berbeban.
2. Gambar (b) - Beban Induktif (*Lagging*): Vektor arus tertinggal terhadap tegangan. Pada kondisi ini, komponen reaktansi reaktif ($I_2\ X_{e2}$) searah dan memberikan kontribusi yang sangat signifikan terhadap besarnya susut tegangan, sehingga tegangan keluaran saat berbeban akan mengalami penurunan (*voltage drop*) yang cukup besar dibandingkan saat tanpa beban. Kondisi inilah yang paling dominan terjadi pada sistem kelistrikan industri yang digerakkan oleh beban motorik.
3. Gambar (c) - Beban Kapasitif (*Leading*): Vektor arus mendahului tegangan. Pada kondisi ini, arah komponen reaktansi berlawanan sehingga dapat menyebabkan terjadinya kenaikan tegangan (*voltage rise*), di mana tegangan saat berbeban bisa lebih tinggi daripada saat tanpa beban.

Diagram fasor ini membuktikan secara visual bahwa fluktuasi beban dan jenis faktor daya di jaringan akan selalu berdampak langsung terhadap stabilitas tegangan keluaran sistem pembangkitan.

Satu (PF = 1) berarti tegangan dan arus sefasa (φ = 0°), tertinggal (PF < 1) berarti arus tertinggal di belakang tegangan (beban induktif), dan mendahului (PF < 1) berarti arus bergerak mendahului tegangan (beban kapasitif).

Pengaruh jenis beban terhadap faktor daya dapat divisualisasikan sebagai berikut:

1. Beban Resistif (Faktor Daya *Unity* / $cos\ \varphi\ =\ 1$): Arus dan tegangan berada pada fasa yang sama (se-fasa). Tidak ada daya reaktif yang dihasilkan. Contoh: Lampu pijar, elemen pemanas.
2. Beban Induktif (Faktor Daya *Lagging* / Tertinggal): Gelombang arus tertinggal oleh tegangan sebesar sudut φ. Beban ini menyerap daya reaktif, yang menyebabkan efisiensi sistem menurun jika terlalu besar. Contoh: Motor listrik, pompa air (seperti yang terdapat di PTPN IV Gunung Pamela).

3. Beban Kapasitif (Faktor Daya *Leading* / Mendahului): Gelombang arus mendahului tegangan. Biasanya digunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem yang terlalu induktif (misalnya pemasangan *Capacitor Bank*).

2.11 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan sebagai acuan dalam penelitian yang dilakukan.

Tabel 2.4 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Judul	Metode	Hasil
1	UNM (2022)	Pengaruh Perubahan Beban Generator terhadap Efisiensi	Observasi dan analisis deskriptif	Efisiensi menurun akibat perubahan beban
2	Undiksha (2022)	Karakterisasi Performa Genset Diesel 5 kW	Eksperimen variasi beban	Efisiensi optimal pada beban menengah
3	PPSDM Migas (2024)	Analisis Efisiensi Generator Set	Pengukuran daya dan konsumsi BBM	Efisiensi dipengaruhi pembebanan
4	UNDIP (2025)	Studi Eksperimental Genset Diesel 150 kVA	Eksperimen langsung	Perubahan beban memengaruhi efisiensi
5	PNJ (2024)	Analisis Pengaruh Pembebanan terhadap Efisiensi Generator	Analisis rugi-rugi	Efisiensi berubah sesuai variasi beban
6	Penelitian 2021	Analisis Konsumsi BBM Genset Diesel	Variasi pembebanan	Konsumsi BBM meningkat saat beban naik
7	Penelitian 2023	Profil Beban Sistem Generator	Monitoring beban	Beban puncak terjadi pada malam hari
8	Penelitian 2020	Evaluasi Kapasitas Generator	Analisis faktor beban	Overload dan underload memengaruhi efisiensi

Berdasarkan penelitian terdahulu, diketahui bahwa perubahan beban memiliki pengaruh terhadap efisiensi generator set diesel. Namun, penelitian mengenai

dampak perubahan beban terhadap efisiensi pada Generator Set Diesel Cummins 275 kVA di PTPN IV Regional I Gunung Pamela belum pernah dilakukan.

2.12 Kerangka Berpikir

Perubahan beban listrik pada generator set diesel akan memengaruhi konsumsi bahan bakar, daya keluaran, serta efisiensi generator.

Dalam penelitian ini:

Variabel bebas (X) = Perubahan beban

Variabel terikat (Y) = Efisiensi generator

Hubungan antar variabel dapat dijelaskan sebagai berikut:

Perubahan Beban → Konsumsi Bahan Bakar → Efisiensi Generator Set Diesel

Semakin besar perubahan beban yang terjadi, maka konsumsi bahan bakar dan efisiensi generator juga akan mengalami perubahan sesuai kondisi operasional generator set diesel.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian deskriptif kuantitatif. Penelitian dilakukan dengan mengamati kondisi operasional generator set diesel Cummins 275 kVA kemudian menganalisis pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi generator berdasarkan data hasil pengukuran di lapangan.

Pendekatan penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif karena data penelitian diperoleh melalui pengukuran parameter listrik dan konsumsi bahan bakar generator set yang kemudian dianalisis menggunakan perhitungan matematis dan teknis.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

3.2.1 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada kamar generator set di PTPN IV Regional I Gunung Pamela yang digunakan sebagai sumber listrik cadangan untuk rumah staff, kantor, tempat ibadah, mesin air, dan fasilitas umum lainnya.

3.2.2 Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada saat generator set beroperasi selama terjadi pemadaman listrik dari PLN. Pengambilan data dilakukan secara langsung pada kondisi operasional generator set dan dilaksanakan dalam beberapa periode pengamatan sesuai dengan kondisi dan variasi beban yang terjadi. Setiap periode pengambilan data dilakukan dengan mencatat parameter-parameter operasi generator set, seperti daya yang dibangkitkan, tegangan, arus, frekuensi, serta konsumsi bahan bakar.

Tabel 3.1 Waktu Pelaksanaan Penelitian

No	Keterangan	Bulan Ke							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Kajian Literarur								
2.	Penyusunan Proposal								

No	Keterangan	1	2	3	4	5	6	7	8
3.	Penulisan BAB I Sampai BAB III								
4.	Seminar Proposal								
5.	Penulisan BAB IV								
6.	Seminar Hasil								
7.	Sidang								

3.3 Objek dan Subjek Penelitian

Objek penelitian dalam skripsi ini adalah unit Generator Set Diesel merek Cummins dengan kapasitas terpasang sebesar 275 kVA. Generator set ini difungsikan sebagai sumber energi listrik cadangan (standby generator) di fasilitas PTPN IV Regional I Gunung Pamela.

Sedangkan subjek penelitian berupa parameter-parameter operasional mekanikal dan elektrikal dari generator set tersebut saat beroperasi menyuplai beban, yang meliputi:

1. Daya beban kelistrikan aktual (kW dan kVA).
2. Tegangan (*Voltage*) dan Arus (*Ampere*) operasional tiap fasa.
3. Konsumsi bahan bakar absolut (Liter/Jam).
4. *Specific Fuel Consumption* / SFC (Liter/kWh).
5. Tingkat efisiensi sistem konversi energi generator set (%).

3.4 Variabel Penelitian

Variabel penelitian merupakan parameter-parameter ukur yang digunakan sebagai landasan analisis untuk mengetahui sejauh mana hubungan sebab-akibat antara fluktuasi perubahan beban terhadap performa efisiensi generator set diesel. Penentuan variabel ini didasarkan pada operasional faktual mesin di lapangan.

3.4.1 Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas merupakan variabel yang memengaruhi atau menjadi sebab timbulnya perubahan pada variabel terikat. Dalam penelitian ini, variabel bebasnya adalah perubahan beban listrik yang ditarik dari generator. Beban ini berfluktuasi

secara dinamis menyesuaikan aktivitas fasilitas (kantor, pompa air, dan perumahan) pada siang dan malam hari.

Indikator dari variabel bebas meliputi:

1. Daya semu beban terhubung (kVA).
2. Daya aktif kelistrikan (P_{out} dalam kW).
3. Persentase pembebanan generator (%).

3.4.2 Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

Variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi atau menjadi akibat karena adanya variabel bebas. Pada penelitian ini, variabel terikatnya adalah kinerja efisiensi operasional dari generator set diesel Cummins 275 kVA.

Indikator dari variabel terikat meliputi:

1. Efisiensi konversi energi sistem generator (%).
2. Konsumsi bahan bakar spesifik atau *Specific Fuel Consumption* (SFC) dalam satuan Liter/kWh.

3.4.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol merupakan batasan parameter yang dijaga agar tetap konstan selama proses pengambilan data berlangsung, sehingga hasil analisis mutlak dipengaruhi oleh variabel bebas tanpa adanya gangguan dari faktor eksternal. Variabel kontrol dalam penelitian ini meliputi:

1. Unit generator set yang dianalisis tetap sama (Cummins 275 kVA).
2. Kecepatan putaran mesin dijaga konstan pada 1500 RPM untuk menghasilkan frekuensi stabil di angka 50 Hz.
3. Setting sistem eksitasi dan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dijaga pada kondisi normal, menghasilkan tegangan *line-to-line* di kisaran 400 V.
4. Jenis bahan bakar yang dikonsumsi selalu menggunakan *High Speed Diesel* (HSD) atau solar industri dengan nilai densitas standar.

3.5 Alat dan Bahan

3.5.1 Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3.2 Alat dan Bahan penelitian

No	Alat	Fungsi
1	Clamp Meter	Mengukur arus listrik
2	Multimeter	Mengukur tegangan
3	Panel Kontrol Generator	Monitoring parameter generator
4	Stopwatch	Mengukur waktu operasi
5	Kamera/Smartphone	Dokumentasi penelitian
6	Buku Catatan	Mencatat data penelitian

3.5.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Bahan bakar solar.
2. Oli mesin generator set.
3. Data operasional generator set.
4. Beban listrik rumah staff dan fasilitas umum.

3.6 Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan sebagai berikut:

1. Observasi lapangan pada generator set diesel.
2. Identifikasi masalah penelitian.
3. Persiapan alat pengukuran penelitian.
4. Pengambilan data operasional generator set.
5. Pengukuran daya, arus, tegangan, dan konsumsi bahan bakar.
6. Perhitungan efisiensi generator set.
7. Analisis pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi generator.
8. Penarikan kesimpulan penelitian.

3.7 Teknik Analisis Data

Data mentah yang telah dikumpulkan dari observasi lapangan tidak dapat langsung digunakan untuk menyimpulkan hasil penelitian, melainkan harus melalui serangkaian tahapan pengolahan dan perhitungan matematis. Oleh karena itu,

penelitian ini menggunakan teknik analisis data deskriptif kuantitatif. Pendekatan kuantitatif dipilih karena seluruh parameter riil yang ditarik dari instrumen panel dan logbook seperti fluktuasi tegangan, pergerakan arus, serta volume konsumsi bahan bakar harian merupakan data berupa angka pasti (*numerical*) yang merepresentasikan kondisi fisik generator.

Angka-angka *empiris* tersebut kemudian diekstraksi dan disubstitusikan ke dalam persamaan-persamaan kelistrikan dan termodinamika dasar. Tujuan akhir dari teknik analisis data ini adalah untuk mengkuantifikasi dan menemukan korelasi yang terukur mengenai seberapa besar dampak dari fluktuasi pembebanan listrik (sebagai variabel bebas) terhadap pergerakan tingkat efisiensi sistem konversi energi dan rasio konsumsi bahan bakar (sebagai variabel terikat).

3.7.1 Perhitungan Daya Generator

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) berkapasitas besar pada umumnya mengadopsi sistem distribusi kelistrikan arus bolak-balik (AC) tiga fasa, termasuk pada unit generator *Cummins* 275 kVA yang menjadi objek penelitian ini. Berbeda dengan sistem instalasi satu fasa pada skala rumah tangga kecil, perhitungan daya pada sistem tiga fasa melibatkan tegangan antar-fasa (*line-to-line*) dan elemen koefisien akar tiga ($\sqrt{3}$) sebagai representasi dari beda sudut fasa listrik sebesar 120 derajat.Dalam tahapan analisis kelistrikan ini, daya yang difokuskan untuk dihitung adalah Daya Aktif Keluaran (P_{out}) dengan satuan ukur Watt atau kiloWatt (kW). Daya aktif adalah daya nyata yang benar-benar terserap oleh alat elektronik beban (seperti jaringan penerangan, perangkat kantor, dan motor listrik pompa air) untuk melakukan kerja yang riil. Perhitungan daya aktif ini sangat krusial karena nilainya secara langsung dikalikan dengan parameter faktor daya atau *Power Factor* ($cos\,\varphi$) dari sistem instalasi yang terhubung. Persamaan matematis dasar yang digunakan untuk menghitung daya aktif keluaran tiga fasa adalah sebagai berikut:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times cos\ \phi$$

Keterangan:

P = daya aktif (W)

V = tegangan (V)

I = arus (A)

$cos\ \phi$ = faktor daya

3.7.2 Perhitungan Persentase Beban

Karakteristik pembebanan generator di lokasi penelitian tidak pernah berada dalam kondisi yang statis; nilainya selalu berfluktuasi secara dinamis bergantung pada jumlah dan jenis peralatan listrik fasilitas umum yang sedang aktif menyala, terutama perbandingan aktivitas antara siang dan malam hari. Untuk mengetahui seberapa berat rasio beban kerja (*workload*) yang sedang ditanggung oleh generator penggerak pada suatu waktu tertentu, mutlak diperlukan analisis persentase pembebanan atau *loading factor.*

Perhitungan persentase beban ini dilakukan dengan mengomparasikan daya semu beban kelistrikan aktual yang sedang disuplai dengan total kapasitas daya terpasang maksimum (*rating capacity*) yang direkomendasikan oleh pabrikan generator (yaitu 275 kVA). Mendiagnosis persentase pembebanan ini sangat esensial sebagai pijakan awal bagi peneliti untuk mengkategorikan apakah generator sedang beroperasi pada zona optimalnya, masuk ke dalam zona kritis beban berlebih (*overload*), atau justru beroperasi secara merugi karena kekurangan suplai beban (*underload*). Persentase pembebanan tersebut dirumuskan melalui persamaan:

$$\%Beban = \frac{Pbeban}{Pmaks} \times 100\%$$

Keterangan:

$Pbeban$ = daya beban generator

$Pmaks$ = kapasitas maksimum generator

3.7.3 Perhitungan Efisiensi Generator

Konsep efisiensi pada dasarnya bersandar pada kaidah hukum kekekalan energi termodinamika. Evaluasi efisiensi bertujuan untuk mengukur tingkat efektivitas suatu unit mesin pembangkit dalam mentransformasikan energi masukan primer (*input*) menjadi energi keluaran yang produktif (*output*) dengan menekan kerugian daya (*power losses*) seminimal mungkin. Pada kasus operasi generator set diesel, terjadi siklus konversi energi yang bertingkat, yang diawali dari pelepasan energi kimia melalui proses pembakaran bahan bakar solar,

perubahannya menjadi energi torsi mekanik pada putaran poros poros engkol (*crankshaft*), hingga tahapan akhir berupa induksi elektromagnetik yang memproduksi energi listrik pada kumparan alternator.

Untuk memperoleh presentase efisiensi kinerja secara menyeluruh (η), daya kelistrikan yang berhasil diproduksi (P_{out}) harus dikomparasikan secara rasional dengan besaran energi kalori teoritis yang disuplai ke dalam ruang bakar oleh injektor (P_{in}). Tantangan analisis matematis dalam perhitungan ini terletak pada penyetaraan unit satuan internasional (SI) antara volume cairan bahan bakar (liter) menjadi energi kinetik (kiloWatt). Oleh karena itu, pendekatan kalkulasi dilakukan dengan memasukkan konstanta termodinamika cairan, yakni massa jenis spesifik (densitas solar $\approx 0{,}832\ kg/Liter$) serta besaran Nilai Kalor Bawah (*Lower Heating Value* / LHV $\approx 42.800\ kJ/kg$) yang merupakan standar pembakaran solar industri (*High Speed Diesel*). Konstruksi persamaan termodinamika tersebut diformulasikan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{Pout}{Pin} \times 100\%$$

Keterangan:

η = efesiensi generator (%)

$Pout$ = daya keluaran generator

Pin = daya masukan generator

3.7.4 Perhitungan Specific Fuel Consumption

Selain merepresentasikan performa operasional menggunakan satuan persentase efisiensi, parameter akademis krusial lainnya yang diakui sebagai standar kelayakan industri pembangkit listrik untuk menilai nilai keandalan ekonomi dari sebuah mesin diesel adalah *Specific Fuel Consumption* (SFC). Indikator teknik ini secara lebih spesifik menghitung dan merepresentasikan seberapa rasional rasio takaran volume cairan bahan bakar (liter) yang secara absolut harus dibakar oleh sistem injeksi untuk secara konstan membangkitkan satu satuan daya listrik (kiloWatt) selama rentang periode evaluasi satu jam.

Nilai matematis yang muncul dari perhitungan SFC sangat berpengaruh pada biaya operasional kelistrikan. Semakin kecil angka kalkulasi SFC yang didapatkan, hal tersebut membuktikan indikasi bahwa tingkat keiritan dan kesempurnaan

atomisasi pembakaran pada mesin berada pada fase yang makin tinggi. Hasil analisis kurva SFC ini pada akhirnya akan diproyeksikan sebagai tolok ukur logis dalam merumuskan masukan perbaikan mengenai skema rekomendasi pembebanan yang paling hemat biaya (*cost-effective*) bagi institusi. Persamaan rasio spesifik tersebut dihitung menggunakan perbandingan di bawah ini:

$$SFC = \frac{mf}{P}$$

Keterangan:

SFC = *Specific Fuel Consumption*

mf = konsumsi bahan bakar

P = daya keluaran generator

3.8 Pengambilan Data Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian ini, proses pengambilan data operasional Generator Set Diesel Cummins 275 kVA di PTPN IV Regional I Gunung Pamela dilakukan melalui pendekatan metode campuran (*mixed-method*), yakni memadukan observasi instrumen secara langsung dengan ekstraksi data historis administratif. Langkah-langkah prosedural pengambilan data tersebut diklasifikasikan ke dalam tiga tahapan utama sebagai berikut:

1. Pengambilan Data Parameter Kelistrikan (*Direct Observation*)

   Pengambilan data kelistrikan (*output*) dilakukan melalui pengamatan secara langsung secara *real-time* pada layar panel instrumen *Human Machine Interface* (HMI) yang terpasang pada unit generator. Pengamatan ini difokuskan pada saat terjadi pemadaman jaringan PLN sehingga generator aktif menyuplai beban fasilitas. Parameter utama yang dicatat meliputi Daya Aktif (kW), Tegangan (*Voltage*), Arus fasa (*Ampere*), dan Faktor Daya (*Cos Phi*). Pengukuran dilakukan pada waktu yang bervariasi untuk merekam karakteristik fluktuasi beban yang ekstrem, yakni pada siang hari saat fasilitas perkantoran aktif dan pada malam hari saat beban tersentralisasi di area perumahan.

2. Pengambilan Data Konsumsi Bahan Bakar dan Waktu Operasi (*Historical Data*)

   Untuk mendapatkan data masukan energi (*input*), peneliti melakukan rekapitulasi terhadap dokumen *logbook* harian milik operator kamar mesin. Data esensial yang diekstrak meliputi total volume pengisian bahan bakar solar

(dalam satuan Liter) serta durasi waktu operasional generator. Durasi waktu operasi ini didapatkan melalui perhitungan selisih angka pada instrumen *Hour Meter* (HM), yang membaca jam kerja mesin dalam format desimal (sebagai contoh pencatatan 0,15 jam atau 12,45 jam).

3. Klasifikasi Data ke dalam Skenario Pembebanan Mengingat data arus beban di lapangan senantiasa berfluktuasi setiap detiknya, serta adanya kebiasaan pembulatan angka pencatatan harian oleh pihak operator untuk keperluan administratif, maka data mentah yang telah dikumpulkan harus melalui proses penyortiran. Peneliti mengelompokkan data empiris tersebut ke dalam 4 (empat) Skenario Pembebanan yang paling representatif. Skenario tersebut mewakili rentang operasional mesin mulai dari beban sangat rendah (35 kVA) pada malam hari, hingga batas beban puncak (110 kVA) pada siang hari. Pengelompokan skenario ini bertujuan agar perhitungan *Specific Fuel Consumption* (SFC) dan persentase efisiensi konversi energi dapat dilakukan secara presisi, terstruktur, dan valid secara akademis.

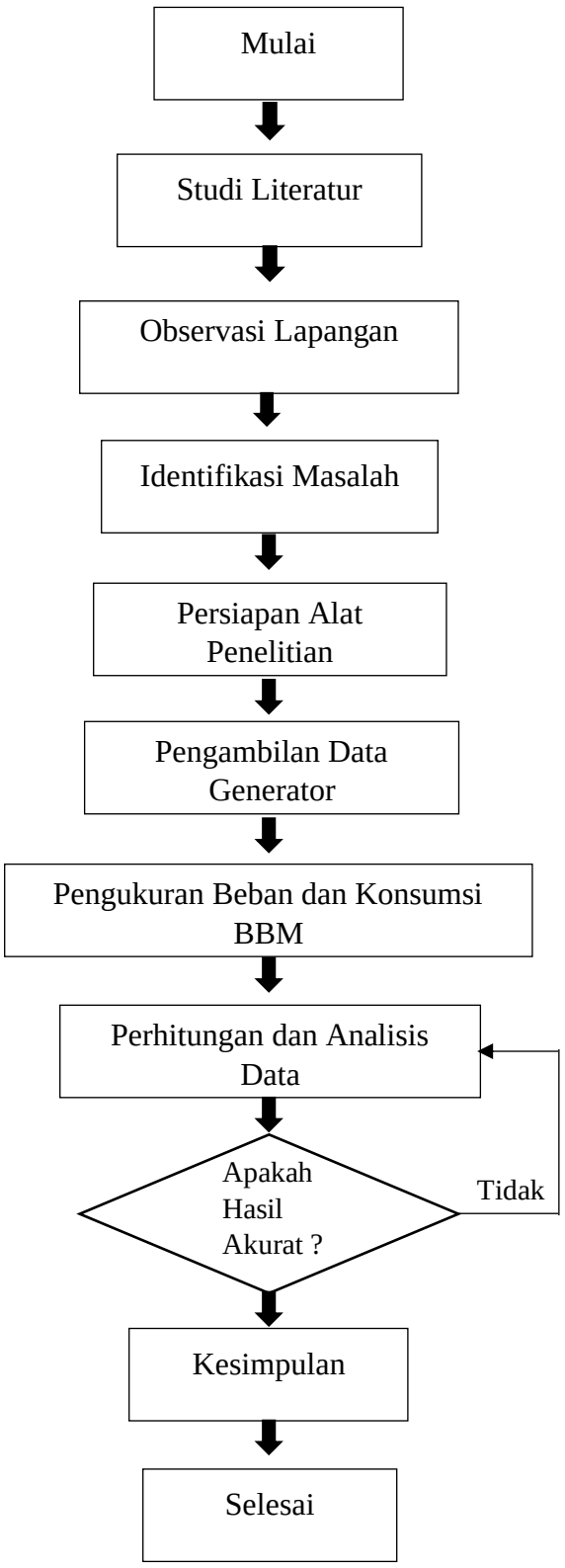
3.9 Teknik Pengumpulan Data

Tingkat keandalan (*reliability*) dan validitas dari output suatu penelitian sains terapan sangat diukur melalui akurasi dan kesesuaian metode yang diadopsi saat mengumpulkan data dasar, baik berupa data primer langsung dari instrumen maupun data historis sekunder. Dalam upaya untuk mereduksi potensi bias teknis serta memastikan angka yang diproses sepenuhnya mencerminkan realita dinamika beban di lokasi, teknik pengumpulan data direkayasa menggunakan pendekatan triangulasi metodologis. Metode paduan tersebut dirinci sebagai berikut:

1. Observasi Lapangan (Pengukuran Primer): Meninjau dan memonitor pergerakan parameter kelistrikan secara *real-time* langsung menatap panel layar instrumen *Human Machine Interface* (HMI) generator ketika sistem sedang menyuplai tegangan cadangan ke jaringan beban.
2. Kajian Dokumentasi Historis (Data Sekunder): Melakukan pendataan dan rekapitulasi data-data esensial dari berkas tulisan logbook pengawas harian, seperti kalkulasi *Running Hours Meter* (HM) untuk mengetahui durasi operasi pemadaman PLN dan riwayat volume pengisian literan solar ke dalam tangki penampungan (*fuel tank*).

3. Wawancara Teknis Mendalam: Melaksanakan diskusi operasional serta proses konfirmasi teknis (*cross-check*) bersama petugas teknisi *maintenance* di PTPN IV Gunung Pamela. Hal ini krusial untuk memastikan justifikasi batas-batas kVA mana saja yang aktif saat siang hari dan malam hari, guna menjaga presisi skenario analisis beban.

3.10 Diagram Alir Penelitian



Keterangan:

Bagan di atas merupakan diagram alir (*flowchart*) yang merepresentasikan tahapan sistematis pelaksanaan penelitian ini dari tahap awal hingga penarikan kesimpulan. Penjelasan dari masing-masing tahapan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur: Pengumpulan landasan teori, buku teks, dan jurnal ilmiah terkait karakteristik generator sinkron, rugi-rugi daya, efisiensi termal, serta parameter *Specific Fuel Consumption* (SFC).
2. Observasi Lapangan & Identifikasi Masalah: Penelitian diawali dengan Observasi langsung terhadap objek penelitian, yaitu unit Generator Set Diesel Cummins berkapasitas 275 kVA. Selanjutnya, Mengidentifikasi permasalahan terkait fluktuasi beban kelistrikan siang dan malam hari di PTPN IV Regional I Gunung Pamela..
3. Persiapan Alat & Pengambilan Data: Tahap persiapan meliputi sinkronisasi alat ukur diantara lain Clamp Meter, Multimeter, dan akses terhadap panel instrumen *Human Machine Interface* (HMI) serta buku *logbook* harian. Pengambilan data difokuskan pada pengumpulan nilai parameter operasional mesin selama periode pemadaman suplai jaringan PLN. Meliputi data Tegangan (V), Arus (A), dan Frekuensi (Hz): Diperoleh dari pembacaan instrumen langsung pada Panel Kontrol / Layar HMI (*Human Machine Interface*) generator. Volume Pemakaian Solar (Liter): Diperoleh melalui pengukuran fisik pada level tangki bahan bakar harian (*daily tank*) dengan cara membandingkan posisi volume solar sebelum genset dihidupkan (awal PLN padam) dan sesudah genset dimatikan. Data ini juga biasanya dicocokkan dengan catatan di buku *Logbook* operasional harian milik operator kebun. Waktu Nyala (Jam/Menit): Diperoleh melalui pembacaan instrumen Hour Meter yang ada pada panel genset, atau dari catatan jam hidup-mati (*start-stop*) di buku *logbook* operator.
4. Pengukuran Beban dan Konsumsi BBM: Pada tahap ini, dilakukan pencatatan variabel inti penelitian, yaitu daya aktif keluaran aktual (kiloWatt) yang disuplai ke fasilitas, serta volume absolut konsumsi bahan bakar solar (Liter/Jam) pada berbagai skenario pembebanan.

5. Perhitungan & Analisis Data: Pengolahan data empiris meliputi perhitungan daya aktif ($P = \sqrt{3} \times V \times I \times cos\,\varphi$), konversi energi bahan bakar menggunakan LHV dan densitas, serta persentase efisiensi generator ($\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$).
6. Apakah Data Akurat & Presisi?: Tahap validasi, penyortiran, dan pengelompokan data ke dalam skenario pembebanan guna memastikan hasil perhitungan valid sesuai kurva karakteristik mesin.
7. Kesimpulan: Tahap akhir berupa penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis data, guna menjawab rumusan masalah mengenai tingkat optimasi pembebanan generator di lokasi penelitian.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di fasilitas kamar mesin generator set PTPN IV Regional I Gunung Pamela. Pada masa lampau, fasilitas kelistrikan di lokasi ini difungsikan untuk menyuplai kebutuhan listrik operasional sebuah pabrik karet. Namun, seiring dengan berhentinya operasional pabrik pada tahun 2000-an, sistem kelistrikan dialihfungsikan menjadi sumber listrik cadangan (*standby generator*).

Saat ini, generator set tersebut menyuplai kebutuhan energi listrik untuk berbagai fasilitas, meliputi rumah karyawan pimpinan, kantor PTPN IV Regional I Gunung Pamela, tempat ibadah, operasional pompa air, serta penerangan jalan. Dari tiga unit generator yang pernah beroperasi di kamar mesin tersebut, saat ini hanya terdapat satu unit yang aktif dan beroperasi secara normal, yaitu Generator Set Diesel merek Cummins dengan kapasitas 275 kVA yang dipasang sejak tahun 2015. Generator ini akan otomatis atau secara manual dihidupkan apabila terjadi pemadaman suplai listrik dari jaringan utama PLN.

Karakteristik operasional fasilitas di PTPN IV Regional I Gunung Pamela inilah yang menciptakan profil pembebanan kelistrikan yang sangat fluktuatif setiap harinya. Variasi beban kelistrikan harian ini menjadi dasar utama bagi peneliti untuk menjawab tujuan penelitian, yaitu melakukan observasi teknis dan perhitungan matematis terkait sejauh mana fluktuasi beban tersebut memengaruhi tingkat efisiensi mesin serta konsumsi bahan bakar spesifik pada Generator Set Cummins 275 kVA.

4.2 Data Hasil Penelitian

Data hasil penelitian ini diperoleh melalui pengukuran dan pengamatan secara langsung (*direct measurement*) oleh peneliti terhadap parameter kelistrikan di lapangan pada saat generator set beroperasi menyuplai beban. Peneliti melakukan pemantauan *real-time* pada layar instrumen panel kontrol (HMI) serta memvalidasi fluktuasi tegangan dan arus beban yang terjadi. Selain melakukan pengukuran langsung, peneliti juga menggunakan metode triangulasi data, yaitu dengan mengumpulkan data historis berupa rekapitulasi *logbook* harian untuk mendapatkan akumulasi waktu operasi (*Hour Meter*) dan volume pengisian bahan bakar, serta

melakukan diskusi teknis dengan operator kamar mesin guna memetakan karakteristik pembagian beban secara lebih komprehensif. Pengambilan data lapangan ini difokuskan pada periode bulan Mei dan Juni 2026.

4.2.1 Karakteristik Pembebanan Generator

Berdasarkan hasil pengukuran dan pengamatan langsung, beban listrik yang disuplai oleh generator set Cummins 275 kVA bersifat fluktuatif bergantung pada waktu operasional (siang atau malam) dan jenis fasilitas yang sedang digunakan. Karakteristik pembebanan di lokasi penelitian adalah sebagai berikut:

1. Beban Puncak (Siang Hari): Pembebanan tertinggi terjadi pada siang hari dengan rentang beban antara 80 kVA hingga 120 kVA. Beban tinggi ini mayoritas dikontribusikan oleh operasional kantor dan motor listrik untuk pompa air berkapasitas 15 kW. Meskipun demikian, kapasitas beban jarang menyentuh angka 120 kVA.
2. Beban Menengah: Terjadi pada kisaran 50 kVA hingga 80 kVA, tergantung pada aktivitas pemakaian fasilitas umum.
3. Beban Rendah (Malam Hari): Pembebanan terendah terjadi pada malam hari, khususnya di atas pukul 21.00 WIB, dengan rentang daya beban berkisar antara 30 kVA hingga 40 kVA. Titik efisiensi terendah yang tercatat juga terjadi pada beban malam hari di sekitar angka 30 kVA.

4.2.2 Data Operasional dan Konsumsi Bahan Bakar

Berdasarkan hasil pengukuran dan pengamatan langsung oleh peneliti pada layar panel instrumen kontrol (HMI) ketika generator beroperasi menggantikan suplai listrik PLN, nilai parameter kelistrikan pada dasarnya selalu berfluktuasi secara *real-time* merespons dinamika tarikan beban. Sebagai contoh, arus aktual pada fasa R, S, dan T terpantau bergerak dinamis di kisaran 199,6 *Ampere* hingga 201,3 *Ampere*.

Meskipun demikian, pada saat peneliti melakukan sinkronisasi dengan data historis dari *logbook* harian, terdapat perbedaan pencatatan. Pada *logbook*, pihak operator melakukan pembulatan angka beban daya menjadi rata-rata 100 kW dan arus menjadi 200 Ampere guna menyederhanakan format pelaporan administratif harian. Oleh karena itu, dalam analisis penelitian ini, nilai fluktuasi aktual yang

menjadi acuan utama. Sementara itu, parameter yang berkaitan dengan stabilitas kerja mesin penggerak tercatat konstan dan normal, di mana Tegangan (*Voltage*) operasional stabil di kisaran 400 V, Frekuensi di 50 Hz, Faktor Daya (*Cos Phi*) di 0,9, dan putaran mekanis tertahan konstan pada 1500 RPM.

Tabel di bawah ini merepresentasikan rekapitulasi total jam kerja (waktu operasi) dan total konsumsi bahan bakar (solar) selama bulan Mei dan Juni 2026 berdasarkan perhitungan HM (*Hour Meter*) dari logbook:

Tabel 4.1 Rekapitulasi Waktu Operasi dan Konsumsi Bahan Bakar (Mei - Juni 2026)

Bulan	**HM Awal**	**HM Akhir**	**Total Waktu Operasi (Jam)**	**Total Pemakaian BBM (Liter)**
Mei 2026	3573,12	3611,38	38 Jam, 15 Menit	949
Juni 2026	3611,38	3624,41	13 Jam, 2 Menit	320

Selain data kumulatif di atas, operator juga mencatat rata-rata konsumsi bahan bakar spesifik berdasarkan rentang beban yang ditanggung oleh generator pada suatu waktu. Profil konsumsi bahan bakar terhadap variasi beban adalah sebagai berikut:

1. Beban < 50 kVA mengkonsumsi BBM sekitar 20 Liter/jam.
2. Beban 50 kVA - 80 kVA mengkonsumsi BBM sekitar 22 Liter/jam.
3. Beban > 80 kVA mengkonsumsi BBM sekitar 24 Liter/jam.
4. Beban > 100 kVA mengkonsumsi BBM sekitar 27 - 28 Liter/jam.

Angka batas bawah konsumsi sebesar 20 Liter/jam pada pembebanan di bawah 50 kVA tersebut bukanlah sebuah asumsi, melainkan norma operasional faktual yang terekam dari hasil pengamatan empiris operator kamar mesin. Secara teknis, besarnya konsumsi bahan bakar dasar pada beban yang sangat rendah ini diakibatkan oleh tuntutan kinerja mekanis mesin diesel (*prime mover*). Meskipun beban kelistrikan yang ditarik sangat kecil, mesin tetap membutuhkan batas minimal injeksi bahan bakar untuk melawan kerugian gesekan mekanis (*mechanical friction loss*) internal, serta untuk mempertahankan putaran poros rotor agar tetap stabil di 1500 RPM demi menjaga output frekuensi pada 50 Hz.

Data-data operasional empiris dan profil rentang beban yang telah dijabarkan di atas selanjutnya akan digunakan sebagai parameter utama untuk menghitung

Persentase Pembebanan, *Specific Fuel Consumption* (SFC), dan Efisiensi Aktual dari Generator Set Cummins 275 kVA.

4.2.3 Parameter Operasional Mesin dan Kelistrikan

Selain data daya dan arus, logbook harian juga mencatat indikator mekanikal dan elektrikal dasar untuk memastikan generator beroperasi dalam kondisi normal (tidak *overheat* atau *under-voltage*). Selama periode pengamatan (Mei - Juni 2026), indikator pada panel menunjukkan angka yang stabil sebagai berikut:

1. Tekanan Oli (*Oil Press*): Stabil di angka 60 psi.
2. Suhu Oli (*Oil Temp*) & Suhu Air (*Water Temp*): Keduanya stabil di angka 60°C.
3. Tegangan (*Voltage*): Tercatat di angka 400 V (tegangan *Line-to-Line*).
4. Frekuensi (*Hz*): Stabil di 50 Hz, sesuai dengan standar kelistrikan di Indonesia.
5. Faktor Daya ($Cos\ \varphi$): Menunjukkan angka 0,9.
6. Putaran Mesin (RPM): Konstan di 1500 RPM, yang merupakan syarat utama bagi generator sinkron 4 kutub untuk menghasilkan frekuensi 50 Hz.

4.2.4 Sampel Fluktuasi Durasi Operasional Harian

Durasi pemadaman listrik dari jaringan PLN sangat bervariasi setiap harinya, yang secara langsung memengaruhi total konsumsi bahan bakar harian generator. Sebagai representasi fluktuasi operasional, Tabel 4.2 menyajikan beberapa sampel data harian ekstrem yang diambil dari pencatatan bulan Mei 2026.

Table 4.2 Sampel Durasi Operasional dan Konsumsi BBM (Mei 2026**)**

Tanggal	**Waktu Start**	**Durasi Pemadaman (Jam)**	**Konsumsi BBM Harian (Liter)**	**Estimasi BBM Rata-rata (Liter/Jam)**
6 Mei 2026	06:10 WIB	21 Menit	8 Liter	22,85 Liter/Jam
9 Mei 2026	06:57 WIB	9 Menit	3 Liter	20,00 Liter/Jam
12 Mei 2026	09:54 WIB	4Jam 58 Menit	124 Liter	24,84 Liter/Jam
23 Mei 2026	00:00 WIB	12 Jam 27 Menit	323 Liter	25,94 Liter/Jam

Singkat (seperti tanggal 9 Mei), rata-rata konsumsi bahan bakar berada di angka dasar 20 Liter/jam (beban rendah). Namun, pada durasi pemadaman yang sangat panjang hingga 12 jam lebih (seperti tanggal 23 Mei), rata-rata konsumsi bahan bakar melonjak hingga mendekati 26 Liter/jam karena generator beroperasi melewati masa beban puncak pada siang hari (kantor dan pompa air aktif).

4.2.5 Analisis Awal Layar Instrumen Panel Kontrol (HMI)

Terdapat perbedaan antara data *nameplate* generator dan parameter pada panel kontrol. Berdasarkan spesifikasi, tegangan nominal generator adalah 380 V. Namun, pada logbook tercatat tegangan sebesar 400 V. Hal ini merupakan kondisi yang lumrah di lapangan, di mana sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) sering disetting sedikit lebih tinggi (sekitar 400 V) untuk mengantisipasi *voltage drop* (susut tegangan) ketika arus disalurkan melalui kabel distribusi menuju beban yang jauh.

Selain itu, pencatatan beban daya (kW) di angka 100 dan arus 3 fasa (R, S, T) di angka 200 *Ampere* pada *logbook* merupakan angka pembulatan (estimasi kasar) oleh operator. Secara matematis, apabila menggunakan data panel berupa tegangan 400 V, arus 200 A, dan $cos\ phi$ = 0,9, maka daya aktif 3 fasa yang dibangkitkan adalah:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times cos\ phi \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.1)$$

$$P = 1{,}732 \times 400 \times 200 \times 0{,}9$$

$$P = 124.704\ Watt = 124{,}7\ kW$$

Nilai daya aktual secara teoritis (124,7 kW) ini berbeda dengan yang dicatat secara pembulatan di *logbook* (100 kW). Oleh karena itu, pada sub-bab analisis data selanjutnya, perhitungan efisiensi dan pembebanan akan diklasifikasikan berdasarkan rentang pembebanan kVA hasil wawancara (beban puncak, menengah, dan rendah) untuk mendapatkan nilai aktual yang lebih presisi, alih-alih menggunakan angka pembulatan mutlak dari logbook harian.

4.3 Analisis Data

Berdasarkan data operasional harian yang diperoleh, diketahui bahwa Generator Set Cummins 275 kVA tidak pernah bekerja pada beban konstan, melainkan berfluktuasi mengikuti aktivitas penggunaan fasilitas di PTPN IV

Regional I Gunung Pamela. Untuk mempermudah analisis persentase beban, *Specific Fuel Consumption* (SFC), dan efisiensi, data fluktuasi beban tersebut diklasifikasikan ke dalam 4 (empat) skenario pembebanan representatif (mengambil nilai tengah dari rentang data), yaitu:

a. Skenario 1 (Beban Sangat Rendah - Malam Hari): Beban 35 kVA dengan konsumsi bahan bakar 20 Liter/jam.
b. Skenario 2 (Beban Menengah - Siang/Malam): Beban 65 kVA dengan konsumsi bahan bakar 22 Liter/jam.
c. Skenario 3 (Beban Tinggi - Siang Hari): Beban 90 kVA dengan konsumsi bahan bakar 24 Liter/jam.
d. Skenario 4 (Beban Puncak - Kantor & Pompa Air Aktif): Beban 110 kVA dengan konsumsi bahan bakar 27,5 Liter/jam.

Pada perhitungan di bawah ini, konversi daya semu (kVA) menjadi daya aktif (kW) menggunakan faktor daya ($Cos\ phi$) sebesar 0,8 sesuai dengan standar spesifikasi pada *nameplate* generator.

4.3.1 Perhitungan Persentase Pembebanan

Persentase pembebanan dihitung untuk mengetahui seberapa besar beban yang ditanggung generator dibandingkan dengan kapasitas maksimumnya (275 kVA). Berdasarkan persamaan pada Bab 3:

$$\%\text{Beban} = \left(\frac{\text{Sbeban}}{\text{Smaks}}\right) 100\% \quad \text{.....(4.2)}$$

1. Skenario 1 (35 kVA): $(35 / 275) \times 100\% = 12{,}72\%$
2. Skenario 2 (65 kVA): $(65 / 275) \times 100\% = 23{,}63\%$
3. Skenario 3 (90 kVA): $(90 / 275) \times 100\% = 32{,}72\%$
4. Skenario 4 (110 kVA): $(110 / 275) \times 100\% = 40{,}00\%$

Dari hasil di atas, terlihat bahwa secara keseluruhan generator selalu mengalami kondisi underload (bekerja di bawah 50% dari kapasitas maksimalnya).

4.3.2 Perhitungan Specific Fuel Consumption (SFC)

SFC menunjukkan tingkat efisiensi penggunaan bahan bakar terhadap daya listrik (kW) yang dihasilkan per jam.

Rumus:

$$SFC = \frac{mf}{Pout} \text{.....(4.3)}$$

(Di mana mf adalah konsumsi BBM dalam Liter/jam, dan $Pout$ adalah daya aktif dalam kW).

a) $Skenario\ 1: Pout = 35\ kVA \times 0{,}8\ =\ 28\ kW$

$$SFC =\ 20\ Liter/jam\ /\ 28\ kW =\ 0{,}714\ Liter/kWh$$

b) $Skenario\ 2: Pout = 65\ kVA \times 0{,}8 =\ 52\ kW$

$$SFC = 22\ Liter/jam/\ 52\ kW\ =\ 0{,}423\ Liter/kWh$$

c) $Skenario\ 3: Pout = 90\ kVA \times 0{,}8 = 72\ kW$

$$SFC = 24\ Liter/jam/\ 72\ kW = 0{,}333\ Liter/kWh$$

d) $Skenario\ 4: Pout = 110\ kVA \times 0{,}8 = 88\ kW$

$$SFC\ =\ 27{,}5\ Liter/jam/88\ kW = 0{,}312\ Liter/kWh$$

4.3.3 Perhitungan Efisiensi Aktual Generator Set

Untuk menghitung efisiensi ($\eta = \frac{Pout}{Pin} \times 100\%$), diperlukan nilai Daya Masukan (P_{in}) dari bahan bakar solar dalam satuan kW. P_{in} dihitung dengan standar nilai densitas solar ($\rho \approx\ 0{,}832\ kg/Liter$) dan Nilai Kalor Bawah ($LHV \approx\ 42.800\ kJ/kg$).

Rumus P_{in} konversi ke kW:

$$P_{in}(kW)\ =\ \frac{m_f\ (Liter/jam)\ \times\ 0{,}832\ \ kg/Liter \times\ 42.800\ kJ/kg}{3600\ detik}$$

$$P_{in}(kW) =\ m_f \times\ 9{,}89$$

Berikut adalah perhitungan efisiensi untuk masing-masing skenario pembebanan:

1. Skenario 1 (Beban Sangat Rendah - 28 kW):
   a) $P_{in} = 20 \times 9{,}89 = 197{,}8\ kW$
   b) $\eta = (28\ /\ 197{,}8)\ \times\ 100\% = 14{,}15\%$
2. Skenario 2 (Beban Menengah - 52 kW):
   a) $P_{in} = 22 \times 9{,}89 = 217{,}5\ kW$
   b) $\eta = (52\ /\ 217{,}5)\ \times 100\% = 23{,}90\%$
3. Skenario 3 (Beban Tinggi - 72 kW):
   a) $P_{in} = 24\ \times 9{,}89 = 237{,}3\ kW$
   b) $\eta = (72\ /\ 237{,}3)\ \times 100\% = 30{,}34\%$

4. Skenario 4 (Beban Puncak - 88 kW):

a) $P_{in} = 27{,}5 \times\ 9{,}89 = 271{,}9\ kW$

b) $\eta = (88\ /\ 271{,}9)\ \times 100\% = 32{,}36\%$

4.3.4 Rekapitulasi Hasil Analisis

Untuk mempermudah pembacaan data, seluruh hasil analisis matematis dampak perubahan beban terhadap parameter operasional generator set Cummins 275 kVA dirangkum pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Rekapitulasi Hasil Analisis Kinerja Generator Set Cummins 275 kVA

Skenario Beban	**Beban Semu (kVA)**	**Daya Kelistrikan Aktual / Pout (kW)**	**Persentase Pembebanan (%)**	**Konsumsi BBM Aktual (Liter/Jam)**	**Spesific Fuel Consumption (Liter/kWh)**	**Efisiensi Mesin / Sistem (%)**
Skenario 1 (Malam)	35	28	12,72	20,0	0,714	14,15
Skenario 2 (Menengah)	65	52	23,63	22,0	0,423	23,90
Skenario 3 (Tinggi)	90	72	32,72	24,0	0,333	30,34
Skenario 4 (Puncak)	110	88	40,00	27,5	0,312	32,36

Hasil perhitungan pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa operasional generator pada pembebanan rendah (Skenario 1) menghasilkan efisiensi yang tergolong rendah, yaitu sebesar 14,15% dengan SFC sebesar 0,714 Liter/kWh. Rendahnya efisiensi ini disebabkan oleh kondisi underload pada generator. Efisiensi operasional mengalami peningkatan secara signifikan seiring dengan bertambahnya persentase pembebanan hingga mencapai nilai optimal 32,36% pada Skenario 4.

4.4 Pembahasan

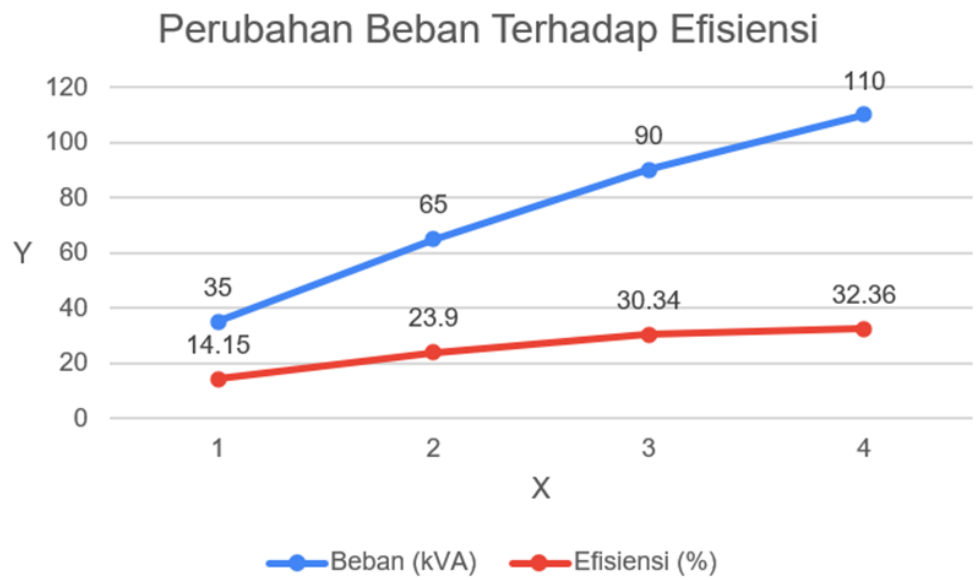
Berdasarkan hasil pengolahan data pada sub-bab sebelumnya, analisis dapat difokuskan untuk menjawab rumusan masalah mengenai pengaruh fluktuasi beban terhadap efisiensi, korelasi dengan konsumsi bahan bakar, serta penentuan kondisi operasional yang optimal pada Generator Set Cummins 275 kVA di PTPN IV Regional I Gunung Pamela.

4.4.1 Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator Set Diesel

Hasil perhitungan pada Tabel 4.3 menunjukkan adanya korelasi positif yang signifikan antara persentase pembebanan dengan tingkat efisiensi generator. Ketika generator menanggung beban yang sangat rendah pada malam hari (35 kVA atau 12,72% dari kapasitas total), efisiensi sistem berada pada titik terendah, yaitu 14,15%. Sebaliknya, saat beban meningkat mencapai titik puncak pada siang hari (110 kVA atau 40,00% dari kapasitas total), efisiensi operasional generator ikut naik menjadi 32,36%.

Kondisi ini sejalan dengan teori rugi-rugi daya pada generator. Pada saat generator beroperasi, terdapat rugi-rugi konstan (seperti rugi besi/inti dan rugi mekanis akibat gesekan bantalan) yang nilainya tetap dan tidak dipengaruhi oleh besarnya beban listrik yang terhubung. Ketika beban yang disuplai sangat kecil (seperti pada Skenario 1), daya keluaran aktual (P_{out}) menjadi sangat rendah, sementara mesin diesel tetap membutuhkan energi masukan minimum untuk mengatasi rugi-rugi konstan tersebut. Akibatnya, rasio antara daya keluaran dan daya masukan menjadi sangat kecil, yang direpresentasikan oleh persentase efisiensi yang rendah.

Lebih lanjut, fenomena rendahnya efisiensi pada beban operasional yang kecil ini sangat selaras dengan persamaan efisiensi yang melibatkan rugi-rugi daya total pada Sub-bab 2.8 dan 2.9. Dalam sistem konversi energi generator set, selisih antara Daya Masukan (P_{in}) dari bahan bakar dengan Daya Keluaran (P_{out}) kelistrikan terkonversi menjadi rugi-rugi sistem. Rugi-rugi ini tidak hanya berupa rugi termal dari mesin diesel, tetapi juga mencakup rugi-rugi pada alternator seperti rugi tembaga ($P_{cu} = I^2R$) pada kumparan stator, rugi besi pada inti magnetik, serta rugi mekanis akibat putaran rotor.Pada saat beban generator rendah (seperti pada Skenario 1 sebesar 35 kVA), daya keluaran aktual sangat kecil. Namun, generator tetap harus menanggung rugi besi dan rugi mekanis yang sifatnya konstan (tidak bergantung pada besaran beban), serta rugi tembaga akibat aliran arus eksitasi. Karena nilai rugi-rugi daya total ini mengambil porsi yang sangat besar dibandingkan daya keluaran (P_{out}) yang kecil, maka berdasarkan persamaan efisiensi di Bab 2, persentase efisiensi (η) sistem akan jatuh secara drastis.



Gambar 4.1 Grafik Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator

Gambar 4.1 di atas memvisualisasikan korelasi langsung antara variasi pembebanan generator (dalam satuan kVA) terhadap efisiensi konversi energi sistem secara keseluruhan (dalam persentase). Berdasarkan kurva yang terbentuk, terlihat jelas adanya tren linier yang positif; di mana setiap penambahan beban kelistrikan senantiasa diikuti oleh peningkatan efisiensi operasional generator set.

Pada kondisi operasional malam hari atau Skenario 1 (beban terendah sebesar 35 kVA), sistem hanya mampu mencapai efisiensi sebesar 14,15%. Angka ini merupakan titik efisiensi terburuk selama observasi. Namun, seiring berjalannya waktu operasional menuju siang hari di mana aktivitas perkantoran dan pompa air mulai menyala (Skenario 2 dan 3), efisiensi merangkak naik secara signifikan ke angka 23,90% hingga 30,34%. Puncak efisiensi tertinggi tercatat pada Skenario 4 (beban 110 kVA) dengan nilai mencapai 32,36%.

Fenomena teknis ini dapat dibuktikan melalui hukum kekekalan energi dan karakteristik rugi-rugi daya pada mesin listrik. Pada saat generator diesel dihidupkan, mesin penggerak utama (prime mover) harus terus berputar pada kecepatan konstan 1500 RPM untuk menjaga kestabilan frekuensi di angka 50 Hz. Putaran mesin yang konstan ini menghasilkan rugi-rugi mekanis (akibat gesekan bantalan dan kipas pendingin) serta rugi-rugi inti besi (*histeresis* dan arus *eddy* pada stator) yang nilainya mutlak dan tidak bergantung pada besaran beban yang terhubung.

Ketika beban yang disuplai sangat kecil (35 kVA), daya keluaran aktual yang berguna (*output*) menjadi sangat minim, sementara mesin tetap menanggung rugi-rugi konstan yang besar. Hal ini menyebabkan rasio daya keluaran terhadap daya masukan bahan bakar menjadi sangat timpang. Sebaliknya, saat pembebanan ditingkatkan hingga 110 kVA, persentase rugi-rugi konstan tersebut menjadi semakin kecil jika dikomparasikan dengan total daya aktif yang berhasil dibangkitkan. Oleh karena itu, rasio daya masukan bahan bakar yang berhasil diubah menjadi energi listrik murni menjadi semakin besar, yang direpresentasikan oleh kurva efisiensi yang terus menanjak tajam pada grafik di atas.

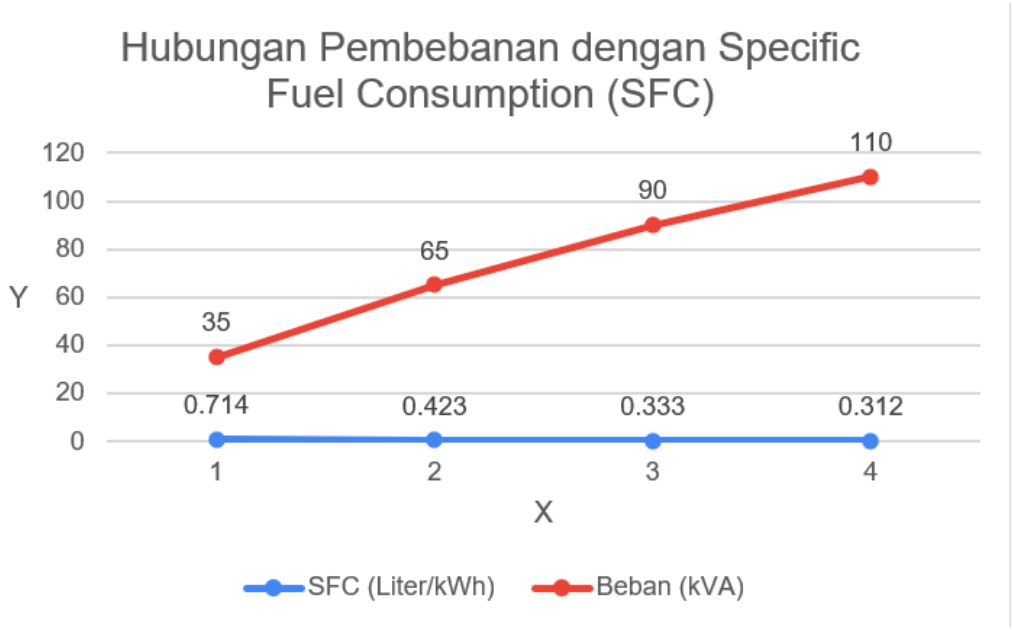
4.4.2 Hubungan Perubahan Beban dengan Konsumsi Bahan Bakar

Analisis terhadap konsumsi bahan bakar harus dilihat dari dua perspektif: konsumsi absolut (Liter/jam) dan konsumsi spesifik (*Specific Fuel Consumption* / SFC). Secara absolut, peningkatan beban akan menaikkan volume bahan bakar yang dihisap oleh mesin diesel (dari 20 Liter/jam pada beban 35 kVA, menjadi 27,5 Liter/jam pada beban 110 kVA). Hal ini wajar karena mesin diesel membutuhkan daya mekanik yang lebih besar untuk memutar rotor agar dapat menyuplai arus listrik yang lebih tinggi.

Namun, tinjauan dari sisi SFC memperlihatkan fenomena yang sebaliknya. Nilai SFC menurun secara drastis dari 0,714 Liter/kWh pada beban terendah, menjadi 0,312 Liter/kWh pada beban puncak. Penurunan nilai SFC ini membuktikan bahwa meskipun volume solar yang dihabiskan lebih banyak pada beban tinggi, namun proses konversi energi (dari pembakaran solar menjadi energi listrik) terjadi dengan jauh lebih efektif. Dengan kata lain, generator bekerja jauh lebih boros secara rasio per satuan daya (kWh) apabila dioperasikan pada pembebanan yang sangat rendah.

Fenomena pemborosan pada beban rendah ini terjadi karena pada kondisi underload, suhu dan tekanan kompresi di dalam ruang bakar (*combustion chamber*) mesin diesel tidak mencapai titik operasional idealnya. Akibatnya, proses atomisasi bahan bakar menjadi kurang sempurna, di mana sebagian energi potensial solar gagal terkonversi menjadi daya mekanik dan justru terbuang menjadi emisi gas buang atau memicu penumpukan kerak karbon. Sebaliknya, saat beban kelistrikan dinaikkan mendekati kapasitas puncaknya, temperatur mesin meningkat hingga

mencapai suhu kerja optimal. Pada kondisi ini, seluruh kabut bahan bakar yang disemprotkan oleh injektor berhasil dibakar secara tuntas dan maksimal, sehingga setiap liter solar mampu dikonversi menjadi daya listrik (kWh) dengan sangat efisien.



Gambar 4.2 Grafik hubungan pembebabnan dengan *spesific fuel consumption*

Gambar 4.2 menyajikan komparasi antara tren peningkatan daya beban kelistrikan (garis merah) dengan tingkat Konsumsi Bahan Bakar Spesifik atau *Specific Fuel Consumption* (garis biru). Berlawanan dengan grafik efisiensi sebelumnya, kurva SFC justru menunjukkan korelasi yang berbanding terbalik (korelasi negatif). Grafik ini secara eksplisit membuktikan bahwa secara spesifik per satuan daya (kWh), generator bekerja jauh lebih hemat bahan bakar ketika menanggung beban yang lebih berat.

Pada fase beban sangat rendah (35 kVA), nilai SFC mencapai titik tertingginya yaitu 0,714 Liter/kWh. Ini berarti, untuk menghasilkan 1 kWh energi listrik pada malam hari, mesin diesel Cummins harus membakar hingga 0,714 liter solar. Namun, terlihat adanya penurunan kurva biru yang sangat tajam (*steep drop*) ketika beban dinaikkan menjadi 65 kVA, di mana SFC turun drastis menjadi 0,423 Liter/kWh. Penurunan ini terus melandai hingga menyentuh titik operasional paling hemat pada beban puncak 110 kVA, dengan nilai SFC hanya sebesar 0,312

Liter/kWh. Terdapat selisih penghematan bahan bakar spesifik lebih dari 50% antara operasional beban rendah dan beban puncak.

Penurunan drastis nilai SFC ini sangat erat kaitannya dengan karakteristik termodinamika pembakaran ruang bakar (*combustion chamber*) pada mesin diesel. Mesin diesel industri berkapasitas besar seperti Cummins 275 kVA dirancang untuk beroperasi secara optimal pada rentang suhu kerja yang tinggi. Pada saat generator mengalami kondisi *underload* (beban sangat rendah), tekanan silinder dan temperatur gas buang tidak mencapai titik optimalnya. Hal ini menyebabkan proses atomisasi dan pembakaran solar menjadi tidak sempurna, sehingga banyak energi potensial dari bahan bakar yang terbuang sia-sia menjadi emisi gas buang tanpa terkonversi menjadi torsi mekanik.

Sebaliknya, ketika beban generator mendekati separuh dari kapasitasnya (110 kVA), suhu dan tekanan kompresi di dalam silinder meningkat secara proporsional. Suhu ruang bakar yang ideal ini memungkinkan bahan bakar solar terbakar dengan jauh lebih sempurna dan terkonversi maksimal menjadi tenaga putar untuk memutar alternator. Implikasi langsung dari fenomena inilah yang terekam pada grafik, di mana operasional siang hari (beban tinggi) jauh lebih ekonomis secara rasio bahan bakar dibandingkan operasional malam hari.

4.4.3 Evaluasi Kondisi Operasional dan Fenomena *Underload*

Merujuk pada tinjauan pustaka mengenai karakteristik performa generator sinkron dan termodinamika mesin diesel sebagaimana dikemukakan oleh Stephen J. Chapman dalam *Electric Machinery Fundamentals* serta pedoman teknis pabrikan generator sebuah generator set diesel umumnya akan mencapai tingkat efisiensi operasional paling optimal (pembakaran paling sempurna dan rasio daya maksimal) ketika bekerja pada kisaran pembebanan 60% hingga 80% dari kapasitas maksimumnya.

Berdasarkan data operasional faktual di lapangan, beban puncak maksimal yang pernah ditanggung oleh Generator Set Cummins 275 kVA di PTPN IV Regional I Gunung Pamela hanya mencapai 110 kVA atau sekitar 40,00% dari kapasitas maksimumnya. Sementara itu, pada malam hari pembebanan turun secara drastis hingga menyentuh angka 12,72% (35 kVA).

Fakta ini menyimpulkan bahwa generator set tersebut saat ini bekerja secara terus-menerus dalam kondisi *underload* (pembebanan di bawah standar optimal). Kondisi *underload* dalam jangka panjang tidak hanya menyebabkan pemborosan bahan bakar (seperti yang ditunjukkan oleh tingginya nilai SFC pada beban rendah), tetapi juga berpotensi memicu penumpukan kerak karbon pada ruang bakar mesin diesel akibat temperatur pembakaran yang tidak mencapai titik optimal.

Oleh karena itu, pada kondisi operasional saat ini, generator set Cummins 275 kVA tersebut belum mampu bekerja pada tingkat efisiensi yang paling optimal karena kapasitas beban yang disuplai (kantor, pompa air, dan perumahan) terlalu kecil dibandingkan dengan kapasitas daya terpasang pada generator.

BAB V
KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan mengenai dampak perubahan beban terhadap efisiensi pada Generator Set Diesel Cummins 275 kVA di PTPN IV Regional I Gunung Pamela, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi: Terdapat hubungan yang berbanding lurus antara persentase pembebanan dengan tingkat efisiensi generator. Semakin tinggi persentase beban yang ditanggung, semakin tinggi pula efisiensi sistem yang dihasilkan. Pada kondisi beban terendah malam hari (35 kVA atau 12,72%), efisiensi generator anjlok di angka 14,15%. Sedangkan pada kondisi beban puncak siang hari (110 kVA atau 40,00%), efisiensi operasional meningkat mencapai 32,36%.
2. Hubungan Perubahan Beban dengan Konsumsi Bahan Bakar: Perubahan beban memengaruhi konsumsi bahan bakar baik secara absolut maupun spesifik. Meskipun volume konsumsi solar secara absolut (Liter/jam) bertambah saat beban naik, nilai konsumsi bahan bakar spesifik atau *Specific Fuel Consumption* (SFC) justru membaik (semakin irit). Tercatat nilai SFC turun drastis dari 0,714 Liter/kWh pada beban sangat rendah menjadi 0,312 Liter/kWh pada beban puncak, menandakan konversi energi yang lebih efektif pada beban yang lebih tinggi.
3. Kondisi Pembebanan Optimal: Generator set diesel pada lokasi penelitian saat ini bekerja secara terus-menerus pada kondisi *underload* (pembebanan di bawah standar kapasitas). Pembebanan operasional faktual tertinggi hanya mencapai 40,00% dari total kapasitas maksimumnya. Generator ini belum mencapai titik efisiensi operasional yang paling optimal, mengingat efisiensi maksimal pada mesin diesel umumnya baru tercapai pada pembebanan di rentang 60% hingga 80%.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan yang telah diuraikan, beberapa saran yang dapat diberikan sebagai bahan masukan dan tindak lanjut adalah sebagai berikut:

1. Bagi Pihak PTPN IV Regional I Gunung Pamela: Mengingat generator beroperasi dalam kondisi *underload*, disarankan untuk mengevaluasi manajemen beban kelistrikan. Apabila memungkinkan secara finansial, pengadaan generator set tambahan dengan kapasitas yang lebih kecil (misalnya 100 kVA - 150 kVA) dapat menjadi solusi agar beban terlayani pada titik efisiensi tinggi (60% - 80%) sehingga konsumsi solar jauh lebih hemat.
2. Bagi Tim Pemeliharaan (*Maintenance*): Pengoperasian generator secara *underload* dalam jangka panjang rentan memicu pembakaran yang tidak sempurna (temperatur ruang bakar rendah). Oleh karena itu, disarankan untuk lebih rutin memeriksa dan membersihkan injektor serta ruang bakar guna menghindari penumpukan kerak karbon (*carbon build-up*).
3. Bagi Peneliti Selanjutnya: Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan mengkaji dampak *underload* terhadap keausan komponen mekanis (*wear and tear*) pada mesin diesel, atau dengan merancang simulasi *dummy load* (beban tiruan) sebagai upaya menstabilkan efisiensi operasional generator.

DAFTAR PUSTAKA

Annisa, Winarso, & Dwiono, W. (2019). Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Generator Sinkron. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, 1(1), 37-53.

Ardiansyah, Agung, Rudi Syahputra, and Maimun. 2024. "Studi Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi." 8(1): 47–53.

Azharny, Riza. 2021. "ANALISA PERBANDINGAN EFISIENSI GENERATOR SINKRON UNIT 1DAN 2 DI PLTA SIPANSIHAPORAS." : 96–97.

Chapman, S. J. (2012). *Electric Machinery Fundamentals* (5th ed.). New York: McGraw-Hill Education.

Clever, Osca Samudera. 2023. "ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP EFISIENSI GENERATOR DI PLTU EMBALUT UNIT 3." *ELECTROPS : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro* (Vol 2, No 2 (2023): ELECTROPS : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro): 35–42. https://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TE/article/view/22837/7265.

Fadilah, Rafli, Sofian Yahya, and Sofyan Muhammad Ilman. 2024. "Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator 55 MW Unit 3 Di PLN Indonesia Power UBP Kamojang." *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar* 15(1): 139–47. doi:10.35313/irwns.v15i1.6206.

Fatih, Muhammad, and M Dalaeka Idris. 2024. "Analisis Efi Siensi Generator Set G8 Di Unit Pembangkit Dan Distribusi Listrik PPSDM Migas." 14(2): 115–30.

Hajar, I., & others. (2019). Analisis Pengaruh Beban Terhadap Efisiensi Generator Unit 2 PLTP PT. Indonesia Power UPJP Kamojang. *KILAT*, 8(2), 93-102.

Kemenkeu RI. 2026. "No Titleيليب." *Nucl. Phys.* 13(1): 104–16.

M. J. Denny R. Pattiapon, Jacob J. Rikumahu. 2019. "Jurnal Simetrik Vol.9, No.2, Desember 2019." 9(2): 197–207.

Manguma, Mince, Armstrong Sompotan, and Jeilen Nusa. 2021. "Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator Di Unit 2 Pltp Lahendong." *Jurnal FisTa : Fisika dan Terapannya* 2(2): 109–13. doi:10.53682/fista.v2i2.139.

Miftah Farhan, Rahmat Hidayat, Yuliarman Saragih. 2021. "Jurnal Simetrik Vol 11, No. 1, Juni 2021." 11(1): 398–403.

Muchsin Harahap, Yoga Tri, MuhammadAdam Nugraha, and M SolehNasution. 2021. "Pengaruh Perubahan Variasi Eksitasi Tegangan Terhadap Daya Reaktif Pada Generator." : 71–76.

Mustofa, Rida, and Anis Roihatin. 2024. "Analisis Pengaruh Fluktuasi Beban Terhadap Rugi Daya Stator Dan Rotor Pada Generator Sinkron Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi." *Journal of Mechanical Engineering and Applied Technology* 2: 65–70. doi:10.32497/jmeat.v2i2.5733.

Nathanael Gultom, "Studi Eksperimental Unjuk Kerja Diesel Generator Set Cummins Model N150G4 150 kVA Dengan Bahan Bakar B0, D35, B30D5 DAN B35,"2025.

Nur, Andi Ervianto, Sugeng A Karim, Program Studi, Pendidikan Teknik, Universitas Negeri Makassar, Program Studi, Pendidikan Teknik, et al. 2022. "PENGARUH PERUBAHAN BEBAAN GENERATOR TERHADAP EFISIENSI PLTU THE EFFECT OF GENERATOR LOAD CHANGES ON PLTU (STUDY ON PLTU SEMEN TONASA UNIT 35 MW)." 20(1): 62–66.

Oktrialdi, B., Harahap, P., Affandi, Balisranislam, Dewi, I., & Frapanti, S. (2021). Penerapan Solar Cell Pada Bkm Muhammadiyah Di Kota Medan Untuk Penunjang Program Budikdamber (Budidaya Ikan Dalam Ember). *ABDI SABHA: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*.

Pambudi, Prastyono Eko, Muhammad Suyanto, and Dio Septa Yogaswara. 2021. "Pengaruh Tegangan Eksitasi Terhadap Output Tegangan Generator." : 152–58.

Prasetyo, Djoko, M Zaki Latif Abrori, and Akhmad Nurfauzi. 2021. "Efisiensi Generator Set Terhadap Perubahan Beban Listrik Pada Kapal Perikanan." *Edu Elektrika Journal* 10(2): 56–61.

Pratama, Sandhika Putra, Wahyu Hayatullah, Fajar Muhammad Yakut, and Mukhamad Faeshol Umam. 2021. "Analisa Performa Gegerator Set Diesel PLTD Terhadap Perubahan Beban Di Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak Dan Gas Bumi." *Majalah Ilmiah Swara Patra* 11(1): 15–27. doi:10.37525/sp/2021-1/271.

Propulsion, Waterjet, E W P Ditinjau, and Dari Konsumsi. 2018. "Analisa Penerapan Diesel Waterjet Propulsion (DWP) Dan Electrical." 6(1): 168–77.

Ritonga, M. F., & Saragih, M. (2024). Studi Tentang Pengaruh Cooling Water Terhadap Kinerja Generator pada GT 2.1 di PLN Nusantara Power UPDK Belawan. *Circuit: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 8(1), 52-61.

S Armansyah. 2016. "Pengaruh Penguatan Medan Generator Sinkron Terhadap Tegangan Terminal." 1(3).

Setiawan, Paulus. 2022. "Estimasi Karakteristik Operasional Generator Sinkron Tiga Fase Melalui Pemodelan Parameter Berbasis Metode Derivasi Konstanta Waktu." (4): 142–52.

Tambunan, Gaul Pernandes, Universitas Negeri Medan, Helfridolin Gultom, Universitas Negeri Medan, Heber Riko, Parulian Manalu, Universitas Negeri Medan, Desman Jonto Sinaga, and Universitas Negeri Medan. 2026. "Analisis Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron 11KV Unit 2 ULPLTA Sipansihaporas." 3(1): 117–28.

LAMPIRAN

Lampiran 1 : Dokumentasi Penelitian



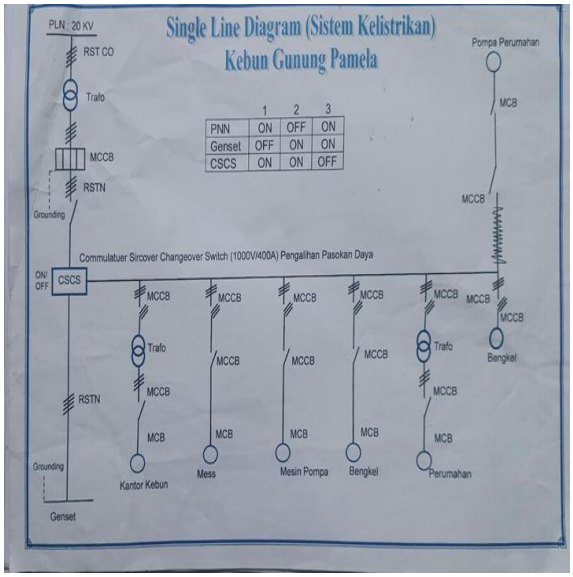


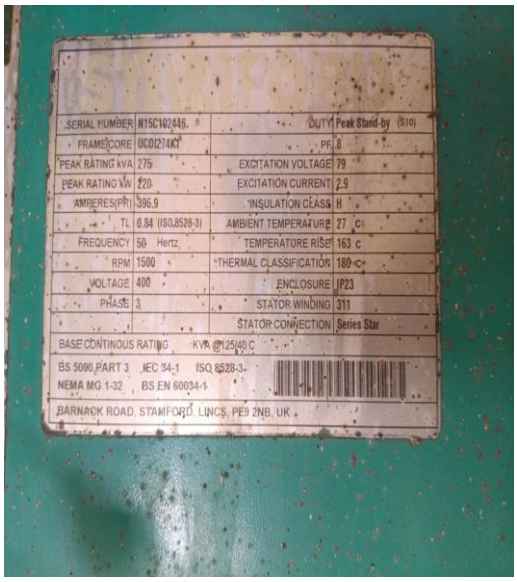




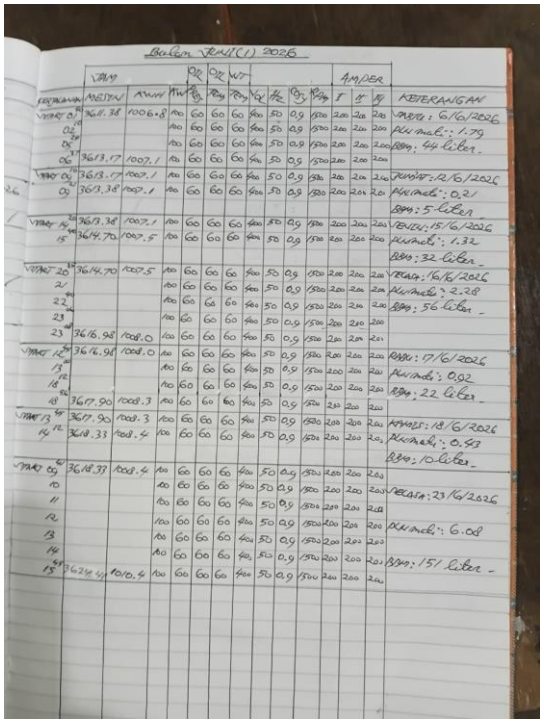

Fault Shutdown
143
Local E-Stop
Genset Data
Engine Data
Alternator Data
Faults
Help
Genset Running
Remote Start
Not in Auto
Shutdown
Warning
Manual
Stop
OK
C
PowerCommand

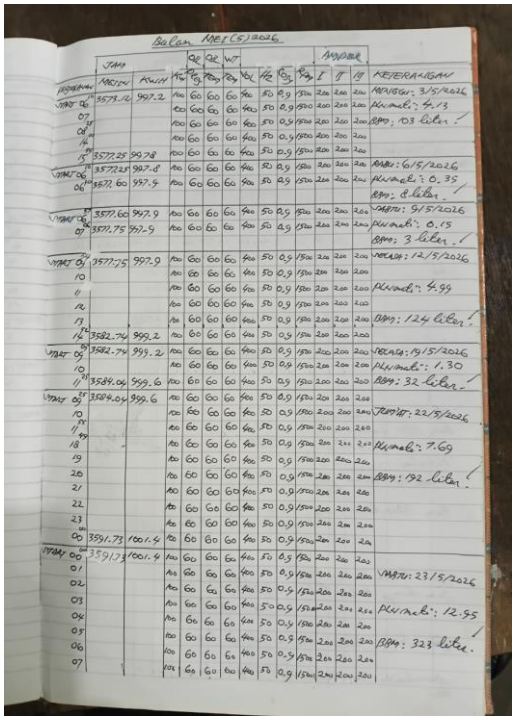

DILARANG
MENGOPERASIKAN MESIN
SELAIN PETUGAS
UTAMAKAN
KESELAMATAN
KERJA

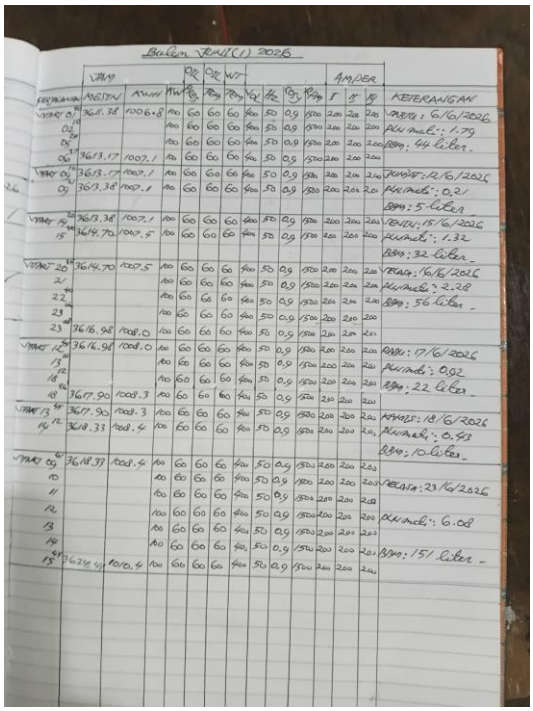

Single Line Diagram (Sistem Kelistrikan)
Kebun Gunung Pamela
PLN : 20 KV
RST CO
Trafo
MCCB
RSTN
Grounding
Commulatuer Sircover Changeover Switch (1000V/400A) Pengalihan Pasokan Daya
ON/ OFF
CSCS
Genset
Pompa Perumahan
MCB
Bengkel
Kantor Kebun
Mess
Mesin Pompa
Perumahan
1 2 3
PNN ON OFF ON
Genset OFF ON ON
CSCS ON ON OFF


SERIAL NUMBER M1SC1402445
DUTY Peak Stand-by (S10)
FRAME/CORE UCDI274K1
PF .8
PEAK RATING kVA 275
EXCITATION VOLTAGE 79
PEAK RATING kW 220
EXCITATION CURRENT 2.9
AMPERES(PR) 396.9
INSULATION CLASS H
TL 0.84 (ISO.8528-3)
AMBIENT TEMPERATURE 27 C
FREQUENCY 50 Hertz
TEMPERATURE RISE 163 C
RPM 1500
THERMAL CLASSIFICATION 180 C
VOLTAGE 400
ENCLOSURE IP23
PHASE 3
STATOR WINDING 311
STATOR CONNECTION Series Star
BASE CONTINOUS RATING KVA @125/40 C
BS 5000 PART 3 IEC 34-1 ISO 8528-3
NEMA MG 1-32 BS EN 60034-1
BARNACK ROAD, STAMFORD, LINCS, PE9 2NB, UK

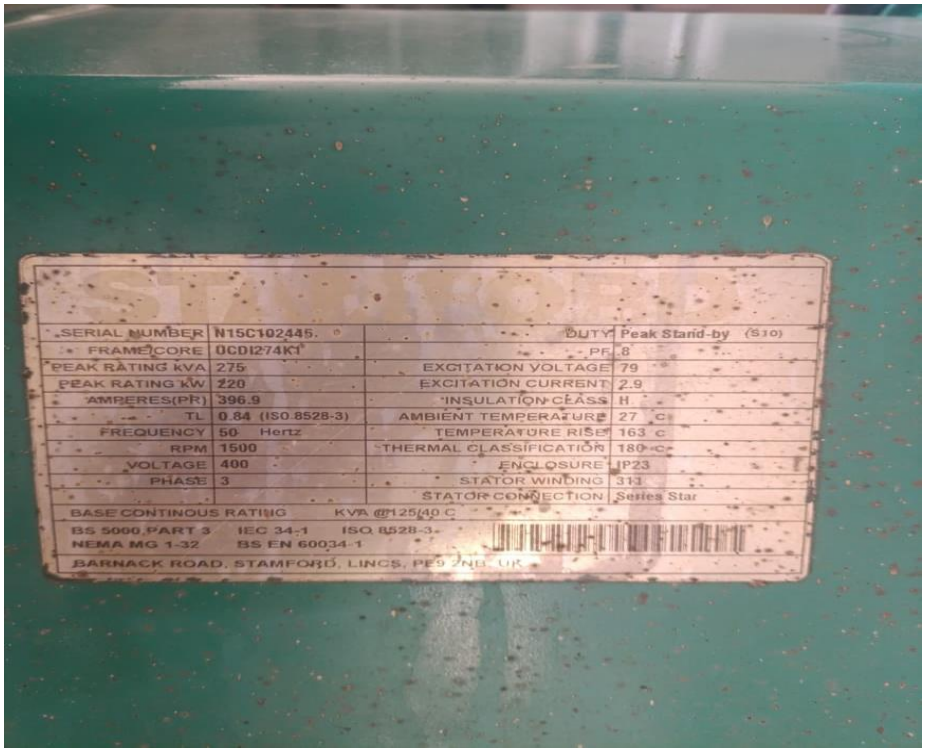
Lampiran 2 : Logbook Penelitian







Lampiran 3 : Spesifikasi Generator



SERIAL NUMBER	N15C102445.	DUTY	Peak Stand-by (S10)
FRAME CORE	0CDI274K1	PF	.8
PEAK RATING KVA	275	EXCITATION VOLTAGE	79
PEAK RATING KW	220	EXCITATION CURRENT	2.9
AMPERES(PR)	396.9	INSULATION CLASS	H
TL	0.84 (ISO 8528-3)	AMBIENT TEMPERATURE	27 c
FREQUENCY	50 Hertz	TEMPERATURE RISE	163 c
RPM	1500	THERMAL CLASSIFICATION	180 c
VOLTAGE	400	ENCLOSURE	IP23
PHASE	3	STATOR WINDING	313
		STATOR CONNECTION	Series Star

BASE CONTINOUS RATING KVA @125/40 C

BS 5000 PART 3 IEC 34-1 ISO 8528-3
NEMA MG 1-32 BS EN 60034-1

BARNACK ROAD, STAMFORD, LINCS, PE9 2NB, UK



Power Generation

Plot No.B-2, SEZ Industrial area, Nandal, Dist-Satara, India 415523.

Generating Set ISO 8528	G2			
Model Number	C275D5			
Serial Number	E15I800884			
Manufacturing Order Number	GD09-1506131			
Year of Manufacture	05-2015			
Generating Set Max Mass-Wet kg	2650			
Controller	PC1.2			
Declared Rating	ESP	PRP	COP	LTP
Rated Power (KVA)	275.0	250.0		
Rated Power (KW)	220.0	200.0		
Rated Current (A)	417.8	379.8		
Rated Voltage(V)	380	380		
Rated Frequency(Hz)	50	50		
Rated Power Factor	0.8	0.8		

CE

A041W822 CPGI-QSF-E454

DAFTAR HADIR SEMINAR TUGAS AKHIR JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK - UMSU
TAHUN AKADEMIK 2025-2026

Nama : Reynaldi Ikhsan Purba
NPM : 2207220103
Judul Tugas Akhir : Dampak Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Pada Generator Set Diesel Cummins 275 KVA di PTPN IV Regional I Gunung Pamela

TANDA TANGAN TIM DOSEN PENGUJI:

Pembimbing - I : Benny Oktarialdi, S.T., M.T. : .....
Pembanding - I : Dr. Rimbawati, S.T., M.T. : .....
Pembanding - II : Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd. : .....

No	NPM	Nama Mahasiswa	Tanda Tangan
1			1. .....
2			2. .....
3			3. .....
4			4. .....
5			5. .....
6			6. .....
7			7. .....
8			8. .....
9			9. .....
10			10. .....

Medan, 20 Agustus 2026
Ketua Prodi. Teknik Elektro

(Dr. ELVY SAHNUR NST, S.T, M.Pd)

DAFTAR EVALUASI SEMINAR FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

Nama	:	Reynaldi Ikhsan Purba
NPM	:	2207220103
Judul Tugas Akhir	:	Dampak Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Pada Generator Set Diesel Cummins 275 KVA di PTPN IV Regional I Gunung Pamela
Dosen Pembimbing - I	:	Benny Oktarialdi, S.T., M.T.
Dosen Pembanding - I	:	Dr. Rimbawati, S.T., M.T.
Dosen Pembanding - II	:	Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

KEPUTUSAN / REKOMENDASI HASIL EVALUASI:

[ ] 1. Baik dapat diterima ke sidang sarjana (collogium)

[ ] 2. Dapat mengikuti sidang sarjana (collogium) setelah selesai melaksanakan perbaikan

[ ] 3. Harus mengikuti seminar kembali

Catatan Perbaikan / Temuan Penguji :

.....

.....

.....

.....

Medan, 20 Agustus 2026

Dosen Pembimbing - I

Diketahui:

Ketua Prodi. Teknik Elektro

(Dr. ELVY SAHNUR NST, S.T, M.Pd)

Benny Oktarialdi, S.T., M.T.

DAFTAR EVALUASI SEMINAR FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

Nama	:	Reynaldi Ikhsan Purba
NPM	:	2207220103
Judul Tugas Akhir	:	Dampak Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Pada Generator Set Diesel Cummins 275 KVA di PTPN IV Regional I Gunung Pamela
Dosen Pembimbing - I	:	Benny Oktarialdi, S.T., M.T.
Dosen Pembanding - I	:	Dr. Rimbawati, S.T., M.T.
Dosen Pembanding - II	:	Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

KEPUTUSAN / REKOMENDASI HASIL EVALUASI:

[ ] 1. Baik dapat diterima ke sidang sarjana (collogium)

[✓] 2. Dapat mengikuti sidang sarjana (collogium) setelah selesai melaksanakan perbaikan

[ ] 3. Harus mengikuti seminar kembali

Catatan Perbaikan / Temuan Penguji :

Perhatikan validitas data dan satuan. Revisi semua persamaan dgn menambahi nama persamaan.

Medan, 20 Agustus 2026

Dosen Pembanding - I

Dr. Rimbawati, S.T., M.T.

Diketahui:

Ketua Prodi. Teknik Elektro

(Dr. ELVY SAHNUR NST, S.T, M.Pd)

DAFTAR EVALUASI SEMINAR FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

Nama : Reynaldi Ikhsan Purba
NPM : 2207220103
Judul Tugas Akhir : Dampak Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Pada Generator Set Diesel Cummins 275 KVA di PTPN IV Regional I Gunung Pamela

Dosen Pembimbing - I : Benny Oktarialdi, S.T., M.T.
Dosen Pembanding - I : Dr. Rimbawati, S.T., M.T.
Dosen Pembanding - II : Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

KEPUTUSAN / REKOMENDASI HASIL EVALUASI:

[ ] 1. Baik dapat diterima ke sidang sarjana (collogium)
[ ] 2. Dapat mengikuti sidang sarjana (collogium) setelah selesai melaksanakan perbaikan
[ ] 3. Harus mengikuti seminar kembali

Catatan Perbaikan / Temuan Penguji :

.....
.....
.....
.....

Medan, 20 Agustus 2026
Dosen Pembanding - II

Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

Diketahui:
Ketua Prodi. Teknik Elektro

(Dr. ELVY SAHNUR NST, S.T, M.Pd)

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Data Diri

1. Nama	: Reynaldi Ikhsan Purb
2. Tempat/Tanggal Lahir	: Gunung Pamela, 30 Agustus 2004
3. Jenis Kelamin	: Laki - Laki
4. Umur	: 22 Tahun
5. Agama	: Islam
6. Status	: Belum Menikah
7. Tinggi Badan	: 170 cm
8. Berat Badan	: 55 kg
9. Kewarganegaraan	: Indonesia
10. Alamat	: Dusun 1 Buluh Duri, Kecamatan Sipispis, Kabupaten Serdang Bedagai, Sumatera Utara
11. No. Hp	: 082271265677

Data Orang Tua

1. Nama Ayah	: Junaidi Amonangan Purba
2. Agama	: Islam
3. Kewarganegaraan	: Indonesia
4. Nama Ibu	: Wulandari
5. Agama	: Islam
6. Kewarganegaraan	: Indonesia
7. Alamat	: Dusun 1 Buluh Duri, Kecamatan Sipispis, Kabupaten Serdang Bedagai, Sumatera Utara

Riwayat Pendidikan

1. Sekolah Dasar Negeri 102116 Gunung Pamela (2010
2. Sekolah Menengah Pertama Negeri 2 Sipispis (2017 s.d 2019)
3. Sekolah Menengah Kejuruan Negeri 2 Tebing Tinggi (2019 s.d 2022)
4. S1 Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (2022 s.d. 2026)