



Analisis Kinerja Radiator pada Sistem Pendingin Gas Engine Jenbacher Tipe JMS 620 di PLTMG Batamindo PT. Maxpower Indonesia

Tugas Akhir

Oleh:

Ghyna Insyirah Putri Yunky (4232201016)

**Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi
Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Batam
2026**

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertandatangan dibawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul: “Analisis Kinerja Radiator pada Sistem Pendingin Gas Engine Jenbacher Tipe JMS 620 di PLTMG Batamindo PT. Maxpower Indonesia” adalah **hasil karya sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan, dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri**. Semua referensi yang dikutip atau dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan saya ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Batam, 22 Mei 2026

A handwritten signature in black ink is written over a yellow and blue 10,000 Rupiah stamp. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text '10000', 'METAL', and 'TAMBAH'. The serial number '27030ANX004580027' is visible at the bottom of the stamp.

Ghyna Insyirah Putri Yunky
NIM: 4232201016

Lembar Pengesahan Industri

Data Tugas Akhir ini bebas dari plagiasi dan mendapat izin untuk disimpan, dikelola dan dipublikasikan untuk kepentingan Akademik.

Disusun oleh: Ghyna Insyirah Putri Yunky

Program Studi: Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi (TRPE)

Jurusan: Teknik Elektro (Politeknik Negeri Batam)

Judul Tugas Akhir: “Analisis Kinerja Radiator pada Sistem Pendingin Gas Engine Jenbacher Tipe JMS 620 di PLTMG Batamindo PT. Maxpower Indonesia”

Perusahaan: PT. Maxpower Indonesia

Disetujui oleh :

Dosen Pembimbing:



Ir. Fauzun Atabiq, S.T., M.Cs
NIK: 110073

Pembimbing Industri:



MAX POWER
A Member of MEDCO Group

Sumardi
NIK: N1010240

Plant Manager:



MAX POWER
A Member of MEDCO Group

Ragan Deta Ibrahim
NIK: N0913571

Lembar Pengesahan

Tugas Akhir disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T)
di
Politeknik Negeri Batam

Oleh:
Ghyna Insyirah Putri Yunky (4232201016)

Tanggal Sidang: 06 Juli, 2026

Disetujui oleh :

Penguji I

Jihan Zeinyuta Rosafira, S.T., M.Eng.
NIK: 125349

Pembimbing I



Ir. Fauzun Atabiq, S.T., M.Cs.
NIK: 110073

Penguji II

Ir. Muhammad Syafei Gozali, S.T., M.T.
NIK: 107050

Analisis Kinerja Radiator pada Sistem Pendingin Gas Engine Jenbacher Tipe JMS 620 di PLTMG Batamindo PT. Maxpower Indonesia

Abstrak

Gas Engine Jenbacher JMS 620 di PLTMG Batamindo beroperasi secara kontinu untuk memenuhi kebutuhan listrik kawasan industri, sehingga membutuhkan sistem pendingin yang optimal guna mencegah overheating dan derating. Namun, seiring waktu operasi, kinerja sistem pendingin berpotensi menurun yang ditandai dengan fluktuasi temperatur jacket water dan oli, yang dipengaruhi oleh efektivitas radiator serta kinerja motor fan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja radiator dalam menurunkan temperatur return water dan oli, menilai efektivitas radiator dalam menjaga kestabilan temperatur operasional, serta mengevaluasi pengaruh kinerja motor fan terhadap laju perpindahan panas. Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif melalui studi kasus lapangan dengan pengambilan data operasional aktual pada kondisi siang dan malam hari. Analisis dilakukan menggunakan perhitungan termodinamika berbasis hukum pendinginan Newton dan metode efektivitas ε -NTU untuk mengevaluasi pelepasan kalor berdasarkan variasi beban mesin dan temperatur lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beban mesin dan temperatur lingkungan memengaruhi efektivitas radiator selama periode pengamatan dengan tingkat pengaruh yang berbeda pada masing-masing unit, di mana penurunan kinerja motor fan berkorelasi lurus dengan kenaikan temperatur mesin, sehingga hasil ini dapat menjadi acuan teknis bagi PT. Maxpower Indonesia dalam strategi pemeliharaan sistem pendingin.

Kata kunci: Radiator, Sistem Pendingin, Jenbacher JMS 620, Efektivitas, Motor Fan.

Radiator Performance Analysis on Jenbacher JMS 620 Gas Engine Cooling System at Batamindo PLTMG PT. Maxpower Indonesia

Abstract

The Jenbacher JMS 620 Gas Engine at PLTMG Batamindo operates continuously to meet industrial power needs, requiring an optimal cooling system to prevent overheating and derating. However, over the operating time, the cooling system performance potentially declines, characterized by fluctuations in jacket water and oil temperatures, which are influenced by radiator effectiveness and fan motor performance. This study aims to analyze radiator performance in reducing return water and oil temperatures, assess radiator effectiveness in maintaining operational temperature stability, and evaluate the influence of fan motor performance on the heat transfer rate. The research method uses a quantitative descriptive approach through a field case study by collecting actual operational data during day and night conditions. The analysis is conducted using thermodynamic calculations based on Newton's law of cooling and the ε -NTU effectiveness method to evaluate heat rejection based on engine load variations and ambient temperatures. The results show that engine load and ambient temperature affect radiator effectiveness during the observation period with varying degrees of influence on each unit, where a decrease in fan motor performance correlates directly with an increase in engine temperature, thus serving as a technical reference for PT. Maxpower Indonesia in cooling system maintenance strategies.

Keywords: Radiator, Cooling System, Jenbacher JMS 620, Effectiveness, Fan Motor.

Kata Pengantar

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, karunia, dan kesempatan yang diberikan, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Kinerja Radiator pada Sistem Pendingin Gas Engine Jenbacher Tipe JMS 620 di PLTMG Batamindo PT. Maxpower Indonesia” dengan baik dan tepat waktu.

Penyusunan Tugas Akhir ini merupakan bentuk pertanggungjawaban akademik sekaligus sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan dan memperoleh gelar Sarjana Terapan Terintegrasi pada Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Politeknik Negeri Batam. Penulis menyadari bahwa kelancaran proses penyusunan hingga penyelesaian Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan, doa, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ayahanda Gunawan dan Ibunda Yunarti, selaku kedua orang tua tercinta yang senantiasa mendoakan, memberikan kasih sayang, serta motivasi yang tiada henti kepada penulis dari awal perkuliahan hingga selesainya Tugas Akhir ini.
2. Muhammad Kautsar Putra Gendy, selaku saudara laki-laki penulis yang selalu memberikan dukungan dan semangat dalam setiap proses yang penulis lalui.
3. Bapak Ir. Bambang Hendrawan, S.T., M.S.M., CIPMP., CISCIP., selaku Direktur Politeknik Negeri Batam.
4. Bapak Irwanto Zarma Putra, S.Pd., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi Politeknik Negeri Batam.
5. Bapak Ir. Muhammad Syafei Gozali, S.T., M.T., selaku Wali Dosen Kelas TRPE-A yang selalu memberikan bimbingan, arahan, serta motivasi kepada penulis selama masa perkuliahan.
6. Bapak Ir. Fauzun Atabiq, S.T., M.Cs., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah banyak meluangkan waktu, pikiran, dan tenaga untuk memberikan bimbingan, arahan, serta saran yang sangat berharga selama penyusunan Tugas Akhir ini.
7. Ibu Jihan Zeinyuta Rosafira, S.T., M.Eng. dan Bapak Ir. Muhammad Syafei Gozali, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan banyak evaluasi, masukan, kritik, dan saran yang membangun demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.
8. Ibu Hasnira, S.ST., M.Tr.T., selaku Koordinator Magang Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi.

9. Segenap Dosen Pengajar Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi yang telah membekali penulis dengan ilmu pengetahuan yang sangat bermanfaat selama menempuh pendidikan di Politeknik Negeri Batam.
10. Pihak PT. Maxpower Indonesia, khususnya pimpinan dan staf PLTMG Batamindo yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melaksanakan kegiatan magang industri selama 8 bulan terhitung mulai tanggal 04 Agustus 2025 hingga 03 April 2026.
11. Seluruh Tim Maintenance dan Operasional PT. Maxpower Indonesia, terutama para supervisor, teknisi, dan operator lapangan yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, membagikan ilmu, serta membantu penulis dalam proses pengambilan data lapangan.
12. Teman-teman seperjuangan Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi serta rekan magang yang telah berjuang bersama, memberikan dukungan, dan menemani penulis dalam suka maupun duka.
13. Kepada diri sendiri yang telah berjuang dengan sabar, tangguh, dan konsisten dari awal perkuliahan hingga mampu menyelesaikan penulisan Tugas Akhir ini dengan baik.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah memberikan doa, bantuan, dan dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih banyak terdapat kekurangan karena keterbatasan kemampuan dan pengalaman penulis. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik serta saran yang membangun dari pembaca sebagai bahan perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat, baik bagi penulis, institusi, perusahaan, maupun pembaca.

Batam, 22 Mei 2026



Penulis

Daftar Isi

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir	i
Lembar Pengesahan Industri	ii
Lembar Pengesahan	iii
Abstrak	iv
<i>Abstract</i>	v
Kata Pengantar	vi
Daftar Isi	viii
Daftar Gambar	xi
Daftar Tabel	xii
Bab 1. Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Manfaat	2
1.5. Batasan	3
Bab 2. Tinjauan Pustaka	4
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG)	4
2.2. Gas Engine Jenbacher JMS 620 GS-N.L	7
2.3. Sistem Pendingin (Cooling System) Aktual	9
2.3.1 Sirkuit Temperatur Tinggi (High Temperature - HT Circuit)	10
2.3.2 Sirkuit Temperatur Rendah (Low Temperature - LT Circuit)	11
2.4. Komponen Utama Sirkulasi Pendingin	12
2.4.1 Pompa Sirkulasi (Circulation Pump)	12
2.4.2 Katup Pengatur Suhu (Thermostatic Control Valve)	13
2.4.3 Tangki Ekspansi (Expansion Tank)	16
2.4.4 Preheater	17
2.5. Radiator (<i>Remote Cooling System</i>)	17

2.5.1 Konstruksi dan Prinsip Kerja	18
2.5.2 Motor Fan Radiator	19
2.5.3 Standar Pemeliharaan dan Kualitas Air Pendingin	21
2.6. Derating Mesin	22
2.6.1 Parameter Penyebab Derating	22
2.6.2 Mekanisme dan Model Matematis Derating	23
2.6.3 Karakteristik Derating Berdasarkan Manual	23
2.6.4 Korelasi dengan Kinerja Radiator	24
2.7. Landasan Teori Perpindahan Panas	24
2.7.1 Perpindahan Panas Konveksi	24
2.7.2 Laju Perpindahan Panas Aktual	25
2.7.3 Efektivitas Radiator	25
2.7.4 Interpretasi Nilai Efektivitas Radiator	27
2.8. Kerangka Pemikiran	27
2.9. Hipotesis Penelitian	28
Bab 3. Metodologi Penelitian	30
3.1. Perancangan	30
3.1.1. Studi Literatur	31
3.1.2. Observasi Lapangan	31
3.1.3. Pengumpulan Data	31
3.2. Waktu dan Tempat Penelitian	32
3.2.1. Tempat Penelitian	32
3.2.2. Waktu Penelitian	32
3.3. Alat dan Bahan Penelitian	33
3.3.1. Bahan Penelitian (Objek Studi Kasus)	33
3.3.2. Instrumen Pengumpulan Data (Alat)	33
3.4. Metode Pengumpulan Data	33
3.5. Variabel Penelitian	34
3.6. Pengolahan/Perhitungan Data	35

3.7. Rencana Visualisasi Data	37
Bab 4. Hasil dan Pembahasan	38
4.1. Data Hasil Pengamatan	38
4.2. Pengolahan/Perhitungan Data	38
4.2.1. Penentuan Laju Aliran Massa Air Pendingin	39
4.2.2. Pemisahan Analisis Sirkuit HT dan LT	39
4.2.3. Perhitungan Laju Perpindahan Panas Aktual (<i>Q_{aktual}</i>)	40
4.2.4. Perhitungan Laju Perpindahan Panas Maksimal <i>Q_{maks}</i>	41
4.2.5. Perhitungan Efektivitas Radiator (ϵ)	41
4.2.6. Evaluasi Kinerja Motor Fan (<i>P_{fan}</i>)	42
4.2.7. Analisis Potensi Derating (<i>P_{derated}</i>)	43
4.3. Hasil Perhitungan	44
4.4. Pembahasan	46
4.4.1. Pengaruh Temperatur Lingkungan terhadap Efektivitas Radiator	46
4.4.2. Evaluasi Pembebanan Motor Fan Radiator	49
4.4.3. Pengaruh Penurunan Temperatur Air terhadap Beban Mesin ...	52
4.4.4. Analisis Potensi Derating Berdasarkan Temperatur Lingkungan	55
4.4.5. Analisis Potensi Derating Mesin	58
4.5. Analisis Pengujian Hipotesis Penelitian	59
Bab 5. Kesimpulan dan Saran	61
5. 1. Kesimpulan	61
5. 2. Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	63
BIODATA	65
LAMPIRAN	66
Lampiran A. Data Hasil Pengamatan	66
Lampiran B. Hasil Perhitungan	70
Lampiran C. Dokumentasi Pengamatan	74

Daftar Gambar

Gambar 1. PLTMG Batamindo (PT. Maxpower Indonesia)	4
Gambar 2. Diagram P-V Siklus Otto	6
Gambar 3. Nameplate Gas Engine Jenbacher JMS 620	8
Gambar 4. Skema Sistem Pendingin Jenbacher JMS 620	10
Gambar 5. Pompa Sirkulasi Air Pendingin (Jacket Water Pump).....	13
Gambar 6. Katup Termostatik Mekanis (AMOT Valve).....	14
Gambar 7. Motor Servo SAUTER dan 3-Way Valve	15
Gambar 8. Nameplate Motor Servo SAUTER.....	15
Gambar 9. Tangki Ekspansi pada Unit Mesin	16
Gambar 10. Pre-heater.....	17
Gambar 11. Radiator PLTMG Batamindo	18
Gambar 12. Nameplate Spesifikasi Radiator	18
Gambar 13. Nameplate Motor Fan Radiator.....	19
Gambar 14. Motor Fan Radiator KEMAO	21
Gambar 15. Diagram alir	30
Gambar 16. Hubungan Temperatur Lingkungan terhadap Efektivitas Radiator pada Unit GE#01	47
Gambar 17. Hubungan Temperatur Lingkungan terhadap Efektivitas Radiator pada Unit GE#03	48
Gambar 18. Tren Konsumsi Arus Motor Fan terhadap Waktu Pengamatan pada Unit GE#01	49
Gambar 19. Tren Konsumsi Arus Motor Fan terhadap Waktu Pengamatan pada Unit GE#03	50
Gambar 20. Hubungan Penurunan Temperatur Air Pendingin (ΔT) terhadap Beban Mesin pada Unit GE#01.....	53
Gambar 21. Hubungan Penurunan Temperatur Air Pendingin (ΔT) terhadap Beban Mesin pada Unit GE#03.....	54
Gambar 22. Analisis Potensi Derating Berdasarkan Temperatur Lingkungan pada Unit GE#01	56
Gambar 23. Analisis Potensi Derating Berdasarkan Temperatur Lingkungan pada Unit GE#03	57

Daftar Tabel

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Motor Servo SAUTER.....	15
Tabel 2. Spesifikasi Teknis Motor Fan Radiator	20
Tabel 3. Estimasi Derating vs Temperatur Udara Masuk.....	24
Tabel 4. Sampel Data Perhitungan	39
Tabel 5. Evaluasi Pembebanan Motor Fan Radiator terhadap Spesifikasi Nameplate	51
Tabel 6. Tabel Potensi Derating GE#01	58
Tabel 7. Tabel Potensi Derating GE#03	58
Tabel 8. Data Operasional Sistem Pendingin – GE#01.....	66
Tabel 9. Data Operasional Sistem Pendingin – GE#03.....	68
Tabel 10. Tabel Hasil Perhitungan Sistem Pendingin – GE#01	70
Tabel 11. Tabel Hasil Perhitungan Sistem Pendingin – GE#03	72

Bab 1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Gas Engine Jenbacher JMS 620 yang beroperasi di PLTMG Batamindo PT. Maxpower Indonesia dioperasikan secara kontinu untuk memenuhi kebutuhan energi listrik kawasan industri. Dalam siklus kerjanya, mesin gas menghasilkan panas buang (waste heat) dalam jumlah besar yang harus dibuang melalui sistem pendingin untuk menjaga kestabilan temperatur operasi. Seiring dengan bertambahnya jam operasi (running hours), kinerja sistem pendingin berpotensi mengalami degradasi yang ditandai dengan fluktuasi temperatur jacket water dan oli pelumas. Apabila kondisi ini tidak dikendalikan melalui evaluasi operasi dan perawatan yang tepat, penurunan kinerja sistem pendingin dapat berdampak langsung pada penurunan efisiensi termal mesin serta meningkatkan risiko kerusakan komponen akibat overheating [1], [6].

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas parameter yang mempengaruhi kinerja sistem pendingin pada mesin pembangkit. Studi terkait pengaruh water coolant terhadap efektivitas radiator menunjukkan bahwa penurunan koefisien perpindahan panas akan berdampak signifikan terhadap kemampuan radiator dalam membuang kalor dari mesin [7]. Selain faktor internal fluida, faktor eksternal seperti temperatur udara lingkungan (ambient temperature) juga terbukti mempengaruhi unjuk kerja radiator, di mana kenaikan temperatur lingkungan dapat menurunkan laju pelepasan panas secara drastis pada sistem pendingin PLTGU maupun mesin gas [3].

Selain faktor tersebut, komponen aktif seperti motor fan radiator memegang peranan krusial dalam proses pendinginan paksa (forced convection). Penelitian eksperimental membuktikan bahwa karakteristik kecepatan aliran udara yang dihasilkan oleh kipas (fan) berbanding lurus dengan laju perpindahan panas yang dicapai oleh radiator [9]. Oleh karena itu, evaluasi terhadap performa motor fan menjadi aspek yang tidak bisa dipisahkan dari analisis kinerja radiator secara keseluruhan [5].

Meskipun prinsip dasar perpindahan panas telah banyak dibahas, kajian yang secara spesifik menganalisis kinerja radiator pada Gas Engine Jenbacher JMS 620 dengan berbasis data operasional aktual dan spesifikasi teknis motor fan di lapangan masih terbatas. Berdasarkan urgensi tersebut, penelitian ini dilakukan dengan judul “Analisis Kinerja Radiator pada Sistem Pendingin Gas Engine Jenbacher JMS 620 di PLTMG Batamindo PT. Maxpower Indonesia”. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas perpindahan panas radiator dan mengevaluasi kinerja motor fan penggerak berdasarkan data riil di lapangan

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kinerja radiator dalam menurunkan temperatur *return water* pada sistem pendingin Gas Engine Jenbacher JMS 620 di PLTMG Batamindo PT Maxpower Indonesia berdasarkan data operasional aktual?
2. Sejauh mana efektivitas radiator mampu menjaga kestabilan temperatur *jacket water* pada rentang operasional normal (80–90°C)?
3. Bagaimana karakteristik dan keandalan operasional motor fan radiator merk KEMAO Model MT160S-6 (2,2 kW) ditinjau dari parameter arus, pembebanan daya listrik tiga fasa, serta spesifikasi teknis aktualnya?

1.3. Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian dan penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis kinerja radiator dalam menurunkan temperatur *return water* pada sistem pendingin Gas Engine Jenbacher JMS 620 berdasarkan data operasional.
2. Menghitung nilai efektivitas radiator dalam menjaga kestabilan temperatur *jacket water* dan *oil* agar tetap berada pada batas aman operasi.
3. Mengevaluasi kinerja motor fan radiator merk KEMAO Model MT160S-6 sebagai komponen utama sistem pendingin berdasarkan parameter kelistrikan dan spesifikasi teknisnya.

1.4. Manfaat

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Bagi Penulis: Menambah wawasan dan kemampuan analisis mengenai termodinamika dan perpindahan panas pada sistem pendingin mesin pembangkit skala industri.
2. Bagi Perusahaan: Memberikan gambaran teknis aktual mengenai kondisi radiator Gas Engine Jenbacher JMS 620 yang dapat digunakan sebagai acuan evaluasi pemeliharaan (*maintenance*) untuk mencegah *derating* mesin.
3. Bagi Akademisi: Menambah referensi ilmiah terapan di bidang konversi energi, khususnya mengenai analisis kinerja sistem pendingin pada Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG).

1.5. Batasan

Agar penelitian ini lebih terarah, maka dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut:

1. Objek penelitian difokuskan pada radiator sistem pendingin Gas Engine Jenbacher JMS 620 (GE#01 dan GE#03) di PLTMG Batamindo PT. Maxpower Indonesia.
2. Data yang digunakan merupakan data operasional aktual periode Februari 2026 yang meliputi: temperatur air masuk dan keluar radiator (*inlet/outlet radiator temp*), temperatur oli, temperatur lingkungan (*ambient*), serta data konsumsi arus kelistrikan motor fan.
3. Analisis motor fan dilakukan pada unit terpasang dengan spesifikasi KEMAO Model MT160S-6 (3-Phase Induction Motor, 2.2 kW).
4. Penelitian ini tidak membahas detail rancangan internal komponen intercooler dan oil cooler, namun tetap memperhitungkan temperatur oli sebagai parameter dampak keberhasilan pendinginan.
5. Fokus penelitian pada hambatan perpindahan panas dibatasi pada faktor eksternal berupa akumulasi debu pada sirip radiator dan faktor lingkungan (T_{amb}). Hal ini dikarenakan variabel tersebut bersifat lebih dinamis dan berpengaruh langsung terhadap fluktuasi efektivitas radiator dalam jangka waktu pengambilan data, dibandingkan faktor fouling internal yang membutuhkan waktu lebih lama untuk menunjukkan perubahan kinerja yang signifikan.

Bab 2. Tinjauan Pustaka

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG)

Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) merupakan jenis pembangkit termal yang memanfaatkan mesin pembakaran dalam (internal combustion engine) sebagai penggerak utama (prime mover) [1]. Berbeda dengan turbin gas, PLTMG menggunakan prinsip gerak bolak-balik (resiprokal) piston yang ditenagai oleh pembakaran bahan bakar gas alam [2]. Di lokasi penelitian, sistem pembangkit dikelola oleh PT. Maxpower Indonesia untuk menunjang kebutuhan listrik Kawasan Industri Batamindo. Instalasi pembangkit ini terdiri dari 9 unit mesin yang terbagi dalam dua fase (Phase 1 dan Phase 2). Unit-unit tersebut ditempatkan secara terintegrasi dalam modul kontainer (containerized) yang tersusun rapi di area pembangkit. Visualisasi kondisi fisik deretan kontainer mesin di lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



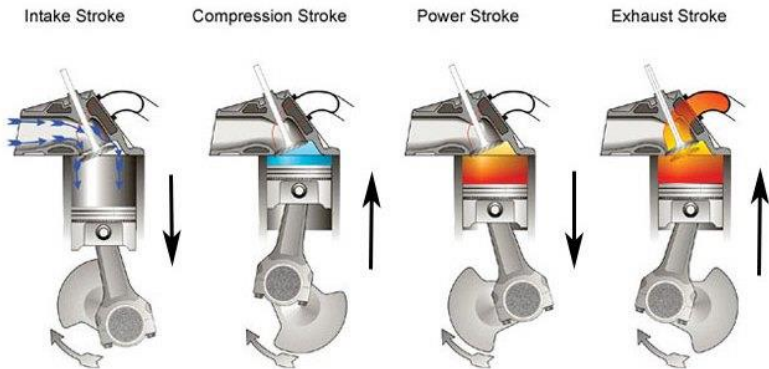
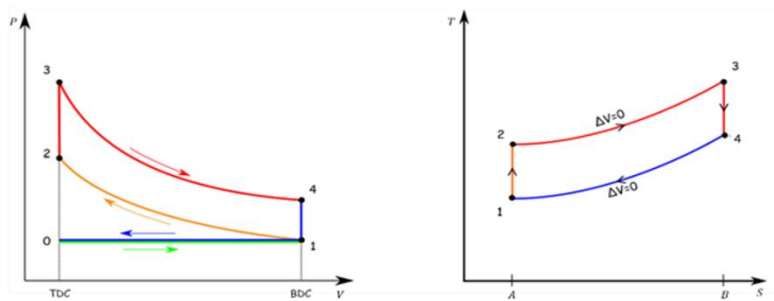
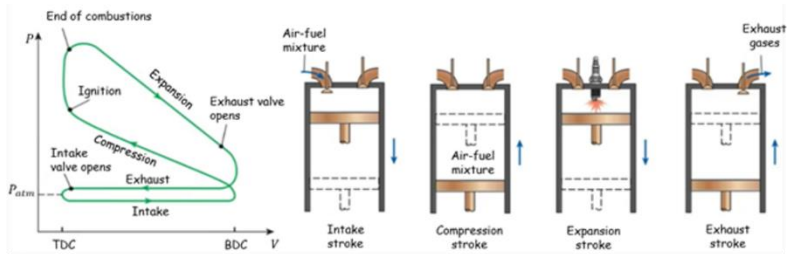
Gambar 1. PLTMG Batamindo (PT. Maxpower Indonesia)

[Sumber: Dokumentasi Lapangan]

Berdasarkan Gambar 1, terlihat bahwa unit pembangkit yang digunakan merupakan tipe stationary engine (mesin stasioner) yang terinstalasi di dalam

modul pelindung (enclosure). Meskipun bersifat modular, mesin ini terhubung dengan sistem perpipaan penunjang yang kompleks, termasuk jalur intake udara, gas buang (exhaust), dan sistem pendingin radiator yang terletak di bagian atap atau sisi kontainer. Setiap unit mesin terkopel langsung dengan generator sinkron untuk mengubah energi mekanik poros menjadi energi listrik guna disalurkan ke jaringan distribusi kawasan industri.

Secara termodinamika, prinsip kerja mesin gas Jenbacher ini didasarkan pada Siklus Otto empat langkah (four-stroke cycle). Siklus ini mengonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik melalui perubahan tekanan dan temperatur gas di dalam silinder tertutup. Proses konversi energi tersebut berlangsung dalam empat tahapan utama yang berulang secara periodik. Karakteristik perubahan termodinamika ini umumnya dijelaskan melalui Diagram P-V (Tekanan-Volume) yang menggambarkan hubungan antara tekanan di dalam ruang bakar dengan volume silinder [13], sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram P-V Siklus Otto

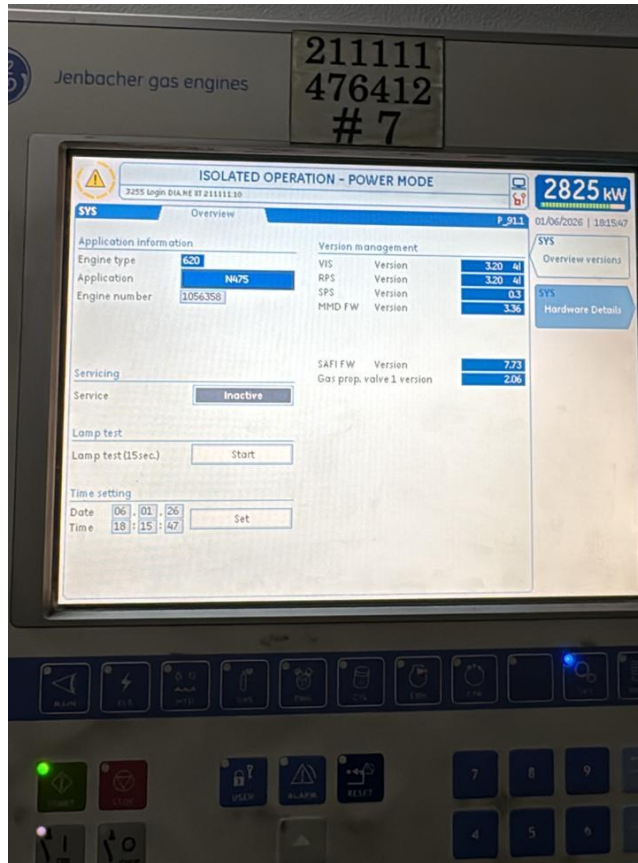
[Sumber: <https://muji.blog.unimma.ac.id/siklus-otto-ideal-dan-aktual/>]

Mengacu pada Gambar 2, Siklus Otto ideal terdiri dari empat tahapan proses yang terjadi di dalam silinder mesin, yaitu:

1. Langkah Hisap 0-1 (Intake Stroke): Piston bergerak dari Titik Mati Atas (TMA) ke Titik Mati Bawah (TMB). Katup isap terbuka, memungkinkan campuran udara dan bahan bakar gas masuk ke dalam ruang bakar.
2. Langkah Kompresi 1-2 (Compression Stroke): Piston bergerak dari TMB ke TMA dengan kedua katup tertutup. Campuran bahan bakar dikompresi secara isentropik, menyebabkan kenaikan tekanan dan temperatur yang signifikan sebelum pembakaran.
3. Langkah Tenaga 2-3-4 (Power/Expansion Stroke): Sesaat sebelum TMA, busi memercikkan bunga api yang memicu pembakaran isokhorik (volume konstan/garis lurus vertikal pada diagram). Tekanan tinggi hasil ledakan pembakaran mendorong piston kembali ke TMB (ekspansi isentropik), menghasilkan tenaga mekanik yang memutar poros engkol.
4. Langkah Buang 4-1-0 (Exhaust Stroke): Piston bergerak kembali ke TMA mendorong sisa gas pembakaran keluar melalui katup buang yang terbuka (pembuangan isokhorik dan isobaric).

2.2. Gas Engine Jenbacher JMS 620 GS-N.L

Objek utama dalam penelitian ini adalah unit pembangkit Jenbacher tipe JMS 620 GS-N.L. Di lokasi penelitian, yaitu PLTMG Batamindo (PT. Maxpower Indonesia), terdapat total 9 unit mesin pembangkit yang beroperasi. Konfigurasi pembangkit tersebut terdiri dari 7 unit tipe JMS 620 (Unit 1 s.d. Unit 7) dan 2 unit tipe JGS 620 (Unit 8 & Unit 9). Penelitian ini difokuskan pada unit 1 & Unit 3 tipe JMS 620 sebagai sampel representatif kinerja sistem pendingin. Spesifikasi detail mesin tersebut dapat dilihat pada nameplate yang ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Nameplate Gas Engine Jenbacher JMS 620

[Sumber: Dokumentasi Pribadi]

Berdasarkan Gambar 3, mesin ini memiliki konfigurasi V-20 silinder dan dilengkapi dengan turbocharger serta mixture cooling. Dalam hal teknologi pembakaran, mesin ini menerapkan prinsip pembakaran campuran miskin (lean burn) untuk menekan emisi NOx. Guna memastikan proses tersebut berjalan stabil, mesin dilengkapi dengan sistem manajemen paten Jenbacher yang disebut LEANOX [10]. Sistem LEANOX berfungsi mengontrol rasio udara-bahan bakar secara presisi berdasarkan beban mesin dan tekanan boost agar efisiensi termal

tetap optimal, di mana efisiensi tersebut sangat dipengaruhi oleh rasio kompresi pada siklus energi yang dihasilkan [13].

Mengacu pada data teknis pabrikan (Technical Diagram) dan nameplate unit terpasang, spesifikasi kinerja mesin pada kondisi standar ISO adalah sebagai berikut:

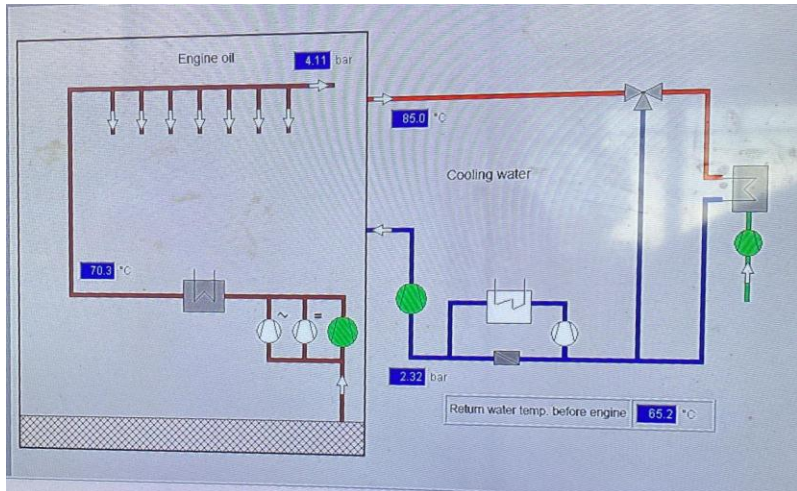
- Daya Mekanik (*Output*): 3.431 kW (Tenaga poros mesin)
- Daya Elektrik (*Gen. Output*): 3.349 kW (Daya listrik generator)
- Tekanan Suplai Gas (*Gas Train Inlet*): Rentang Desain 3.700 – 8.000 mbar, dengan tekanan operasional nominal diset pada 6.000 mbar (6,0 Bar)

Poin spesifikasi tekanan gas di atas mengacu pada tekanan suplai yang masuk ke jalur bahan bakar utama (gas train) sebelum diregulasi oleh gas metering valve. Meskipun pabrikan memberikan rentang toleransi yang luas (3,7 – 8,0 Bar), operasional di PLTMG Batamindo merekomendasikan dan menjaga tekanan suplai stabil pada angka 6,0 Bar. Pemilihan setting tekanan nominal ini bertujuan untuk memastikan respons sistem kontrol bahan bakar (TecJet/Gas Valve) bekerja pada titik efisiensi terbaiknya guna menjaga kestabilan beban mesin.

2.3. Sistem Pendingin (Cooling System) Aktual

Sistem pendinginan pada Jenbacher JMS 620 berfungsi untuk menyerap panas berlebih (waste heat) hasil pembakaran dan gesekan mekanis agar temperatur komponen mesin tetap berada pada batas aman operasional.

Mengacu pada diagram teknis (P&ID) nomor TL1217481, sistem pendingin mesin ini menerapkan metode Sirkuit Ganda (Split Cooling Circuits) [2]. Metode ini memisahkan aliran air pendingin menjadi dua sirkuit tertutup dengan level temperatur yang berbeda guna memaksimalkan efisiensi penyerapan panas. Skema pembagian sirkuit pendingin tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema Sistem Pendingin Jenbacher JMS 620

[Sumber: Dokumentasi Teknis PT. Maxpower Indonesia/Manual Jenbacher]

Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa sistem pendingin terbagi menjadi dua jalur utama, yaitu Sirkuit Temperatur Tinggi (High Temperature) dan Sirkuit Temperatur Rendah (Low Temperature), yang masing-masing memiliki pompa dan jalur radiator tersendiri namun terintegrasi dalam satu paket mesin.

2.3.1 Sirkuit Temperatur Tinggi (High Temperature - HT Circuit)

Sirkuit HT (High Temperature) bertugas mendinginkan komponen mesin yang terpapar beban panas pembakaran secara langsung. Pada sirkuit ini, air pendingin dengan temperatur tinggi disirkulasikan untuk menyerap panas dari komponen-komponen berikut:

1. Engine Jacket Water: Mendinginkan blok silinder dan dinding liner.
2. Cylinder Head: Mendinginkan area kepala silinder dan katup.
3. Mixture Cooler Stage 1: Mendinginkan campuran bahan bakar dan udara tahap awal (first stage) segera setelah keluar dari turbocharger.

Dalam kondisi operasi normal, temperatur air keluar dari sirkuit HT dijaga stabil pada kisaran 80°C – 90°C. Pengaturan suhu dilakukan secara otomatis oleh Thermostatic Valve (katup tiga arah) yang berfungsi membagi aliran; apakah akan disirkulasikan kembali ke mesin (bypass) atau dialirkan menuju radiator untuk didinginkan, tergantung pada suhu aktual air tersebut.

Untuk menjamin keamanan mesin dari risiko overheating, sistem kontrol dilengkapi dengan batasan operasi (safety limits) sesuai standar parameter operasional di PLTMG Batamindo. Berdasarkan data parameter proteksi mesin (protection settings), batasan temperatur jacket water ditetapkan sebagai berikut:

- High Temperature Alarm (Warning): Aktif pada suhu 94°C. Pada titik ini, operator akan menerima peringatan dini bahwa kapasitas pendinginan mulai menurun.
- Engine Trip (Shutdown): Aktif pada suhu 97°C [10]. Jika suhu mencapai titik ini, mesin akan mati secara otomatis (forced shutdown) guna mencegah kerusakan permanen pada komponen vital akibat pemuatan material yang berlebihan (thermal stress).

Melalui konfigurasi tersebut, dapat dipahami bahwa sistem pendingin pada *Gas Engine* Jenbacher JMS 620 secara terintegrasi melibatkan tiga area penyerapan panas utama, yaitu *High Temperature* (HT), *Low Temperature* (LT), dan *Jacket Water* (JW). Sirkuit JW yang bertugas menyerap panas langsung dari blok silinder dan *cylinder head* secara teknis alirannya langsung berintegrasi ke dalam sirkuit HT sebelum didinginkan oleh remote radiator. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, evaluasi efektivitas termal difokuskan pada sirkuit HT dan LT karena kedua sirkuit inilah yang terhubung langsung dengan parameter sensor temperatur masuk dan keluar pada radiator pendingin.

2.3.2 Sirkuit Temperatur Rendah (Low Temperature - LT Circuit)

Sirkuit LT beroperasi pada level temperatur yang lebih rendah (40°C – 55°C) dibandingkan sirkuit HT. Fungsi utama sirkuit ini adalah untuk keperluan termodinamika udara masuk dan manajemen viskositas pelumas. Berbeda dengan sirkuit HT, sirkuit ini menghubungkan kinerja radiator secara langsung dengan temperatur oli mesin.

Berdasarkan pengamatan di lapangan dan P&ID sistem, aliran air pada sirkuit LT disirkulasikan untuk melayani komponen penukar panas berikut secara berurutan:

1. Lube Oil Cooler: Merupakan penukar panas tipe plate heat exchanger. Air pendingin dari radiator (sisi dingin) pertama kali dialirkan menuju komponen ini untuk menyerap panas dari oli pelumas. Hal ini bertujuan menjaga temperatur oli tetap stabil pada kisaran kerja idealnya (biasanya 70-80°C) agar viskositas pelumas terjaga dan mampu melumasi bearing serta komponen bergerak lainnya secara optimal.
2. Mixture Cooler Stage 2 (Intercooler): Setelah melewati pendingin oli, air pendingin mengalir menuju Mixture Cooler tahap kedua. Fungsinya adalah mendinginkan kembali campuran bahan bakar dan udara yang sebelumnya telah didinginkan tahap awal oleh sirkuit HT. Proses

pendinginan tahap akhir ini sangat krusial untuk memastikan temperatur campuran gas yang masuk ke ruang bakar (intake manifold) berada di bawah 50°C. Penurunan temperatur ini bertujuan meningkatkan densitas udara (efisiensi volumetrik) dan mencegah terjadinya detonasi dini (knocking).

Secara siklus tertutup, air yang telah menyerap panas dari Oil Cooler dan Intercooler akan mengalami kenaikan temperatur, kemudian dialirkan kembali menuju Radiator LT untuk membuang panas tersebut ke udara lingkungan. Oleh karena itu, gangguan pada kinerja Radiator LT akan berdampak langsung pada kenaikan temperatur oli (High Oil Temp) dan temperatur udara masuk (High Mixture Temp).

2.4. Komponen Utama Sirkulasi Pendingin

Agar sirkulasi air pendingin berjalan efektif sesuai standar P&ID pabrikan dan kondisi aktual di lapangan, sistem ini didukung oleh beberapa komponen vital sebagai berikut:

2.4.1 Pompa Sirkulasi (Circulation Pump)

Pompa berfungsi untuk mensirkulasikan air pendingin dari mesin menuju alat penukar panas (heat exchanger) dan kembali lagi ke mesin. Di PLTMG Batamindo, pompa yang digunakan adalah jenis pompa sentrifugal. Selain berfungsi saat operasi normal, sistem ini dilengkapi dengan Pompa Sirkulasi Bantu (Auxiliary Pump) bertenaga Listrik.

Pompa bantu ini memiliki peran krusial pada dua kondisi:

1. Pre-heating: Mensirkulasikan air hangat saat mesin standby agar mesin siap dibebani (load acceptance) dengan cepat.
2. After-cooling: Tetap beroperasi selama beberapa menit setelah mesin mati (shutdown) untuk membuang sisa panas dan mencegah kejutan termal (thermal shock) pada blok mesin.

Visualisasi pompa sirkulasi (Jacket Water Pump) yang terpasang pada unit penelitian dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Pompa Sirkulasi Air Pendingin (Jacket Water Pump)

[Sumber: Dokumentasi Pribadi]

2.4.2 Katup Pengatur Suhu (Thermostatic Control Valve)

Sistem pendingin Jenbacher JMS 620 menggunakan mekanisme kontrol suhu bertingkat untuk menjaga kestabilan termal, yaitu menggunakan katup mekanis dan katup elektrik.

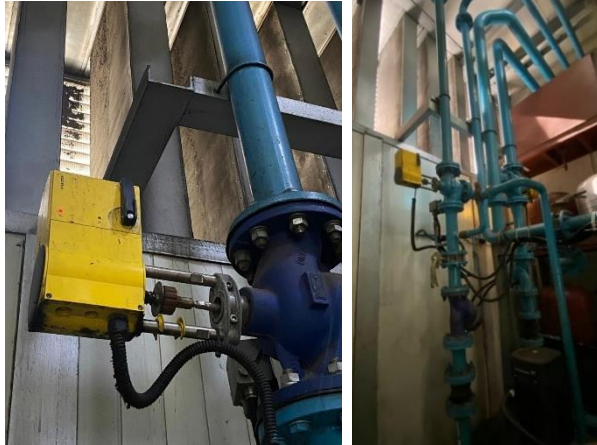
- **Katup Mekanis (AMOT Valve)**
Katup ini bekerja secara mekanis menggunakan elemen lilin (wax element) dan pegas (spring). Katup ini berfungsi sebagai bypass thermostat internal. Berdasarkan spesifikasi fisik komponen yang terpasang di lapangan, katup ini memiliki set-point pembukaan pada suhu 82°C (180°F). Jika suhu air di bawah angka tersebut, air akan langsung dikembalikan ke mesin tanpa melewati radiator.



Gambar 6. Katup Termostatik Mekanis (AMOT Valve)

[Sumber: Dokumentasi Pribadi]

- Katup Elektrik (3-Way Control Valve)
 Untuk pengaturan yang lebih presisi, sistem dilengkapi dengan 3-way valve yang digerakkan oleh motor servo merk SAUTER. Bukaannya katup ini diatur secara otomatis oleh modul kontrol mesin (DIA.NE) berdasarkan pembacaan sensor suhu aktual.
 - Pada Sirkuit LT, katup ini menjaga suhu masuk mixture/oil (biasanya diset pada $\pm 60^{\circ}\text{C}$).
 - Pada Sirkuit HT, katup ini membantu menjaga kestabilan jacket water (biasanya diset pada $\pm 65^{\circ}\text{C}$ pada sisi return radiator). Bentuk fisik motor servo dan katup tiga arah tersebut dapat dilihat pada Gambar 7, sedangkan spesifikasi teknisnya tertera pada nameplate di Gambar 8.



Gambar 7. Motor Servo SAUTER dan 3-Way Valve

[Sumber: Dokumentasi Pribadi]



Gambar 8. Nameplate Motor Servo SAUTER

[Sumber: Dokumentasi Pribadi]

Berdasarkan nameplate pada Gambar 8, rincian spesifikasi teknis motor servo tersebut dirangkum dalam Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Motor Servo SAUTER

Parameter	Spesifikasi
Merk / Brand	SAUTER
Model	AVM234SF132U
Tegangan (Voltage)	24 Vac/dc
Torsi / Force	2500 N

Max Ambient Temp	60°C
Protection Class	IP66

2.4.3 Tangki Ekspansi (Expansion Tank)

Tangki ini dipasang pada titik tertinggi sistem perpipaan di area kontainer mesin. Berdasarkan observasi lapangan, terdapat tiga unit tangki ekspansi dengan fungsi yang berbeda yang dapat diidentifikasi dari warna fisik dan ukuran perpipaan:

1. Tangki HT (Warna Merah, Pipa Besar): Menampung pemuaian air sirkuit temperatur tinggi (*Jacket Water*).
2. Tangki LT (Warna Putih/Abu, Pipa Kecil): Menampung pemuaian air sirkuit temperatur rendah (*Intercooler/Oil*).
3. Tangki Jacket Water (Warna Merah, Posisi Bawah): Berfungsi sebagai buffer tambahan untuk sirkuit mesin.

Secara umum, tangki ini berfungsi untuk menampung pemuaian volume air akibat panas, menjaga tekanan positif pada sisi hisap pompa (NPSH) untuk mencegah kavitasi, serta membuang gelembung udara (*deaeration*) yang terperangkap.



Gambar 9. Tangki Ekspansi pada Unit Mesin

[Sumber: Dokumentasi Pribadi]

2.4.4 Preheater

Pre-heater merupakan komponen pemanas elektrik yang dipasang pada jalur sirkulasi air. Alat ini aktif saat mesin dalam kondisi standby (mati) untuk menjaga temperatur blok mesin tetap hangat ($\pm 40^{\circ}\text{C}$). Tujuannya adalah untuk mencegah kondensasi uap air pada dinding silinder dan memastikan oli mesin tidak terlalu kental saat start-up mendadak.



Gambar 10. Pre-heater

[Sumber: Dokumentasi Pribadi]

2.5. Radiator (*Remote Cooling System*)

Radiator pada sistem pendingin PLTMG Batamindo berfungsi sebagai alat penukar panas (heat exchanger) tipe cross-flow, di mana panas dari air pendingin dibuang ke udara lingkungan secara konveksi paksa [3]. Dalam konfigurasi ini, fluida cair (air pendingin) mengalir di dalam pipa-pipa secara vertikal atau horizontal, sementara udara pendingin dihembuskan secara tegak lurus memotong arah aliran air tersebut [7]. Metode ini umum digunakan pada aplikasi pendingin mesin karena memiliki efisiensi perpindahan panas yang baik dengan desain yang kompak.

Visualisasi unit radiator yang terpasang di atap kontainer (*rooftop*) dapat dilihat pada Gambar 11, sedangkan spesifikasi desainnya tertera pada nameplate di Gambar 12.



Gambar 11. Radiator PLTMG Batamindo

[Sumber: Dokumentasi Pribadi]



Gambar 12. Nameplate Spesifikasi Radiator

[Sumber: Dokumentasi Pribadi]

2.5.1 Konstruksi dan Prinsip Kerja

Air pendingin yang membawa panas dari mesin masuk melalui header (tangki) bagian atas radiator. Selanjutnya, air terdistribusi ke dalam inti radiator (radiator core) yang terdiri dari susunan pipa-pipa kapiler (tubes) yang dilengkapi dengan sirip-sirip (fins).

Fungsi sirip-sirip ini adalah untuk memperluas permukaan perpindahan panas. Saat kipas berputar, udara lingkungan dihembuskan paksa melewati celah-celah sirip tersebut. Panas dari air akan merambat ke dinding pipa, lalu ke sirip, dan akhirnya terbawa oleh aliran udara (konveksi paksa), sehingga temperatur air turun sebelum disirkulasikan kembali ke mesin.

2.5.2 Motor Fan Radiator

Efektivitas pembuangan panas pada radiator tipe *forced draft* sangat bergantung pada laju aliran massa udara yang dihasilkan oleh kipas. Komponen penggerak utama kipas ini adalah motor listrik induksi 3-fasa [5]. Penelitian eksperimental membuktikan bahwa karakteristik kecepatan aliran udara yang dihasilkan oleh kipas (fan) berbanding lurus dengan laju perpindahan panas yang dicapai oleh radiator [9].

Berdasarkan pengecekan fisik pada nameplate komponen di lokasi penelitian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13, motor yang digunakan adalah merk KEMAO tipe MT160S-6.

Salah satu komponen utama dalam sistem pendingin radiator di PLTMG Batamindo adalah motor fan yang berfungsi mengalirkan udara paksa untuk membuang panas. Motor fan yang digunakan pada unit Gas Engine Jenbacher tipe JMS 620 memiliki spesifikasi teknis sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Nameplate Motor Fan Radiator

[Sumber: Dokumentasi Pribadi]

Berdasarkan nameplate pada Gambar 13, diketahui bahwa motor tersebut merupakan tipe induksi 3 fasa dengan daya output sebesar 2.2 kW. Rincian spesifikasi teknis motor fan tersebut dirangkum dalam Tabel 2. berikut ini.

Tabel 2. Spesifikasi Teknis Motor Fan Radiator

Parameter	Spesifikasi
Merk / Brand	Kemao
Model	MT160S-6
Serial Number	KM12000546
Output Power	2.2 kW
Kecepatan (Speed)	950 r/min (RPM)
Tegangan (Voltage)	380-415 V (Delta Connection)
Arus (Current)	6.4 A
Frekuensi	50 Hz
Power Factor ($\cos \theta$)	0.80
Kelas Isolasi	Class F
IP Rating	IP55
Standar Manufaktur	IEC 60034-1

Data spesifikasi pada Tabel 2. khususnya daya (2.2 kW) dan kecepatan (950 rpm), akan digunakan sebagai variabel tetap dalam analisis kinerja motor fan di Bab 4.

Untuk memvalidasi performa motor induksi penggerak kipas radiator tersebut berdasarkan data arus aktual hasil pengukuran di lapangan, perhitungan daya aktual motor fan (P_{fan}) secara teoritis dapat dirumuskan menggunakan persamaan daya listrik 3-fasa sebagai berikut [5]:

$$P_{fan} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Dimana:

- P_{fan} = Daya aktual motor fan (kW)
- V = Tegangan operasional (Volt)
- I = Arus aktual hasil pengukuran clamp meter (Ampere)
- $\cos \theta$ = Faktor daya motor



Gambar 14. Motor Fan Radiator KEMAO

[Sumber: Dokumentasi Pribadi]

2.5.3 Standar Pemeliharaan dan Kualitas Air Pendingin

Kinerja radiator sangat dipengaruhi oleh kondisi kebersihan area perpindahan panas dan kualitas fluida yang digunakan. Mengacu pada dokumen Maintenance Manual Jenbacher [10], pabrikan menetapkan standar pemeliharaan preventif sebagai berikut:

1. Jadwal Pembersihan (Cleaning Interval) Berdasarkan jadwal perawatan berkala, pembersihan sirip-sirip radiator (fin cleaning) direkomendasikan setiap 2.000 Jam Operasi (OH). Pembersihan ini bertujuan menghilangkan debu dan kotoran yang menghambat aliran udara. Akumulasi kotoran (fouling) pada sirip akan meningkatkan resistansi termal sisi udara, yang berdampak langsung pada penurunan efektivitas radiator [6].
2. Spesifikasi Air Pendingin (Coolant Specification) Selain kebersihan udara, kualitas air pendingin menentukan efisiensi sisi dalam pipa. Manual operasional mensyaratkan penggunaan air olahan (treated water) dengan campuran inhibitor korosi (seperti Nalcool atau Glycool) dengan konsentrasi 30-50% [4].

Fungsi utama penggunaan zat aditif/inhibitor tersebut adalah:

- Mencegah terjadinya korosi pada material logam mesin dan radiator.
- Mencegah pembentukan kerak (scaling) akibat endapan mineral (Kalsium/Magnesium) yang biasa terdapat pada air mentah (raw water/tap water).

Penggunaan air pendingin yang tidak sesuai standar (misalnya air keran tanpa treatment) memiliki risiko tinggi menyebabkan pembentukan kerak pada dinding dalam pipa radiator. Lapisan kerak ini memiliki konduktivitas termal yang sangat rendah (isolator), sehingga secara drastis akan menghambat pelepasan panas dari air ke dinding pipa, menyebabkan temperatur mesin cenderung tinggi meskipun kipas beroperasi normal.

2.6. Derating Mesin

Derating didefinisikan sebagai kondisi penurunan daya mampu mesin (output power) secara sengaja di bawah kapasitas nominalnya akibat kondisi operasi yang tidak ideal [1]. Pada Gas Engine Jenbacher JMS 620, derating merupakan mekanisme proteksi aktif yang diatur oleh modul kontrol mesin (ECU/DIA.NE) untuk melindungi komponen vital dari kerusakan akibat thermal stress atau knocking [10].

Penurunan daya mampu mesin (derating) pada unit PLTMG seringkali dipengaruhi oleh kondisi termal yang tidak ideal, yang secara langsung berdampak pada penurunan efisiensi siklus Otto yang dijalankan oleh mesin tersebut [13].

Di PLTMG Batamindo, sistem kontrol DIA.NE memantau berbagai parameter secara real-time. Meskipun sistem pendingin radiator saat ini bekerja optimal, pemahaman terhadap mekanisme derating sangat krusial sebagai batasan operasional (operational limit). Secara teoritis, kegagalan sistem dalam mempertahankan temperatur kerja akan memaksa sistem kontrol untuk menahan daya keluaran guna mencegah terjadinya trip atau kerusakan mekanis yang lebih fatal.

2.6.1 Parameter Penyebab Derating

Berdasarkan logika kontrol mesin, terdapat dua parameter termal utama yang menjadi pemicu mekanisme derating:

1. Temperatur Udara Masuk (Intake Air/Mixture Temperature): Jika temperatur udara pembakaran melebihi batas referensi (umumnya $>35^{\circ}\text{C}$), densitas udara akan menurun dan risiko knocking meningkat.
2. Temperatur Air Pendingin (Jacket Water Temperature): Jika temperatur air pendingin (sirkuit HT) meningkat mendekati batas alarm ($>93^{\circ}\text{C}$), DIA.NE akan menurunkan beban untuk membantu proses pendinginan sebelum mesin menyentuh titik shutdown pada 97°C .

Kondisi temperatur lingkungan di Batam yang relatif tinggi menempatkan radiator sebagai komponen kunci dalam menjaga margin termal agar tetap berada di bawah ambang batas derating tersebut.

2.6.2 Mekanisme dan Model Matematis Derating

Mekanisme derating bekerja dengan mengurangi bukaan throttle atau fuel metering valve secara otomatis. Untuk keperluan analisis pada Bab 4, pendekatan matematis linier untuk menghitung daya derating ($P_{derated}$) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{derated} = P_{nominal} \cdot [1 - k \cdot (T_{aktual} - T_{ref})] \quad (2)$$

Dimana:

- $P_{derated}$ = Potensi kehilangan daya (kW)
- $P_{nominal}$ = Daya output nominal mesin (3.349 kW)
- k = Faktor derating/ koefisien penurunan daya sebesar 0,01/°C (merujuk pada penjelasan Subbab 2.6.3)
- T_{aktual} = Temperatur terukur aktual (°C)
- T_{ref} = Temperatur referensi dimulainya derating (°C)

Tanda kurung siku [...] pada Persamaan (2) berfungsi sebagai simbol pengelompokan operasi matematika (grouping symbol) untuk memperjelas urutan kalkulasi faktor koreksi daya, dan bukan merupakan representasi dari nilai mutlak.

2.6.3 Karakteristik Derating Berdasarkan Manual

Mengacu pada dokumen internal pabrikan *Technical Description/Datasheet* Gas Engine Jenbacher JMS 620 (*Document Reference: INNIO Jenbacher Technical Instruction*), daya nominal mesin berlaku secara optimal pada kondisi referensi dengan temperatur udara masuk (*room temperature*) sebesar 35°C (*ISO condition adjustment*). Dikarenakan dokumen manual teknis utuh bersifat *Internal Operational & Proprietary Document* PT Maxpower Indonesia, rujukan parameter 35°C dan koefisien penurunan daya 1%/°C diverifikasi berdasarkan *data sheet* spesifikasi teknis unit terpasang di site PLTMG Batamindo.

Proses penurunan daya (*power derating*) secara otomatis akan dimulai apabila temperatur udara di sekitar area masuk mesin (*ambient/room temperature*) tersebut telah melebihi nilai ambang batas referensi ($T_{ref} = 35^{\circ}\text{C}$). Penurunan daya mesin umumnya berada pada kisaran 1% hingga 2% untuk setiap kenaikan temperatur 1°C di atas batas referensi. Dalam penelitian ini, digunakan nilai koefisien *derating* sebesar $k = 0,01/^{\circ}\text{C}$ (1% per 1°C) sebagai pendekatan konservatif (*conservative approach*) untuk menghitung potensi penurunan daya

mesin, sehingga estimasi tidak bersifat berlebihan (*overestimate*) namun tetap realistis menggambarkan kecenderungan di lapangan.

Sebagai ilustrasi, estimasi penurunan daya akibat kenaikan temperatur udara masuk berdasarkan standar pabrikan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Estimasi Derating vs Temperatur Udara Masuk

Suhu Udara Masuk (°C)	Penurunan Daya (%)
35	0
40	5-10
45	15-20

Nilai temperatur referensi 35°C pada Tabel 3 tersebut digunakan sebagai standar atau parameter batas evaluasi utama dalam penelitian ini. Fungsinya adalah untuk memverifikasi serta mengevaluasi sejauh mana kinerja aktual sistem radiator pendingin mampu menjaga temperatur operasional udara masuk mesin tetap berada di bawah ambang batas kritis, sehingga mesin dapat beroperasi secara optimal pada zona beban penuh (*100% load*).

2.6.4 Korelasi dengan Kinerja Radiator

Kinerja radiator memegang peran kunci dalam memitigasi risiko derating dengan cara:

1. Sirkuit LT (Low Temperature): Menjaga temperatur mixture agar tetap stabil di bawah ambang batas pemicu derating sisi udara.
2. Sirkuit HT (High Temperature): Menjaga *Jacket Water* agar tidak menyentuh batas High Temp Warning.

Analisis pada penelitian ini difokuskan untuk memvalidasi efektivitas perpindahan panas radiator secara aktual guna memastikan keandalan unit JMS 620 dalam memikul beban maksimal tanpa terkendala oleh batasan termal.

2.7. Landasan Teori Perpindahan Panas

Analisis kinerja radiator dalam penelitian ini didasarkan pada hukum termodinamika dan perpindahan panas.

2.7.1 Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas yang terjadi antara permukaan sirip radiator dengan udara yang mengalir adalah konveksi paksa. Laju perpindahan panasnya dinyatakan dengan Hukum Pendinginan Newton:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Dimana:

- q = Laju perpindahan panas (Watt)
- H = Koefisien konveksi ($W/m^2 \cdot K$)
- A = Luas permukaan perpindahan panas (m^2)
- $T_s - T_\infty$ = Beda suhu permukaan dan fluida

2.7.2 Laju Perpindahan Panas Aktual

Besarnya kalor yang dilepaskan oleh air pendingin di radiator dapat dihitung menggunakan persamaan keseimbangan energi (Heat Balance):

$$Q_{aktual} = \dot{m}_{air} \cdot c_{p,air} \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (4)$$

Dimana:

- Q_{aktual} = Kalor yang dilepas air (kW atau kJ/s)
- $\dot{m}_{air}$ = Laju aliran massa air (kg/s)
- $c_{p,air}$ = Kalor spesifik air pendingin ($\frac{kJ}{kg} \cdot ^\circ C$)
- T_{in} = Temperatur air masuk radiator ($^\circ C$)
- T_{out} = Temperatur air keluar radiator ($^\circ C$)

Laju aliran massa air ($\dot{m}_{air}$) diperoleh dari perkalian debit aliran (V) dengan densitas air (ρ):

$$\dot{m}_{air} = \rho \cdot V \quad (5)$$

Dimana:

- $\dot{m}_{air}$ = Laju aliran massa air (kg/s)
- ρ = Densitas atau massa jenis air (kg/m^3)
- V = Debit aliran air pendingin (m^3/h , di mana nilai ini dibagi 3600 pada tahap kalkulasi untuk konversi ke satuan detik)

2.7.3 Efektivitas Radiator

Efektivitas radiator adalah rasio antara perpindahan panas aktual dengan perpindahan panas maksimum yang mungkin terjadi secara teoritis.

$$\varepsilon = \frac{Q_{aktual}}{Q_{maks}} \quad (6)$$

Dimana:

- ε = Efektivitas radiator (%)
- Q_{aktual} = Laju perpindahan panas aktual (kW atau kJ/s)
- Q_{maks} = Laju perpindahan panas maksimum teoritis (kW atau kJ/s)

Perpindahan panas maksimum (Q_{maks}) dibatasi oleh fluida yang memiliki kapasitas panas minimum (C_{min}), yang pada kasus radiator umumnya adalah udara.

$$Q_{maks} = C_{min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (7)$$

Dimana:

- Q_{maks} = Laju perpindahan panas maksimum teoritis (kW atau kJ/s)
- C_{min} = Kapasitas panas minimum fluida (kW/°C atau kJ/s · °C)
- $T_{h,in}$ = Temperatur fluida panas masuk (*hot fluid inlet*) atau temperatur air masuk radiator (°C)
- $T_{c,in}$ = Temperatur fluida dingin masuk (*cold fluid inlet*) atau temperatur udara ambien masuk (°C)

Jika diasumsikan kapasitas panas air jauh lebih besar dari udara, maka efektivitas radiator dapat didekati dengan rasio penurunan suhu air terhadap beda suhu maksimum:

$$\varepsilon = \frac{T_{air,in} - T_{air,out}}{T_{air,in} - T_{udara,ambient}} \quad (8)$$

Dimana:

- ε = Efektivitas radiator (%)
- $T_{air,in}$ = Temperatur air pendingin masuk ke radiator (°C)
- $T_{air,out}$ = Temperatur air pendingin keluar dari radiator (°C)
- $T_{udara,ambient}$ = Temperatur udara lingkungan/ambien di sekitar modul (°C)

Pemilihan metode $\varepsilon - NTU$ dalam penelitian ini didasarkan pada pertimbangan praktis evaluasi kinerja radiator yang sudah beroperasi di lapangan (existing). Berbeda dengan metode LMTD (Log Mean Temperature Difference) yang memerlukan data temperatur udara keluar radiator ($T_{out,udara}$) secara akurat, metode $\varepsilon - NTU$ lebih efisien karena hanya membutuhkan data temperatur udara masuk (T_{amb}) serta temperatur air masuk dan keluar ($T_{air,in} - T_{air,out}$). Di lokasi PLTMG Batamindo, pengukuran suhu udara keluar radiator memiliki tingkat kesulitan yang tinggi disebabkan oleh luasnya penampang radiator serta adanya pengaruh kecepatan angin lingkungan yang tidak menentu, sehingga penggunaan metode $\varepsilon - NTU$ dianggap lebih representatif untuk mengukur efektivitas pendinginan.

2.7.4 Interpretasi Nilai Efektivitas Radiator

Nilai efektivitas (ε) yang diperoleh dari hasil perhitungan metode ε -NTU berfungsi sebagai indikator pemantauan kondisi (*health monitoring*) sistem pendingin sekunder. Interpretasi terhadap nilai tersebut adalah sebagai berikut:

1. **Nilai Efektivitas Tinggi ($\uparrow$):** Menunjukkan bahwa radiator mampu membuang beban panas fluida mendekati batas teoritis maksimumnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa suhu air pendingin yang kembali ke mesin (*return water*) cukup rendah untuk menjaga temperatur komponen internal tetap berada pada batas aman operasi dan bebas dari risiko *overheating*.
2. **Nilai Efektivitas Rendah ($\downarrow$):** Menunjukkan adanya hambatan pada laju perpindahan panas konveksi maupun konduksi. Penurunan nilai efektivitas ini dapat diinterpretasikan melalui beberapa faktor penyebab, yaitu:
 - Faktor Eksternal: Akumulasi debu, material asing, atau kotoran yang menempel pada sirip-sirip (*fins*) radiator sehingga menghambat laju aliran udara paksa (*forced convection*).
 - Faktor Mekanis: Gangguan operasional pada motor fan radiator (seperti kerusakan mekanis atau ketidakseimbangan fasa) yang memicu ketidakstabilan konsumsi daya listrik dan pasokan aliran udara pendingin.
 - Faktor Internal: Terbentuknya lapisan kerak (*fouling*) atau endapan masif di dalam pipa (*tubes*) radiator akibat kualitas air pendingin (*coolant*) yang tidak memenuhi standar spesifikasi pabrikan.
 - Faktor Lingkungan: Temperatur udara ambien eksternal yang ekstrem (terutama pada siang hari), yang memperkecil selisih temperatur antara fluida panas (*coolant*) dan fluida dingin (udara luar) sehingga menurunkan potensi perpindahan panas maksimum.

2.8. Kerangka Pemikiran

Penelitian ini didasarkan pada pemikiran bahwa keandalan operasi *Gas Engine* Jenbacher JMS 620 sangat bergantung pada kemampuan sistem pendingin radiator dalam membuang beban kalor hasil pembakaran secara optimal. Kinerja sistem pendingin ini dipengaruhi oleh faktor internal berupa pembebanan generator serta faktor eksternal berupa kondisi termal udara lingkungan sekitar.

Untuk mengevaluasi performa sistem pendingin eksisting secara komprehensif, analisis dilakukan melalui beberapa pendekatan variabel penelitian yang disajikan dalam bentuk visualisasi tren grafik operasional, yaitu:

1. **Analisis Korelasi Termal Utama:**

- Variabel Bebas (X): Temperatur lingkungan (T_{amb}) dan Penurunan temperatur air pendingin (ΔT).
 - Variabel Terikat (Y): Efektivitas radiator (ϵ) dan Beban mesin (P).
 - *Implementasi Visual*: Ditinjau melalui grafik korelasi temperatur lingkungan terhadap efektivitas radiator, serta grafik korelasi beban mesin terhadap nilai ΔT air pendingin.
- 2. Analisis Dampak Operasional:**
- Variabel Penentu: Batas temperatur referensi ($T_{ref} = 35^{\circ}\text{C}$)
 - Variabel Dampak: Status potensi *derating* mesin (Aman/Potensi *Derating*).
 - *Implementasi Visual*: Ditinjau melalui grafik hubungan antara runtutan waktu temperatur lingkungan terhadap kemunculan status potensi *derating* unit.
- 3. Evaluasi Keandalan Elektrikal Pendukung:**
- Variabel Karakteristik: Konsumsi arus rata-rata motor fan (I) terhadap waktu pengoperasian aktif.
 - *Implementasi Visual*: Ditinjau secara mandiri melalui grafik tren konsumsi arus listrik untuk mengevaluasi stabilitas dan keandalan motor penggerak kipas penyuplai aliran udara konveksi tanpa menghubungkannya secara langsung dengan perhitungan efektivitas termal radiator.

Melalui pendekatan kelompok variabel tersebut, penelitian ini bertujuan untuk membuktikan secara ilmiah apakah sistem pendingin radiator eksisting pada Unit GE#01 dan Unit GE#03 masih memiliki kapasitas yang andal untuk menjaga kestabilan temperatur operasi mesin tanpa memicu terjadinya kendala *derating*.

2.9. Hipotesis Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, tinjauan pustaka, dan struktur kerangka pemikiran yang telah dipaparkan, maka hipotesis dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. **H1:** Peningkatan beban mesin (*engine load*) memengaruhi karakteristik penurunan temperatur air pendingin (ΔT) secara signifikan, di mana pembebanan yang tinggi memicu optimalisasi laju aliran massa *coolant* oleh sistem kontrol mesin sehingga selisih temperatur cenderung bervariasi namun pembuangan kalor total tetap terjaga.
2. **H2:** Kinerja kelistrikan motor fan radiator KEMAO Model MT160S-6 tetap beroperasi dalam kondisi andal, di mana fluktuasi konsumsi arus listrik aktual sepanjang waktu pengamatan dipengaruhi oleh beban termal udara sekitar namun tetap berada di bawah batas arus nominal spesifikasi pabrikan (*no overload*).

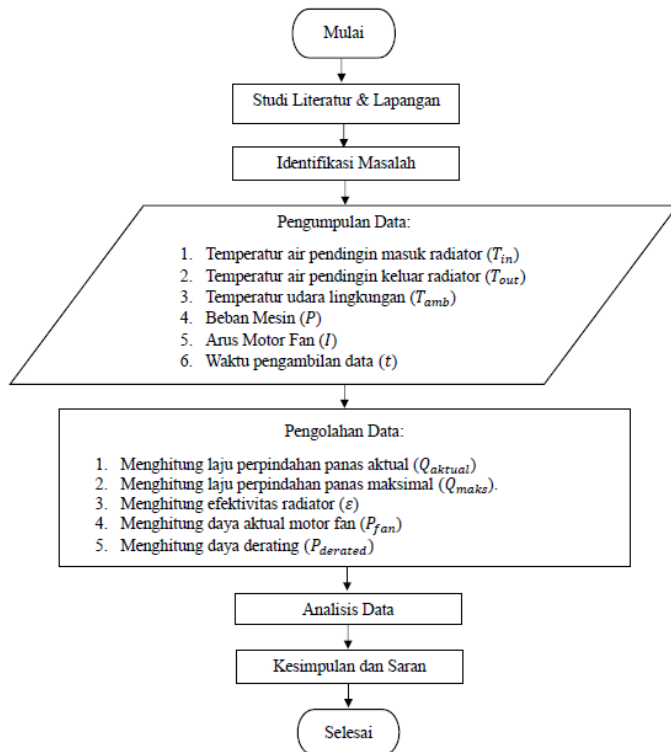
3. **H3:** Nilai efektivitas radiator (ϵ) pada sirkuit *Low Temperature* (LT) maupun *High Temperature* (HT) mampu mempertahankan kestabilan performa termalnya secara optimal dalam meredam fluktuasi perubahan temperatur lingkungan (T_{amb}) selama periode pengoperasian aktif.
4. **H4:** Lonjakan temperatur lingkungan eksternal yang mendekati atau melewati batas temperatur referensi ($T_{amb} \geq 35^{\circ}\text{C}$) akan memicu kemunculan status potensi *derating* pada unit Gas Engine Jenbacher JMS 620 secara visual pada grafik analisis operasional.

Bab 3. Metodologi Penelitian

3.1. Perancangan

Jenis penelitian yang dilakukan adalah penelitian deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus lapangan pada dua unit mesin. Adapun aspek yang dianalisis secara kuantitatif adalah pengumpulan data primer terkait kinerja sistem pendingin radiator di lokasi penelitian PLTMG Batamindo (PT. Maxpower Indonesia) yang dilanjutkan dengan analisis termodinamika.

Ada beberapa tahapan yang dibahas pada penelitian ini yang digambarkan pada diagram alir berikut ini:



Gambar 15. Diagram alir

3.1.1. Studi Literatur

Dalam penyelesaian Tugas Akhir, penulis melakukan studi literatur dengan mencari dan mengumpulkan bahan penelitian serta teori yang relevan mengenai penelitian yang akan dilakukan. Beberapa sumber referensi yang digunakan berupa buku manual operasi (*Operation Manual*), jurnal, dan situs internet yang terkait dengan sistem pendingin mesin gas (*Gas Engine*), karakteristik perpindahan panas pada radiator [3], [7], serta spesifikasi motor fan [5].

3.1.2. Observasi Lapangan

Tahapan ini dilaksanakan dengan pengamatan langsung terhadap objek yang akan penulis teliti, yaitu area *Engine Hall* dan *Remote Cooling Radiator* di PLTMG Batamindo. Strategi observasi dibagi menjadi dua kondisi waktu untuk melihat pengaruh temperatur lingkungan ($T_{ambient}$), yaitu Kondisi Siang (10.00 – 14.00 WIB) dan Kondisi Malam (18.00 – 22.00 WIB).

Peneliti juga melakukan wawancara dengan para staf operator dan teknisi PLTMG Batamindo yang bertujuan untuk mendapatkan data historis dan informasi mengenai pola operasi mesin Jenbacher JMS 620 GS-N.L.

3.1.3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk mendapatkan informasi yang diperlukan untuk mencapai tujuan penelitian yaitu menganalisis pengaruh temperatur lingkungan terhadap efektivitas radiator dan potensi *derating* mesin [1].

Seluruh data primer dalam penelitian ini diperoleh melalui kombinasi pengukuran langsung di lapangan dan sistem pemantauan terintegrasi. Data temperatur diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan *thermogun* pada titik masuk (*inlet*) dan keluar (*outlet*) radiator. Data arus motor fan diperoleh menggunakan *clamp meter* (tang ampere) pada panel motor fan radiator. Sementara itu, data beban mesin dan temperatur lingkungan diperoleh secara langsung dari sistem monitoring resmi mesin (DIA.NE) di PLTMG Batamindo selama periode pengamatan. Adapun parameter spesifik yang diambil meliputi:

1. Temperatur air pendingin masuk radiator (T_{in})
2. Temperatur air pendingin keluar radiator (T_{out})
3. Temperatur udara lingkungan (T_{amb})
4. Beban Mesin / Load (P)
5. Arus Motor Fan (I)
6. Waktu pengambilan data (t) – Siang vs Malam.

Data Operasional dari Manual Book & Nameplate (Spesifikasi Alat):

1. Model Mesin: Jenbacher JMS 620 GS-N.L (V20 Cylinder).
2. Putaran Mesin Nominal (n) = 1.500 RPM.
3. Model Motor Fan Radiator: KEMAO MT160S-6.
4. Daya Motor Fan (P_{fan}) = 2,2 kW
5. Spesifikasi Laju Aliran Air ($\dot{m}_{air}$) sesuai spesifikasi pompa sirkulasi.
6. Kalor spesifik air ($c_{p,air}$) = 4,18 kJ/kg. $^{\circ}$ C.

Adapun parameter yang dihitung berdasarkan data yaitu:

1. Menghitung laju perpindahan panas actual (Q_{aktual}).
2. Menghitung laju perpindahan panas maksimal (Q_{maks}).
3. Menghitung efektivitas radiator (ε) menggunakan metode ε -NTU.
4. Menghitung daya aktual motor fan (P_{fan}) berdasarkan pengukuran arus.
5. Menganalisis potensi penurunan daya (Derating) jika temperatur melebihi batas trip (97 $^{\circ}$ C).

Data yang diperoleh penulis merupakan data harian operasional PLTMG Batamindo pada periode tahun 2026. Data disajikan dalam bentuk tabel perbandingan kondisi siang dan malam untuk dianalisis lebih lanjut.

3.2. Waktu dan Tempat Penelitian

3.2.1. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) Batamindo yang dikelola oleh PT. Maxpower Indonesia. Lokasi pengambilan data difokuskan pada area *Engine Hall* dan area *Remote Cooling Radiator* di kawasan industri Batamindo.

PLTMG Batamindo PT. Maxpower Indonesia sendiri memiliki total 9 unit *Gas Engine* Jenbacher JMS 620. Namun, dalam penelitian ini, pemilihan fokus pengamatan dibatasi pada dua unit, yaitu Unit GE#01 dan GE#03, dengan menggunakan pendekatan studi kasus (*case study*). Pemilihan kedua unit tersebut didasarkan pada pertimbangan teknis dan operasional, di mana keduanya merupakan unit yang tersedia untuk dilakukan pengambilan data secara kontinu selama periode penelitian, serta memiliki riwayat aktivitas pemeliharaan (*maintenance*) pada sistem pendingin yang sangat relevan dengan tujuan analisis efektivitas termal radiator.

3.2.2. Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan selama periode operasional tahun 2026, mencakup tahap observasi awal, pengambilan data lapangan, hingga penyusunan laporan akhir. Data operasional radiator diambil secara intensif selama 14 hari kalender,

terhitung mulai tanggal 04 Februari 2026 hingga 17 Februari 2026. Pengambilan data harian dilakukan secara periodik untuk mendapatkan kontras performa pada dua kondisi temperatur lingkungan (ambient) yang berbeda.

3.3. Alat dan Bahan Penelitian

Untuk memperoleh data yang akurat, penelitian ini menggunakan instrumen dan objek studi sebagai berikut:

3.3.1. Bahan Penelitian (Objek Studi Kasus)

Objek penelitian difokuskan pada satu unit Gas Engine Jenbacher JMS 620 GS-N.L sebagai sampel studi kasus (case study). Pemilihan dua unit spesifik bertujuan untuk mendapatkan data historis yang konsisten mengenai perilaku sistem pendingin tanpa bias variabilitas kondisi antar-mesin.

Spesifikasi objek meliputi:

1. Mesin: Jenbacher JMS 620 (V20 Cylinder)
2. Sistem Pendingin: Radiator
3. Komponen Pendukung: Motor Fan Radiator merk KEMAO

3.3.2. Instrumen Pengumpulan Data (Alat)

1. HMI (Human Machine Interface) / SCADA: Untuk memantau data beban mesin (P dalam kW), temperature lingkungan/ruang (T_{amb}), serta parameter operasional mesin secara real-time.
2. Logsheet Operasional: Lembar pencatatan manual harian operator (Data Sekunder).
3. Clamp Meter (Tang Ampere): Untuk mengukur arus aktual (I) pada motor fan radiator.
4. Thermogun / Infrared Thermometer: Untuk memvalidasi temperatur pada pipa inlet dan outlet radiator secara langsung di lapangan.
5. Perangkat Lunak: Microsoft Excel untuk tabulasi dan perhitungan termodinamika.

3.4. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan metode observasi langsung (field observation) dan pencatatan berkala (logging) pada unit mesin terpilih.

Strategi pengambilan data dibagi berdasarkan waktu operasi untuk melihat pengaruh temperatur lingkungan (T_{amb}) terhadap kinerja radiator [3]:

1. Kondisi Siang (10.00 – 14.00 WIB): Pengambilan data saat temperatur lingkungan mencapai puncak maksimum ($T_{amb} > 30^{\circ}\text{C}$). Kondisi ini merepresentasikan beban kerja terberat bagi radiator.
2. Kondisi Malam (18.00 – 22.00 WIB): Pengambilan data saat temperatur lingkungan menurun, namun beban listrik kawasan industri relatif stabil/tinggi.

Rincian parameter data operasional sistem pendingin yang diambil selama periode pengamatan (04 Februari 2026 s.d. 17 Februari 2026) meliputi tanggal, waktu, beban mesin (KW), arus fan (A), serta temperatur terkait. Seluruh data operasional hasil pengamatan tersebut disajikan pada Tabel 8 dan Tabel 9 di Lampiran A secara lengkap.

Sebagai bukti pelaksanaan pengamatan di lapangan, beberapa sampel foto dokumentasi saat melakukan pengambilan data dicantumkan pada Lampiran C.

3.5. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dan diamati dalam pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini dikelompokkan sebagai berikut:

1. **Variabel Bebas (*Independent Variable* - X)**
 - **Penurunan Temperatur Air (ΔT):** Selisih nilai antara temperatur air pendingin masuk (*inlet*) dan keluar (*outlet*) setelah melewati inti radiator dalam satuan derajat Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
 - **Temperatur Lingkungan (T_{amb}):** Temperatur udara luar di sekitar area radiator yang bertindak sebagai media pendingin sekunder dalam satuan derajat Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
2. **Variabel Terikat (*Dependent Variable* - Y)**
 - **Beban Mesin (P_{mesin}):** Besarnya daya aktif listrik yang dibangkitkan oleh generator gas engine dalam satuan kiloWatt (kW).
 - **Efektivitas Radiator (ε):** Nilai persentase yang menunjukkan performa pemindahan panas aktual radiator dibandingkan dengan laju pemindahan panas maksimum teoritisnya (%).
 - **Status Derating ($P_{derated}$):** Indikasi penurunan daya akibat kenaikan suhu operasional (Sesuai Bab 2.6).
3. **Variabel Dampak Operasional dan Karakteristik Mandiri**
 - **Status Potensi Derating Mesin:** Indikasi kemunculan risiko penurunan beban operasi mesin yang dipicu apabila temperatur lingkungan aktual melampaui ambang batas referensi spesifikasi pabrik ($T_{amb} \geq 35^{\circ}\text{C}$).
 - **Arus Kelistrikan Motor Fan (I):** Besaran kuat arus listrik rata-rata tiga fasa (Ampere) yang diserap oleh motor fan KEMAO Model MT160S-6 untuk mengevaluasi keandalan beban elektrikal penggerak kipas.

4. Variabel Kontrol (*Control Variable*)

- **Putaran Mesin (n):** Dikondisikan konstan secara sistem pada putaran nominal 1.500 RPM untuk menjaga kestabilan frekuensi listrik pembangkitan pada 50 Hz.
- **Sistem Sirkulasi Fluida:** Laju aliran volume *coolant* dikontrol secara otomatis berbasis mekanis (*engine-driven pump*) yang bergerak konstan mengikuti putaran nominal poros engkol mesin.
- **Waktu Pengambilan Data:** Pengelompokkan waktu operasional (runtut waktu/ *time-series*) sepanjang periode penelitian untuk memetakan fluktuasi parameter termal dan kelistrikan.

3.6. Pengolahan/Perhitungan Data

Untuk menganalisis data yang telah diperoleh, maka terlebih dahulu dilakukan pengolahan data dengan menghitung beberapa parameter utama.

Data-data yang digunakan dalam perhitungan ini bersumber dari tiga instrumen utama, yaitu:

1. Panel Kontrol DIA.NE: Digunakan untuk memperoleh data beban mesin (P dalam kW), temperature lingkungan/ruang (T_{amb}), serta parameter operasional mesin secara real-time.
2. Pengukuran Lapangan: Menggunakan Infrared Thermometer (Thermogun) untuk mengukur temperatur air pendingin masuk (T_{in}) dan keluar (T_{out}) pada sisi radiator, serta Clamp Meter untuk mengukur arus motor fan (I).
3. Manual Book Jenbacher JMS 620: Digunakan sebagai referensi data spesifikasi teknis tetap seperti laju aliran massa fluida ($\dot{m}_{air}$), luas permukaan perpindahan panas (A), daya nominal, dan faktor derating mesin.

Perhitungan kinerja sistem pendingin ini dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik mesin yang bekerja berdasarkan siklus Otto ideal, di mana efisiensi termal mesin sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem pendingin dalam menjaga temperatur operasional agar tidak melebihi batas yang diizinkan [13].

Untuk menganalisis kinerja radiator dan pengaruhnya terhadap operasional mesin Jenbacher JMS 620, dilakukan pengolahan data melalui 5 parameter utama yang mengacu pada data lapangan tanggal 04 Februari 2026 - 17 Februari 2026 sebagai berikut:

1. Laju Perpindahan Panas Aktual

Besarnya kalor yang dilepaskan oleh air pendingin di radiator dihitung menggunakan persamaan keseimbangan energi (*Heat Balance*) seperti pada Persamaan (4) di Bab 2 [7], [11]:

$$Q_{aktual} = \dot{m}_{air} \cdot c_{p,air} \cdot (T_{in} - T_{out})$$

Dimana:

- Q_{aktual} = Kalor yang dilepas air (kW atau kJ/s)
- $\dot{m}_{air}$ = Laju aliran massa air (kg/s)
- $c_{p,air}$ = Kalor spesifik air pendingin ($\frac{kJ}{kg} \cdot ^\circ C$)
- T_{in} = Temperatur air masuk radiator ($^\circ C$)
- T_{out} = Temperatur air keluar radiator ($^\circ C$)

Laju aliran massa air ($\dot{m}_{air}$) diperoleh dari perkalian debit aliran (V) dengan densitas air (ρ) seperti pada Persamaan (5) di Bab 2:

$$\dot{m}_{air} = \rho \cdot V$$

Dimana:

- $\dot{m}_{air}$ = Laju aliran massa air (kg/s)
- ρ = Densitas atau massa jenis air (kg/m^3)
- V = Debit aliran air pendingin (m^3/h , di mana nilai ini dibagi 3600 pada tahap kalkulasi untuk konversi ke satuan detik)

2. Laju Perpindahan Panas Maksimal

Perpindahan panas maksimal dibatasi oleh fluida yang memiliki kapasitas panas minimal (C_{min}), yang pada kasus radiator umumnya adalah udara. Perhitungannya merujuk pada Persamaan (7) di Bab 2 [8], [11]:

$$Q_{maks} = C_{min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in})$$

Dimana:

- Q_{maks} = Kalor maksimal secara teoritis (kW)
- C_{min} = Kapasitas panas minimum antara air dan udara ($kW/^\circ C$)
- $T_{h,in}$ = Temperatur air masuk radiator ($^\circ C$)
- $T_{c,in}$ = Temperatur udara lingkungan/ T_{amb} ($^\circ C$)

3. Efektivitas Radiator

Efektivitas radiator adalah rasio antara perpindahan panas aktual dengan perpindahan panas maksimum yang mungkin terjadi secara teoritis, yang dihitung berdasarkan Persamaan (6) pada Bab 2:

$$\varepsilon = \frac{Q_{aktual}}{Q_{maks}}$$

Dimana:

- ε = Efektivitas radiator (%)
- Q_{aktual} = Laju perpindahan panas aktual (kW atau kJ/s)
- Q_{maks} = Laju perpindahan panas maksimum teoritis (kW atau kJ/s)

4. Evaluasi Kinerja Motor Fan

Daya Evaluasi dilakukan untuk mengetahui daya aktual yang dikonsumsi oleh motor penggerak kipas radiator. Perhitungan daya aktual motor fan (P_{fan}) dilakukan dengan mensubstitusikan nilai arus rata-rata hasil pengukuran lapangan ke dalam Persamaan (1) yang telah dijabarkan pada Bab 2.

5. Daya derating ($P_{derated}$)

Perhitungan potensi penurunan daya mesin dilakukan untuk mengetahui dampak termal sirkuit pendingin terhadap performa total *output* komponen. Nilai potensi daya derating ($P_{derated}$) dihitung menggunakan Persamaan (2) yang telah dijabarkan pada Bab 2.

3.7. Rencana Visualisasi Data

Analisis data operasional aktual pada penelitian ini akan disajikan dalam beberapa bentuk visualisasi grafik terstruktur guna memetakan karakteristik sistem pendingin serta membuktikan hipotesis yang telah dirumuskan, antara lain:

- **Grafik Tren Korelasi Termal Lingkungan:** Visualisasi menggunakan grafik *scatter plot* disertai garis tren linier untuk menganalisis karakteristik pengaruh fluktuasi temperatur lingkungan (T_{amb}) terhadap nilai efektivitas radiator (ϵ), baik pada sirkuit *Low Temperature* (LT) maupun *High Temperature* (HT).
- **Grafik Tren Kelistrikan Motor Fan:** Visualisasi menggunakan grafik garis runtut waktu (*time-series line chart*) untuk mengevaluasi konsumsi arus listrik rata-rata (I) motor fan secara mandiri terhadap waktu operasional guna memantau kestabilan beban elektrik tanpa menghubungkannya dengan parameter efektivitas termal.
- **Grafik Korelasi Pembebanan Mesin:** Visualisasi menggunakan grafik *scatter plot* disertai garis tren linier untuk memetakan nilai pembebanan mesin (P_{mesin}) berdasarkan variasi penurunan temperatur air pendingin (ΔT) pada radiator sirkuit LT dan HT.
- **Grafik Batang Potensi Dampak Operasional:** Visualisasi menggunakan kombinasi grafik runtut waktu temperatur lingkungan terhadap diagram batang penanda status potensi *derating* unit untuk mengidentifikasi frekuensi kemunculan risiko penurunan beban akibat paparan suhu udara luar ekstrem ($\geq 35^{\circ}\text{C}$).

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Data Hasil Pengamatan

Pengamatan ini dilakukan pada unit Gas Engine Jenbacher JMS 620 di PLTMG Batamindo PT. Maxpower Indonesia dengan objek pengamatan berupa sistem pendingin radiator pada unit GE#01 dan GE#03. Data operasional diperoleh melalui observasi lapangan, pembacaan HMI/SCADA, serta pengukuran langsung menggunakan clamp meter dan thermogun selama periode 04 Februari 2026 hingga 17 Februari 2026 pada dua kondisi operasi, yaitu siang hari dan malam hari, guna menganalisis pengaruh temperatur lingkungan terhadap kinerja radiator.

Parameter yang diamati meliputi temperatur air pendingin masuk radiator (T_{in}), temperatur air pendingin keluar radiator (T_{out}), temperatur lingkungan (T_{amb}), beban mesin, dan arus motor fan radiator. Pengambilan data operasional aktual dalam penelitian ini difokuskan secara spesifik pada Unit GE#01 dan GE#03 sesuai dengan batas objek penelitian yang telah ditetapkan. Kedua unit ini dipilih karena memenuhi kriteria ketersediaan parameter operasi secara kontinu selama rentang waktu pengamatan, sehingga data termal yang diperoleh representatif untuk mengevaluasi kinerja dan efektivitas sistem radiator pendingin. Rincian data operasional sistem pendingin untuk unit GE#01 dan GE#03 disajikan pada Tabel 8 dan Tabel 9 di Lampiran A.

4.2. Pengolahan/Perhitungan Data

Pengolahan data operasional aktual dalam penelitian ini dilakukan dengan menerapkan metode ε -NTU (*Effectiveness–Number of Transfer Units*). Metode ini dipilih karena sangat adaptif dan sesuai dengan ketersediaan parameter data lapangan yang diperoleh, di mana perhitungan nilai efektivitas termal komponen penukar panas (*heat exchanger*) dapat dilakukan secara akurat melalui pemodelan kapasitas panas fluida serta temperatur kerja aktual yang tersedia, tanpa harus mengetahui seluruh profil temperatur internal secara lengkap.

Analisis kinerja radiator dilakukan berdasarkan lima parameter utama, yaitu:

1. Laju Perpindahan Panas Aktual (Q_{aktual})
2. Laju Perpindahan Panas Maksimal (Q_{maks})
3. Efektivitas Radiator (ε)
4. Daya Aktual Motor Fan (P_{fan})
5. Potensi Derating Mesin ($P_{derated}$)

Untuk mempermudah penyajian proses perhitungan, digunakan satu sampel data operasional, yaitu data Unit GE#01 tanggal 04 Februari 2026 pukul 10.00 WIB. Sampel data ini digunakan sebagai contoh perhitungan seluruh parameter

penelitian, sedangkan hasil perhitungan untuk seluruh data pengamatan disajikan pada Tabel 10 dan Tabel 11 (Lampiran B).

Tabel 4. Sampel Data Perhitungan

Tanggal	Waktu	T_{amb} (°C)	T_{out} (°C)	T_{in} (°C)	Beban Mesin (KW)	Total Arus Fan (A)
04/02/2026	10:00	34.9	LT= 40.5 HT= 62.3	LT= 59.1 HT= 78.1	2802	R= 73.4 S= 73.1 T= 73.4

4.2.1. Penentuan Laju Aliran Massa Air Pendingin

Sebelum dilakukan perhitungan perpindahan panas, terlebih dahulu ditentukan laju aliran massa air pendingin ($\dot{m}$) yang digunakan dalam analisis. Berdasarkan spesifikasi pompa sirkulasi pada sistem pendingin Jenbacher JMS 620, diketahui debit aliran air pendingin sebesar 45 m³/h. Dengan mengasumsikan densitas air sebesar 1000 kg/m³, maka laju aliran massa air dapat dihitung sebagai berikut:

Diketahui:

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 45 \text{ m}^3/\text{h}$$

Konversi:

$$\dot{m}_{air} = \rho \cdot V \quad (5)$$

$$\dot{m}_{air} = 1000 \text{ kg/m}^3 \times \frac{45 \text{ m}^3/\text{h}}{3600}$$

$$\boxed{\dot{m} = 12,5 \text{ kg/s}}$$

Dengan demikian, laju aliran massa air pendingin yang digunakan dalam seluruh perhitungan perpindahan panas radiator adalah sebesar 12,5 kg/s.

4.2.2. Pemisahan Analisis Sirkuit HT dan LT

Sistem pendingin Gas Engine Jenbacher JMS 620 menggunakan metode split cooling circuits, yaitu sistem pendingin yang memisahkan aliran air pendingin menjadi dua sirkuit utama, yaitu *High Temperature* (HT) dan *Low Temperature* (LT). Kedua sirkuit tersebut memiliki fungsi dan karakteristik temperatur operasi yang berbeda sehingga analisis kinerja radiator dilakukan secara terpisah.

Sirkuit HT (*High Temperature*) berfungsi mendinginkan komponen mesin yang menerima beban panas tinggi secara langsung, seperti *jacket water*, *cylinder head*, dan *mixture cooler* stage 1. Temperatur operasi sirkuit HT umumnya berada pada kisaran 80–90°C.

Sementara itu, sirkuit LT (*Low Temperature*) berfungsi mendinginkan lube oil cooler dan mixture cooler stage 2 (*intercooler*). Temperatur operasi sirkuit LT lebih rendah, yaitu berkisar antara 40–55°C.

Pemisahan analisis antara HT dan LT dilakukan agar evaluasi kinerja radiator lebih representatif terhadap kondisi aktual sistem pendingin. Selain itu, perbedaan temperatur operasi pada kedua sirkuit menyebabkan besarnya perpindahan panas dan efektivitas radiator yang dihasilkan juga berbeda. Oleh karena itu, perhitungan laju perpindahan panas aktual, laju perpindahan panas maksimum, dan efektivitas radiator dilakukan secara terpisah untuk masing-masing sirkuit.

Meskipun sistem pendingin unit mesin secara keseluruhan melibatkan sirkuit HT, LT, dan *Jacket Water* (JW), penelitian ini memfokuskan analisis secara spesifik hanya pada sirkuit HT dan LT yang berhubungan langsung dengan parameter masuk dan keluar pada remote radiator. Sirkuit *Jacket Water* (JW) tidak dievaluasi atau dihitung secara terpisah dalam pemodelan termodinamika ini karena keterbatasan data pengukuran internal *engine* serta posisinya yang sudah terintegrasi ke dalam sirkuit pembuangan kalor HT, sehingga analisis efektivitas difokuskan pada pemenuhan ruang lingkup kinerja aktual radiator pendingin.

4.2.3. Perhitungan Laju Perpindahan Panas Aktual (Q_{aktual})

- a. Sirkuit High Temperature (HT)

$$Q_{\text{aktual}} = \dot{m}_{\text{air}} \cdot c_{p,\text{air}} \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}) \quad (4)$$

$$Q_{\text{aktual}} = 12,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}^{\circ}\text{C} \times (78,1^{\circ}\text{C} - 62,3^{\circ}\text{C})$$

$$Q_{\text{aktual}} = 12,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}^{\circ}\text{C} \times 15,8^{\circ}\text{C}$$

$$\boxed{Q_{\text{aktual}} = 825,6 \text{ kW}}$$

Dengan demikian, radiator pada sirkuit HT mampu melepaskan kalor sebesar 825,6 kW.

- b. Sirkuit Low Temperature (LT)

$$Q_{\text{aktual}} = \dot{m}_{\text{air}} \cdot c_{p,\text{air}} \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}) \quad (4)$$

$$Q_{\text{aktual}} = 12,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}^{\circ}\text{C} \times (59,1^{\circ}\text{C} - 40,5^{\circ}\text{C})$$

$$Q_{\text{aktual}} = 12,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}^{\circ}\text{C} \times 18,6^{\circ}\text{C}$$

$$\boxed{Q_{\text{aktual}} = 971,9 \text{ kW}}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa radiator pada sirkuit LT mampu melepaskan kalor sebesar 971,9 kW.

4.2.4. Perhitungan Laju Perpindahan Panas Maksimal (Q_{maks})

Perhitungan laju perpindahan panas maksimum dilakukan menggunakan temperatur lingkungan sebagai temperatur fluida dingin. Pada penelitian ini, kapasitas panas minimum (C_{min}) diasumsikan sama dengan kapasitas panas udara (C_{udara}), yaitu sebesar 51,35 kW/°C.

- a. Sirkuit High Temperature (HT)

$$\begin{aligned}Q_{maks} &= C_{min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in}) \\Q_{maks} &= 51,35 \text{ kW/}^{\circ}\text{C} \times (78,1^{\circ}\text{C} - 34,9^{\circ}\text{C}) \\Q_{maks} &= 51,35 \text{ kW/}^{\circ}\text{C} \times 43,2^{\circ}\text{C} \\Q_{maks} &= 2218,3 \text{ kW}\end{aligned} \quad (7)$$

Dengan demikian, laju perpindahan panas maksimal teoritis radiator pada sirkuit HT sebesar 2218,3 kW.

- b. Sirkuit Low Temperature (LT)

$$\begin{aligned}Q_{maks} &= C_{min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in}) \\Q_{maks} &= 51,35 \text{ kW/}^{\circ}\text{C} \times (59,1^{\circ}\text{C} - 34,9^{\circ}\text{C}) \\Q_{maks} &= 51,35 \text{ kW/}^{\circ}\text{C} \times 24,2^{\circ}\text{C} \\Q_{maks} &= 1242,7 \text{ kW}\end{aligned} \quad (7)$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kemampuan maksimal teoritis radiator pada sirkuit LT adalah sebesar 1242,7 kW.

4.2.5. Perhitungan Efektivitas Radiator (ε)

Efektivitas radiator merupakan perbandingan antara laju perpindahan panas aktual dengan laju perpindahan panas maksimum teoritis. Semakin tinggi nilai efektivitas radiator, maka semakin baik kemampuan radiator dalam membuang panas ke lingkungan.

- a. Sirkuit High Temperature (HT)

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{Q_{aktual}}{Q_{maks}} \\&= \frac{825,6 \text{ kW}}{2218,3 \text{ kW}} \\&= 0,372 \text{ atau } 37,2 \%\end{aligned} \quad (6)$$

Nilai efektivitas radiator sebesar 37,2% menunjukkan bahwa radiator pada sirkuit HT mampu membuang panas sebesar 37,2% dari kapasitas maksimum teoritisnya. Nilai ini mengindikasikan bahwa sistem pendingin HT masih bekerja dalam kondisi operasional, namun kinerjanya dapat dipengaruhi oleh temperatur lingkungan, kondisi radiator, dan laju aliran udara dari motor fan.

- b. Sirkuit Low Temperature (LT)

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{Q_{\text{aktual}}}{Q_{\text{maks}}} \\ \varepsilon &= \frac{971,9 \text{ kW}}{1242,7 \text{ kW}} \\ \varepsilon &= 0,782 \text{ atau } 78,2 \%\end{aligned}\tag{6}$$

Nilai efektivitas radiator pada sirkuit LT sebesar 78,2% menunjukkan bahwa radiator memiliki kemampuan perpindahan panas yang lebih baik dibandingkan sirkuit HT. Hal ini disebabkan oleh perbedaan rentang temperatur operasi dan karakteristik beban termal pada masing-masing sirkuit pendingin.

Secara prinsip deskriptif, laju perpindahan panas aktual (Q_{aktual}) menunjukkan jumlah kalor riil yang benar-benar berhasil dilepaskan oleh air pendingin menuju lingkungan berdasarkan kondisi operasional aktual di lapangan. Sementara itu, laju perpindahan panas maksimum (Q_{maks}) merupakan batas kapasitas kalor tertinggi yang secara teoritis dapat dipindahkan oleh radiator apabila proses perpindahan panas berlangsung secara ideal (sempurna), yang nilainya dibatasi oleh laju kapasitas panas minimum fluida (C_{min}) serta selisih temperatur maksimum antara fluida panas dan dingin. Dengan demikian, nilai efektivitas radiator (ε) menggambarkan seberapa besar persentase performa aktual remote radiator dalam mendekati batas kemampuan termal maksimum teoritisnya.

4.2.6. Evaluasi Kinerja Motor Fan (P_{fan})

Evaluasi kinerja motor fan dilakukan untuk mengetahui performa sistem pendingin dalam menghasilkan aliran udara paksa (forced convection) pada radiator. Arus motor fan diperoleh dari pengukuran panel radiator yang merepresentasikan total 14 unit motor fan yang beroperasi. Nilai arus yang digunakan dalam analisis merupakan rata-rata arus tiga fasa (R, S, dan T).

Berdasarkan data sampel Unit GE#01 tanggal 04 Februari 2026 pukul 10.00 WIB, diperoleh:

Arus fasa R = 73,4 A
Arus fasa S = 73,1 A
Arus fasa T = 73,4 A

Arus rata-rata dihitung menggunakan persamaan:

$$I_{\text{avg}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}\tag{9}$$

$$I_{avg} = \frac{73,4 + 73,1 + 73,4}{3}$$

$$I_{avg} = 73,3 \text{ A}$$

Nilai arus rata-rata tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung daya listrik yang dikonsumsi oleh sistem motor fan radiator dengan mensubstitusikan data lapangan ke dalam Persamaan (1) pada Bab 2, menggunakan parameter tegangan suplai sebesar 400 V dan faktor daya ($\cos \theta$) sebesar 0,8 sebagai berikut:

$$P_{fan} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$$P_{fan} = 1,732 \times 400 \text{ v} \times 73,3 \text{ A} \times 0,8$$

$$P_{fan} = 40,6 \text{ kW}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa total konsumsi daya sistem motor fan radiator sebesar 40,6 kW untuk 14 unit motor fan yang beroperasi. Nilai arus yang relatif seimbang pada ketiga fasa menunjukkan bahwa sistem kelistrikan motor fan berada dalam kondisi operasi yang baik.

4.2.7. Analisis Potensi Derating ($P_{derated}$)

Analisis potensi derating dilakukan untuk mengetahui kemungkinan terjadinya penurunan daya (power derating) pada mesin akibat temperatur lingkungan yang melebihi batas operasional. Berdasarkan karakteristik teknis Gas Engine Jenbacher JMS 620, mekanisme derating mulai terjadi ketika temperatur lingkungan (ambient temperature) melebihi temperatur referensi sebesar 35°C. Apabila temperatur lingkungan masih berada di bawah temperatur referensi tersebut, maka mesin dapat beroperasi pada daya nominal sehingga tidak terjadi penurunan daya.

Berdasarkan data sampel yang digunakan pada penelitian ini, yaitu Unit GE#01 tanggal 04 Februari 2026 pukul 10.00 WIB, diperoleh temperatur lingkungan sebesar:

$$T_{amb} = 34,9^\circ\text{C}$$

Sedangkan temperatur referensi mesin adalah:

$$T_{ref} = 35^\circ\text{C}$$

Karena:

$$T_{amb} < T_{ref}$$

maka:

Tidak terjadi potensi derating

Dengan demikian, sistem pendingin radiator masih mampu menjaga temperatur operasi mesin berada di bawah batas dimulainya mekanisme derating, sehingga mesin tetap dapat beroperasi pada daya nominal tanpa mengalami penurunan daya.

Meskipun demikian, selama periode penelitian ditemukan beberapa kondisi operasi dengan temperatur lingkungan melebihi temperatur referensi sebesar 35°C, sehingga berpotensi mengalami derating. Sebagai contoh, digunakan data Unit GE#01 tanggal 06 Februari 2026 pukul 10.00 WIB.

Diketahui:

- $P_{nominal} = 3349 \text{ kW}$
- $k = 0,01/^{\circ}\text{C}$
- $T_{aktual} = 35,2^{\circ}\text{C}$
- $T_{ref} = 35^{\circ}\text{C}$

Maka:

$$\begin{aligned}
 P_{derated} &= P_{nominal} \cdot [1 - k \cdot (T_{aktual} - T_{ref})] & (2) \\
 P_{derated} &= 3349[1 - 0,01(35,2 - 35)] \\
 P_{derated} &= 3349(0,998) \\
 \boxed{P_{derated} &= 3342,3 \text{ kW}}
 \end{aligned}$$

Potensi kehilangan daya:

$$3349 - 3342,3 = 6,7 \text{ kW}$$

Persentase penurunan daya:

$$\frac{6,7}{3349} \times 100\% = 0,2\%$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada kondisi tersebut daya teoritis mesin mengalami penurunan menjadi 3342,3 kW, atau kehilangan daya sebesar 6,7 kW (0,2%) dari daya nominal. Penurunan daya ini relatif kecil karena temperatur lingkungan hanya 0,2°C lebih tinggi daripada temperatur referensi.

Perhitungan pada kondisi operasi lainnya dilakukan menggunakan prosedur yang sama. Rekapitulasi hasil perhitungan seluruh data pengamatan disajikan pada Tabel 6 dan Tabel 7, sedangkan pembahasan mengenai kondisi operasi yang berpotensi mengalami derating disajikan pada Subbab 4.4.5 Analisis Potensi Derating.

4.3. Hasil Perhitungan

Hasil perhitungan parameter kinerja sistem pendingin pada Unit GE#01 dan GE#03 meliputi laju perpindahan panas actual (Q_{aktual}), laju perpindahan panas maksimum teoritis (Q_{maks}), efektivitas radiator (ϵ), konsumsi daya sistem motor fan (P_{fan}), serta status potensi derating. Rekapitulasi hasil perhitungan secara lengkap disajikan pada Lampiran B, sedangkan pada subbab ini dipaparkan analisis terhadap hasil perhitungan tersebut.

Berdasarkan hasil perhitungan Tabel 10 pada Lampiran B, kinerja sistem pendingin Unit GE#01 menunjukkan variasi pada setiap kondisi operasi. Laju perpindahan panas actual (Q_{aktual}) pada sirkuit Low Temperature (LT) berada pada rentang 971,9–1327,2 kW, sedangkan pada sirkuit High Temperature (HT) berada pada rentang 825,6–1666,8 kW. Variasi tersebut menunjukkan bahwa besarnya panas yang dilepaskan radiator dipengaruhi oleh perubahan temperatur fluida pendingin serta kondisi pembebanan mesin selama beroperasi.

Laju perpindahan panas maksimum teoritis (Q_{maks}) juga mengalami perubahan mengikuti variasi temperatur lingkungan. Pada sirkuit LT diperoleh nilai sebesar 1016,7–1448,1 kW, sedangkan pada sirkuit HT berkisar antara 2079,7–2439,1 kW. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kapasitas maksimum pelepasan panas radiator berubah mengikuti perbedaan temperatur antara fluida pendingin dan udara lingkungan.

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, efektivitas radiator pada sirkuit LT berada pada rentang 78,2%–97,0%, sedangkan efektivitas radiator pada sirkuit HT berada pada rentang 37,2%–68,3%. Nilai efektivitas yang lebih tinggi pada sirkuit LT menunjukkan bahwa proses pelepasan panas pada radiator LT berlangsung lebih efektif dibandingkan radiator HT selama periode pengamatan. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing sirkuit pendingin yang menangani komponen mesin dengan tingkat temperatur operasi yang berbeda.

Konsumsi daya sistem motor fan radiator berada pada kisaran 40,6–44,5 kW, yang menunjukkan bahwa kebutuhan daya motor fan relatif stabil selama unit beroperasi. Berdasarkan evaluasi temperatur lingkungan, hanya terdapat dua kondisi operasi yang memenuhi kriteria potensi derating, yaitu pada 06 Februari 2026 pukul 10.00 WIB dan 12 Februari 2026 pukul 10.00 WIB. Pada kondisi operasi lainnya, temperatur lingkungan masih berada di bawah batas temperatur referensi sehingga tidak menunjukkan potensi terjadinya derating.

Berdasarkan hasil perhitungan Tabel 11 pada Lampiran B, Unit GE#03 menunjukkan variasi parameter kinerja sistem pendingin yang lebih besar dibandingkan Unit GE#01. Laju perpindahan panas actual (Q_{aktual}) pada sirkuit LT berada pada rentang 788,7–1185,6 kW, sedangkan pada sirkuit HT berada pada rentang 1034,6–1708,1 kW. Variasi tersebut menunjukkan adanya perubahan beban panas yang harus dilepaskan radiator selama mesin beroperasi.

Laju perpindahan panas maksimum teoritis (Q_{maks}) pada sirkuit LT berada pada kisaran 1073,2–1289,0 kW, sedangkan pada sirkuit HT berada pada rentang 2069,4–2357,0 kW. Perubahan nilai tersebut dipengaruhi oleh fluktuasi temperatur lingkungan yang terjadi selama periode pengamatan.

Efektivitas radiator pada sirkuit LT berada pada rentang 71,8%–98,9%, sedangkan efektivitas radiator pada sirkuit HT berada pada rentang 48,4%–74,4%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa efektivitas radiator LT secara umum lebih tinggi dibandingkan radiator HT. Meskipun demikian, kedua sirkuit pendingin

masih mampu menjalankan fungsi pelepasan panas sesuai kebutuhan operasi mesin selama periode pengamatan.

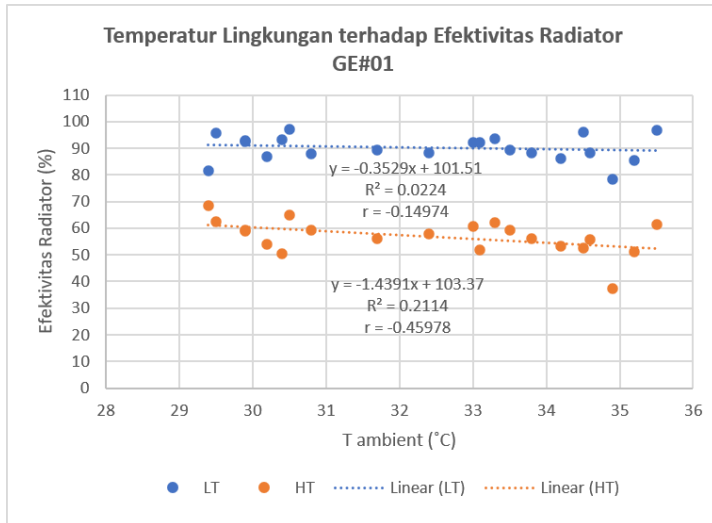
Konsumsi daya sistem motor fan radiator berada pada kisaran 39,0–42,8 kW, sehingga menunjukkan bahwa kebutuhan daya motor fan relatif stabil selama unit beroperasi. Berdasarkan hasil evaluasi temperatur lingkungan, Unit GE#03 memiliki delapan kondisi operasi yang memenuhi kriteria potensi derating, yaitu pada 04, 05, 06, 07, 09, 10, 11, dan 16 Februari 2026 pada pengambilan data pukul 10.00 WIB. Jumlah kondisi tersebut lebih banyak dibandingkan Unit GE#01 sehingga menunjukkan bahwa GE#03 lebih sering beroperasi pada temperatur lingkungan yang melebihi batas temperatur referensi dan memiliki potensi lebih besar mengalami penurunan daya (derating).

4.4. Pembahasan

4.4.1. Pengaruh Temperatur Lingkungan terhadap Efektivitas Radiator

Temperatur lingkungan merupakan salah satu faktor eksternal yang memengaruhi kinerja sistem pendingin radiator. Semakin tinggi temperatur udara di sekitar radiator, semakin kecil perbedaan temperatur antara udara lingkungan dan fluida pendingin. Kondisi tersebut menyebabkan kemampuan radiator dalam melepaskan panas ke lingkungan menjadi berkurang sehingga dapat memengaruhi nilai efektivitas radiator. Oleh karena itu, hubungan antara temperatur lingkungan dan efektivitas radiator perlu dianalisis secara kuantitatif untuk mengetahui besarnya pengaruh perubahan temperatur lingkungan terhadap kinerja sistem pendingin pada Unit GE#01 dan GE#03.

Hubungan antara temperatur lingkungan (T_{amb}) dengan efektivitas radiator pada kedua unit disajikan pada Gambar 16 dan Gambar 17. Grafik disajikan dalam bentuk *scatter plot* yang dilengkapi dengan garis tren linier (*trendline*), persamaan regresi, nilai koefisien determinasi (R^2), serta nilai koefisien korelasi Pearson (r). Penayangan seluruh parameter kuantitatif ini bertujuan agar arah kecenderungan, kekuatan hubungan, dan persentase pengaruh temperatur lingkungan terhadap performa pelepasan panas radiator dapat diamati secara terukur dan ilmiah. Nilai efektivitas radiator yang diplot pada grafik ini hanya mencakup data saat unit mesin beroperasi secara aktif melayani beban. Data pada saat unit berada dalam kondisi *standby*, *shutdown*, atau *breakdown* telah dieliminasi (dibuat *blank*) agar tidak memunculkan plot bernilai nol (0) yang dapat merusak pola tren data dan menimbulkan kesalahan interpretasi terhadap kemampuan pelepasan panas aktual sistem radiator.



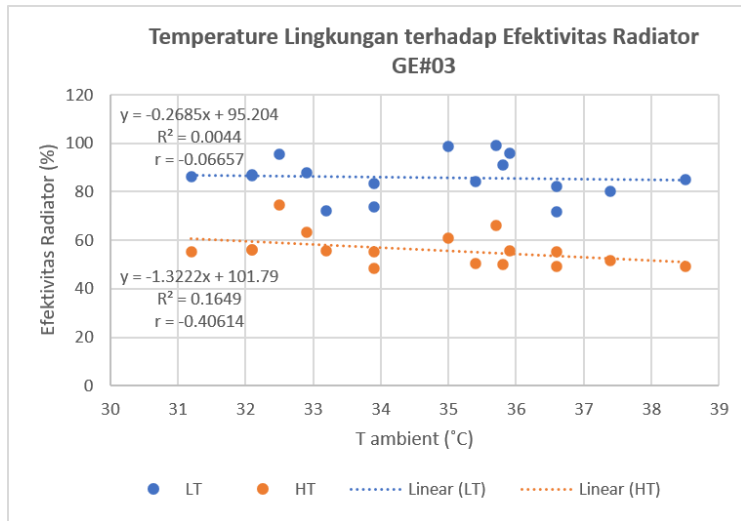
Gambar 16. Hubungan Temperatur Lingkungan terhadap Efektivitas Radiator pada Unit GE#01

Berdasarkan Gambar 16, efektivitas radiator pada sirkuit *Low Temperature* (LT) berada pada kisaran 78,2%–97,0%, sedangkan efektivitas radiator *High Temperature* (HT) berada pada kisaran 37,2%–68,3%. Nilai efektivitas sirkuit LT secara umum konsisten lebih tinggi dibandingkan sirkuit HT pada seluruh rentang temperatur operasi. Hal ini menunjukkan bahwa penyerapan dan pelepasan kalor pada radiator sirkuit LT memiliki performa yang lebih optimal dibandingkan radiator sirkuit HT.

Berdasarkan analisis statistik regresi linier pada sirkuit LT Unit GE#01, diperoleh persamaan regresi $y = -0,3529x + 101,51$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,0224$ dan koefisien korelasi Pearson $r = -0,14974$. Nilai $r = -0,14974$ mengindikasikan adanya hubungan berbanding terbalik (*korelasi negatif*) dengan tingkat hubungan yang sangat lemah, di mana setiap kenaikan temperatur lingkungan sebesar 1°C secara linier hanya menurunkan efektivitas sirkuit LT sebesar 0,3529%. Lebih lanjut, nilai $R^2 = 0,0224$ menunjukkan bahwa fluktuasi temperatur lingkungan hanya memberikan kontribusi pengaruh sebesar 2,24% terhadap variasi efektivitas radiator LT, sementara 97,76% sisanya dipengaruhi oleh faktor operasional lain seperti debit aliran pendingin dan beban termal internal mesin.

Sementara itu, pada sirkuit HT Unit GE#01 diperoleh persamaan regresi $y = -1,4391x + 103,37$ dengan nilai $R^2 = 0,2114$ dan $r = -0,45978$. Nilai $r =$

−0,45978 menandakan adanya korelasi negatif dengan tingkat hubungan sedang. Setiap kenaikan 1°C temperatur lingkungan menurunkan efektivitas radiator HT sebesar 1,4391%, dengan persentase kontribusi pengaruh temperatur lingkungan sebesar 21,14% ($R^2 = 0,2114$). Hasil kuantitatif ini membuktikan bahwa sirkuit HT relatif lebih sensitif terhadap peningkatan beban termal udara luar dibandingkan sirkuit LT, namun sistem pendingin Unit GE#01 secara keseluruhan masih memiliki kapasitas terukur yang memadai untuk menjaga kestabilan temperatur operasi mesin.



Gambar 17. Hubungan Temperatur Lingkungan terhadap Efektivitas Radiator pada Unit GE#03

Karakteristik operasional Unit GE#03 pada rentang temperatur lingkungan yang lebih tinggi (31,2–38,5°C) disajikan pada Gambar 17. Berdasarkan grafik tersebut, efektivitas radiator sirkuit LT berada pada rentang 71,8%–98,9%, sedangkan sirkuit HT berada pada rentang 48,4%–74,4%.

Hasil pengujian korelasi pada sirkuit LT Unit GE#03 menghasilkan persamaan regresi $y = -0,2685x + 95,204$ dengan $R^2 = 0,0044$ dan $r = -0,06657$. Nilai $r = -0,06657$ yang sangat mendekati nol menunjukkan bahwa korelasi negatif antara temperatur lingkungan dan efektivitas LT hampir tidak signifikan. Kenaikan temperatur lingkungan sebesar 1°C hanya berdampak pada penurunan efektivitas LT sebesar 0,2685%, dengan tingkat kontribusi pengaruh udara luar hanya sebesar 0,44% ($R^2 = 0,0044$).

Adapun pada sirkuit HT Unit GE#03, analisis regresi menghasilkan persamaan $y = -1,3222x + 101,79$ dengan nilai $R^2 = 0,1649$ dan $r = -0,40614$. Nilai $r = -0,40614$ mengindikasikan korelasi negatif tingkat sedang, di mana setiap peningkatan temperatur lingkungan sebesar 1°C menurunkan efektivitas pendinginan sirkuit HT sebesar $1,3222\%$, serta memberikan kontribusi pengaruh sebesar $16,49\%$ ($R^2 = 0,1649$). Ketika temperatur lingkungan melonjak melebihi 35°C , penurunan efektivitas terukur secara pasti berdasarkan laju regresi tersebut dan terbukti bukan disebabkan oleh kerusakan internal komponen radiator, melainkan akibat tingginya laju pelepasan panas sekunder yang terhambat oleh temperatur udara luar.

4.4.2. Evaluasi Pembebanan Motor Fan Radiator

Pembebanan motor fan radiator pada sistem pendingin gas engine dicerminkan melalui besar kecilnya konsumsi arus listrik (I) yang diserap oleh motor induksi tiga fasa selama unit beroperasi melayani beban. Besarnya konsumsi arus listrik ini berbanding lurus dengan daya listrik yang diserap motor untuk mengatasi beban mekanis kipas dalam mengalirkan udara paksa (*forced convection*) melewati sirip-sirip radiator, yang dirumuskan melalui persamaan daya listrik tiga fasa:

$$P_{fan} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Analisis pembebanan motor fan ini difokuskan untuk mengevaluasi bagaimana dinamika perubahan temperatur memengaruhi tingkat konsumsi arus dan beban kerja elektrik total dari 14 unit motor fan radiator yang terpasang pada masing-masing Unit GE#01 dan Unit GE#03. Data arus pada saat unit berada dalam kondisi standby, shutdown, atau breakdown telah dieliminasi (blank) agar grafik hanya merepresentasikan kondisi operasional aktif.



Gambar 18. Tren Konsumsi Arus Motor Fan terhadap Waktu Pengamatan pada Unit GE#01

Berdasarkan Gambar 18, total konsumsi arus rata-rata 14 motor fan pada Unit GE#01 selama periode pengamatan berada pada kisaran 73 A hingga 80 A. Garis oranye horizontal pada grafik merepresentasikan batas arus nominal *nameplate* gabungan ($I_{\text{nominal, total}}$) sebesar 89,6 A ($14 \times 6,4$ A). Lonjakan konsumsi arus tertinggi tercatat pada pengambilan data siang hari pukul 10.00 WIB yang menyentuh angka 79,5 A, bertepatan dengan tingginya paparan temperatur lingkungan eksternal sebesar 35,2°C hingga 35,5°C. Meskipun demikian, garis arus operasional (garis biru) terbukti secara visual berada jauh di bawah garis batas arus nominalnya.

Peningkatan beban arus yang terjadi pada siang hari tersebut berkaitan erat dengan fenomena korelasi termal dan pembebanan motor. Paparan temperatur lingkungan yang tinggi memicu peningkatan temperatur pada *winding* (belitan) internal motor fan. Peningkatan suhu belitan ini berbanding lurus dengan kenaikan resistansi kawat tembaga di dalam motor, sehingga penyerapan arus listrik (I) mengalami peningkatan guna mempertahankan torsi mekanis dan putaran kipas yang dibutuhkan dalam meredam kenaikan beban termal pada radiator.



Gambar 19. Tren Konsumsi Arus Motor Fan terhadap Waktu Pengamatan pada Unit GE#03

Karakteristik pembebanan motor fan pada Unit GE#03 disajikan pada Gambar 19, dengan total arus operasional bergerak pada kisaran 71 A hingga 77 A. Serupa dengan Unit GE#01, titik beban arus tertinggi pada Unit GE#03 selalu terkonsentrasi pada siang hari pukul 10.00 WIB, yaitu saat temperatur lingkungan ambien mencatatkan angka di atas 35°C. Secara keseluruhan, tren fluktuasi arus operasional Unit GE#03 juga terbukti konsisten berada di bawah garis acuan arus nominal *nameplate* 89,6 A.

Untuk mengevaluasi tingkat pembebanan motor secara akurat, data total arus operasional aktual hasil pengukuran pada Unit GE#01 dan Unit GE#03

dibandingkan terhadap batas arus nominal gabungan dari 14 unit motor fan KEMAO Model MT160S-6 berdasarkan data *nameplate* pada Tabel 2 (Subbab 2.5.2). Dengan arus nominal per motor sebesar 6,4 A, maka batas total arus nominal gabungan untuk 14 unit motor fan adalah 89,6 A ($14 \times 6,4$ A). Persentase tingkat pembebanan (*loading factor*) dihitung menggunakan persamaan:

$$\% \text{ Loading Motor} = \left(\frac{I_{\text{aktual, total}}}{I_{\text{nominal, total}}} \right) \times 100\% = \left(\frac{I_{\text{aktual, total}}}{89,6 \text{ A}} \right) \times 100\% \quad (10)$$

Hasil evaluasi dan komparasi pembebanan motor fan radiator disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Evaluasi Pembebanan Motor Fan Radiator terhadap Spesifikasi Nameplate

Parameter Kelistrikan	Spesifikasi Nameplate Per Unit Motor (Tabel 2)	Batas Total Nominal (14 Unit Motor Fan)	Hasil Pengukuran Unit GE#01 (14 Fan)	Hasil Pengukuran Unit GE#03 (14 Fan)
Jumlah Motor Fan Operasional	1 Unit	14 Unit	14 Unit	14 Unit
Tegangan Operasional (V)	380--415 V	380--415 V	380 V	380 V
Arus Nominal / Maksimum (I_{nom})	6,4 A	89,6 A	89,6 A	89,6 A
Arus Operasional Minimum (I_{min})	-	-	73,0 A	71,0 A
Arus Operasional Rata-rata (I_{avg})	-	-	76,8 A	74,5 A
Arus Operasional Maksimum (I_{maks})	-	-	80,0 A	77,0 A

Persentase Loading Rata-rata (% ($I_{avg}/I_{nom, total}$))	-	100%	85,71%	83,15%
Persentase Loading Maksimum (% ($I_{maks}/I_{nom, total}$))	-	100%	89,29%	85,94%
Status Pembebanan Motor	Normal	Batas Maksimum	Aman / Optimal	Aman / Optimal

Berdasarkan Tabel 5, hasil komparasi menunjukkan bahwa tingkat pembebanan (*loading factor*) rata-rata dari 14 unit motor fan pada Unit GE#01 berada pada angka 85,71% (76,8 A), dengan puncak pembebanan tertinggi mencapai 89,29% (80,0 A). Sementara itu, Unit GE#03 memiliki tingkat pembebanan rata-rata sebesar 83,15% (74,5 A) dengan pembebanan maksimum 85,94% (77,0 A).

Hubungan antara peningkatan temperatur lingkungan dan lonjakan arus ini menunjukkan bahwa sistem kelistrikan motor fan secara aktif merespons perubahan beban termal di sekitar radiator. Meskipun beroperasi di bawah paparan temperatur luar yang fluktuatif dan ekstrem, tingkat pembebanan arus total motor fan pada kedua unit terbukti konsisten berada di bawah batas arus nominal total (89,6 A) dengan *margin* kapasitas pembebanan yang tersisa sekitar 10,71%–16,85%. Hal ini membuktikan bahwa respons pembebanan elektrik motor fan dalam menanggapi variasi temperatur radiator masih berada dalam kondisi operasional yang aman, handal, dan efisien tanpa memicu potensi beban berlebih (*overload*).

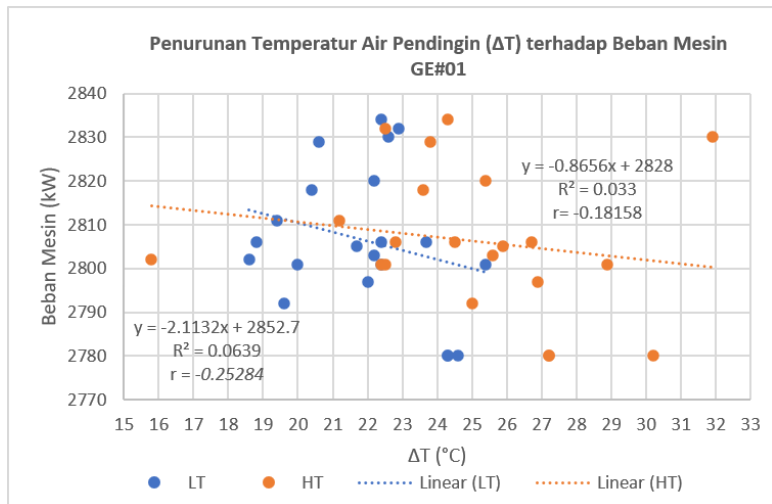
4.4.3. Pengaruh Penurunan Temperatur Air terhadap Beban Mesin

Selain dipengaruhi oleh temperatur lingkungan dan kinerja mekanis motor fan radiator, karakteristik pembebanan elektrik generator (*engine load*) juga sangat bergantung pada efektivitas sistem pendingin dalam membuang panas sisa pembakaran. Efektivitas ini direpresentasikan oleh nilai penurunan temperatur air pendingin ($\Delta T = T_{in} - T_{out}$) setelah melewati radiator, baik pada sirkuit *Low Temperature* (LT) maupun *High Temperature* (HT).

Dalam siklus operasi *gas engine* Jenbacher JMS 620, hubungan antara beban mesin dan ΔT radiator didasarkan pada prinsip keseimbangan energi dan mekanisme perpindahan panas (*heat rejection*). Semakin tinggi beban mesin (kW),

semakin besar pula jumlah bahan bakar gas yang dikonsumsi dan dibakar di dalam ruang bakar. Akibatnya, energi termal (*heat load*) yang harus diserap oleh *jacket water* (sirkuit HT) dan *intercooler* (sirkuit LT) akan meningkat drastis secara proporsional. Peningkatan beban panas ini menuntut radiator untuk membuang kalor ke lingkungan (*heat rejection*) dengan laju yang lebih besar. Oleh karena itu, besaran ΔT pada radiator menjadi indikator utama untuk mengevaluasi apakah mekanisme konveksi paksa pada kisi-kisi radiator mampu mengimbangi fluktuasi produksi panas dari generator.

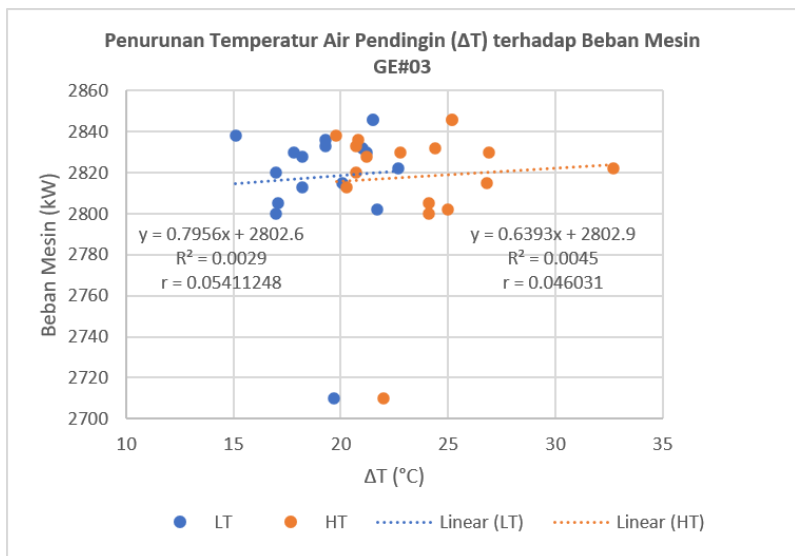
Untuk mengevaluasi karakteristik perpindahan panas tersebut, dilakukan analisis korelasional dengan menempatkan nilai ΔT radiator ($^{\circ}\text{C}$) pada sumbu X dan beban mesin (kW) pada sumbu Y berdasarkan data operasional aktual pada Unit GE#01 dan Unit GE#03. Visualisasi hubungan timbal balik antar kedua parameter kerja ini disajikan pada Gambar 20 dan Gambar 21.



Gambar 20. Hubungan Penurunan Temperatur Air Pendingin (ΔT) terhadap Beban Mesin pada Unit GE#01

Berdasarkan Gambar 20, variasi pembebanan pada Unit GE#01 selama periode pengamatan bergerak stabil pada rentang beban tinggi antara 2.780 kW hingga 2.834 kW. Pada kisaran beban tersebut, nilai penurunan temperatur air (ΔT) pada sirkuit LT tercatat berada pada rentang $18,6^{\circ}\text{C}$ hingga $25,4^{\circ}\text{C}$, sedangkan pada sirkuit HT bergerak pada rentang $15,8^{\circ}\text{C}$ hingga $31,9^{\circ}\text{C}$.

Berdasarkan garis tren linier (*trendline*) pada Gambar 20, sirkuit LT menunjukkan persamaan regresi $y = -2,1132x + 2.852,7$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,0639$ dan koefisien korelasi $r = -0,25284$. Nilai r yang bernilai negatif ini mengindikasikan kecenderungan kemiringan negatif (menurun) seiring peningkatan beban mesin. Sementara itu, sirkuit HT memiliki persamaan $y = -0,8656x + 2.828$ dengan $R^2 = 0,033$ dan $r = -0,18158$, yang menunjukkan tren terbalik yang sangat tipis namun tetap stabil di kisaran pembebanan tinggi. Secara termodinamika, fenomena ini mengindikasikan bahwa pada beban puncak (di atas 2.800 kW), peningkatan laju aliran massa panas ke dalam radiator begitu besar sehingga meskipun kipas bekerja maksimal (sebagaimana terlihat dari tingginya konsumsi arus), kapasitas pelepasan panas (*heat rejection*) spesifik radiator mulai mencapai titik jenuhnya, yang direpresentasikan oleh penyempitan atau stagnasi margin ΔT . Sirkuit HT menerima beban kalor yang jauh lebih dominan dan fluktuatif karena terhubung langsung dengan *jacket water* silinder mesin dan *intercooler* tahap pertama yang suhunya sangat tinggi.



Gambar 21. Hubungan Penurunan Temperatur Air Pendingin (ΔT) terhadap Beban Mesin pada Unit GE#03

Karakteristik operasional pembebanan terhadap perubahan temperatur air pada Unit GE#03 disajikan pada Gambar 21. Hasil rekapitulasi data menunjukkan

bahwa beban operasi Unit GE#03 berada pada rentang 2.710 kW hingga 2.846 kW. Nilai ΔT radiator yang dihasilkan pada sirkuit LT berkisar antara 15,1°C hingga 22,7°C, sementara pada sirkuit HT bergerak pada rentang 19,8°C hingga 32,7°C.

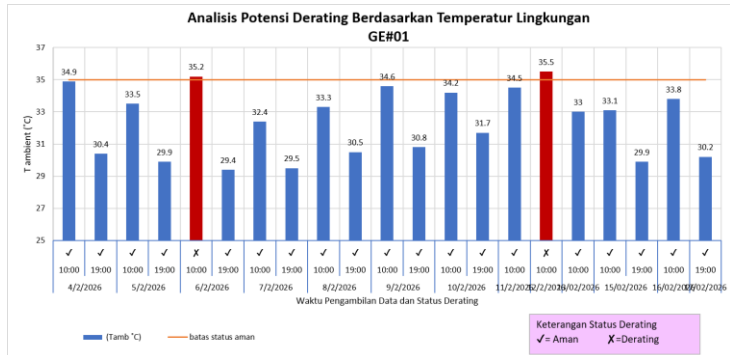
Berdasarkan arah garis tren pada Gambar 21, diperoleh persamaan regresi $y = 0,7956x + 2.802,6$ dengan $R^2 = 0,0029$ dan $r = 0,05411$ pada sirkuit LT, serta $y = 0,6393x + 2.802,9$ dengan $R^2 = 0,0045$ dan $r = 0,04603$ pada sirkuit HT. Kedua nilai r positif yang sangat mendekati nol ini menunjukkan tren yang relatif konstan dengan kecenderungan positif yang sangat tipis. Secara umum, hasil visualisasi pada kedua unit menegaskan bahwa nilai ΔT pada sirkuit HT secara konsisten selalu lebih tinggi dibandingkan sirkuit LT. Hal ini membuktikan validitas operasional bahwa beban pelepasan panas utama (*main heat rejection*) untuk mengamankan temperatur kerja mesin Jenbacher JMS 620 bertumpu pada sirkuit pendingin *High Temperature* (HT).

4.4.4. Analisis Potensi Derating Berdasarkan Temperatur Lingkungan

Temperatur lingkungan merupakan salah satu faktor yang memengaruhi kemampuan sistem pendingin dalam membuang panas dari mesin. Semakin tinggi temperatur udara sekitar, semakin kecil perbedaan temperatur antara udara pendingin dan air pendingin di dalam radiator sehingga proses perpindahan panas menjadi kurang optimal. Kondisi tersebut dapat menyebabkan temperatur kerja mesin meningkat dan berpotensi memicu terjadinya *derating*, yaitu penurunan daya keluaran mesin untuk menjaga batas temperatur operasi yang diizinkan.

Dalam analisis potensi penurunan daya ini, digunakan temperatur referensi (T_{ref}) sebesar 35°C sebagai batasan evaluasi berdasarkan karakteristik spesifikasi teknis pabrikan Jenbacher. Temperatur lingkungan aktual hasil monitoring yang terpantau melebihi nilai ambang batas tersebut dikategorikan secara spesifik sebagai kondisi yang berpotensi memicu terjadinya *derating* pada unit mesin.

Untuk mengetahui karakteristik tersebut, dilakukan analisis mendalam terhadap tren waktu pengambilan data dan status *derating* terhadap temperatur lingkungan yang terjadi pada Unit GE#01 dan Unit GE#03. Hasil plot korelasi parameter-parameter tersebut secara detail ditunjukkan pada Gambar 22 dan Gambar 23.



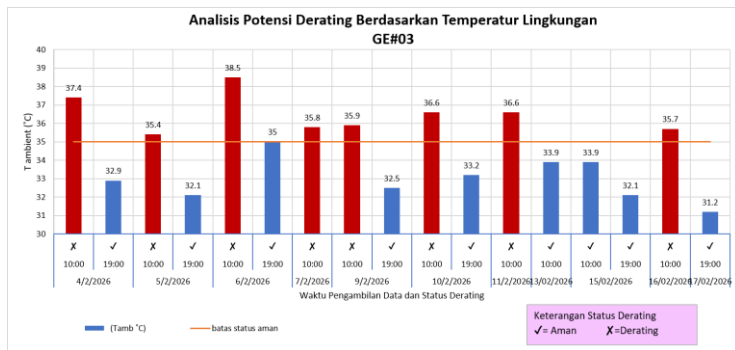
Gambar 22. Analisis Potensi Derating Berdasarkan Temperatur Lingkungan pada Unit GE#01

Visualisasi data pada Gambar 22 disajikan dalam bentuk grafik batang yang dilengkapi dengan garis horizontal penanda batas status aman ($T_{ref} = 35^{\circ}\text{C}$). Status *derating* pada grafik ditampilkan menggunakan simbol pada sumbu horizontal untuk memudahkan identifikasi kondisi operasi mesin secara *real-time*. Simbol centang (✓) menunjukkan status Aman, di mana temperatur lingkungan aktual (T_{amb}) berada di bawah atau sama dengan 35°C (ditandai dengan batang berwarna biru) sehingga mesin dapat beroperasi penuh tanpa mengalami penurunan daya nominal. Sebaliknya, simbol silang (X) mengindikasikan status Derating, yaitu kondisi di mana temperatur lingkungan telah melewati ambang batas referensi optimal pabrikan (ditandai dengan batang berwarna merah).

Berdasarkan Gambar 22, temperatur lingkungan pada Unit GE#01 selama periode pengamatan berada pada kisaran $29,4\text{--}35,5^{\circ}\text{C}$. Sebagian besar kondisi operasi berada pada status aman (✓) meskipun temperatur lingkungan pada siang hari sempat mendekati batas kritis. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pendingin radiator pada Unit GE#01 secara umum masih mampu meredam beban termal operasi sehingga daya keluaran unit tetap dapat dipertahankan.

Potensi *derating* terpantau hanya terjadi sebanyak dua kali sepanjang periode pengamatan, yaitu pada pengambilan data siang hari tanggal 06 Februari 2026 pukul 10.00 WIB saat temperatur lingkungan mencapai $35,2^{\circ}\text{C}$, dan pada tanggal 12 Februari 2026 pukul 10.00 WIB pada temperatur tertinggi senilai $35,5^{\circ}\text{C}$. Kedua kondisi tersebut secara visual digambarkan oleh batang grafik merah yang mencuat melewati garis batas oranye, sehingga memicu kemunculan simbol (X) akibat kemampuan radiator dalam melepaskan panas ke udara lingkungan yang mulai menurun. Sebaliknya, pada pengambilan data sore dan malam hari (pukul

19.00 WIB) dengan temperatur lingkungan yang lebih rendah (29,4--31,7°C), seluruh status konsisten berada pada kondisi aman (✓) dengan warna batang biru.



Gambar 23. Analisis Potensi Derating Berdasarkan Temperatur Lingkungan pada Unit GE#03

Karakteristik operasional yang berbeda ditunjukkan oleh Unit GE#03 pada Gambar 23. Berdasarkan grafik batang tersebut, paparan temperatur lingkungan pada Unit GE#03 berada pada rentang yang relatif lebih tinggi dibandingkan Unit GE#01, yaitu berkisar antara 31,2-38,5°C. Tingginya temperatur lingkungan di sekitar unit ini menyebabkan frekuensi terjadinya potensi *derating* menjadi jauh lebih sering.

Status *derating* pada Unit GE#03 tercatat muncul sebanyak delapan kali, yang didominasi oleh pengambilan data siang hari (pukul 10.00 WIB) pada tanggal 04, 05, 06, 07, 09, 10, 11, dan 16 Februari 2026. Nilai temperatur tertinggi ekstrem tercatat pada tanggal 06 Februari 2026 yang menyentuh angka 38,5°C. Secara visual, seluruh kejadian tersebut ditandai dengan deretan batang grafik merah yang melambung jauh di atas garis referensi 35°C dan diikuti oleh kemunculan simbol silang (X). Hal ini mengindikasikan bahwa sistem pendingin radiator pada GE#03 menerima beban pelepasan panas yang sangat besar akibat pengaruh suhu lingkungan ekstrem, sehingga temperatur kerja mesin mendekati batas operasi kritis yang diizinkan.

Sementara itu, pada kondisi operasi dengan temperatur lingkungan yang turun ke kisaran 31,2-33,9°C (dominan pada pengukuran pukul 19.00 WIB), grafik menunjukkan status kembali aman (✓) karena posisi ujung batang berwarna biru berada di bawah garis oranye. Hal ini membuktikan bahwa penurunan temperatur lingkungan secara signifikan membantu meningkatkan efektivitas perpindahan panas sistem pendingin, sehingga mesin dapat kembali beroperasi penuh pada daya nominalnya secara aman.

4.4.5. Analisis Potensi Derating Mesin

Berdasarkan hasil perhitungan potensi derating yang disajikan pada Tabel 6 dan Tabel 7, diperoleh kondisi operasi ketika temperatur lingkungan melebihi temperatur referensi 35°C. Pada kondisi tersebut dilakukan perhitungan penurunan daya teoritis berdasarkan karakteristik performa mesin untuk mengetahui besarnya potensi derating yang dapat terjadi.

Tabel 6. Tabel Potensi Derating GE#01

Tanggal	Waktu	T_{amb} (°C)	$P_{nominal}$ (kW)	$P_{derated}$ (kW)	Penurunan Daya (kW)	Penurunan (%)
06/02/2026	10:00	35,2	3349	3342,3	6,7	0,2
12/02/2026	10:00	35,5	3349	3332,3	16,7	0,5

Tabel 7. Tabel Potensi Derating GE#03

Tanggal	Waktu	T_{amb} (°C)	$P_{nominal}$ (kW)	$P_{derated}$ (kW)	Penurunan Daya (kW)	Penurunan (%)
04/02/2026	10:00	37,4	3349	3268,6	80,4	2,4
05/02/2026	10:00	35,4	3349	3335,6	13,4	0,4
06/02/2026	10:00	38,5	3349	3231,8	117,2	3,5
07/02/2026	10:00	35,8	3349	3322,2	26,8	0,8
09/02/2026	10:00	35,9	3349	3318,9	30,1	0,9
10/02/2026	10:00	36,6	3349	3295,5	53,5	1,6
11/02/2026	10:00	36,6	3349	3295,5	53,5	1,6
16/02/2026	10:00	35,7	3349	3325,6	23,4	0,7

Berdasarkan Tabel 6, Unit GE#01 hanya memiliki dua kondisi operasi yang memenuhi kriteria potensi derating, yaitu pada 06 Februari 2026 pukul 10.00 WIB dan 12 Februari 2026 pukul 10.00 WIB. Pada kedua kondisi tersebut temperatur lingkungan masing-masing mencapai 35,2°C dan 35,5°C, atau sedikit berada di atas temperatur referensi 35°C. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa daya teoritis mesin menurun dari 3349 kW menjadi 3342,3 kW dan 3332,3 kW, sehingga potensi kehilangan daya hanya sebesar 6,7 kW (0,2%) dan 16,7 kW (0,5%). Nilai penurunan daya yang relatif kecil menunjukkan bahwa pengaruh temperatur lingkungan terhadap performa Unit GE#01 masih tergolong rendah.

Sebaliknya, berdasarkan Tabel 7, Unit GE#03 memiliki delapan kondisi operasi yang memenuhi kriteria potensi derating. Temperatur lingkungan selama kondisi tersebut berada pada rentang 35,4–38,5°C, sehingga menghasilkan potensi penurunan daya yang lebih besar dibandingkan Unit GE#01. Penurunan daya

terbesar terjadi pada 06 Februari 2026 pukul 10.00 WIB, ketika temperatur lingkungan mencapai 38,5°C. Pada kondisi tersebut daya teoritis mesin menurun menjadi 3231,8 kW, sehingga potensi kehilangan daya mencapai 117,2 kW atau sekitar 3,5% dari daya nominal. Sementara itu, pada kondisi lainnya penurunan daya berada pada kisaran 13,4–80,4 kW atau 0,4–2,4%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur lingkungan di atas temperatur referensi, semakin besar potensi penurunan daya mesin yang dihitung secara teoritis. Hal ini disebabkan meningkatnya temperatur udara masuk (ambient air) menyebabkan massa jenis udara menurun sehingga jumlah udara pembakaran yang masuk ke dalam silinder berkurang. Akibatnya, kemampuan mesin menghasilkan daya juga menurun sehingga sistem berpotensi menerapkan derating untuk menjaga keandalan operasi.

Secara keseluruhan, selama periode pengamatan Unit GE#01 menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh temperatur lingkungan karena hanya mengalami dua kondisi potensi derating dengan penurunan daya yang relatif kecil. Sebaliknya, Unit GE#03 lebih sering beroperasi pada temperatur lingkungan yang tinggi sehingga memiliki frekuensi potensi derating yang lebih besar serta potensi kehilangan daya yang lebih signifikan. Meskipun demikian, hasil yang diperoleh merupakan potensi derating berdasarkan hasil perhitungan, sehingga tidak menunjukkan bahwa mesin benar-benar mengalami penurunan daya selama operasi, melainkan menggambarkan besarnya daya yang berpotensi hilang apabila pengaruh temperatur lingkungan menjadi faktor pembatas performa mesin.

Perlu ditegaskan pula bahwa seluruh hasil analisis dan perhitungan dalam penelitian ini diperoleh berdasarkan data operasional aktual selama periode pengamatan terbatas, yaitu pada tanggal 4–17 Februari 2026. Oleh karena itu, hasil penelitian ini bersifat studi kasus (*case study*) yang merepresentasikan kondisi operasi unit mesin pada rentang waktu tersebut dan tidak dimaksudkan untuk menggeneralisasi karakteristik operasi mesin Jenbacher sepanjang tahun. Potensi terjadinya *derating* sangat dinamis karena dipengaruhi oleh fluktuasi temperatur lingkungan, kondisi cuaca, beban operasi mesin, serta pola pembebanan (*dispatch*) dari sistem kelistrikan. Dengan demikian, kondisi *derating* sebelum maupun sesudah periode pengamatan dapat bervariasi dan memerlukan analisis komprehensif lebih lanjut menggunakan data historis dengan jangka waktu yang lebih panjang.

4.5. Analisis Pengujian Hipotesis Penelitian

Berdasarkan hasil pengolahan data operasional aktual, visualisasi grafik tren, dan analisis pembahasan yang telah dijabarkan pada subbab-subbab sebelumnya,

berikut adalah hasil pengujian terhadap hipotesis yang telah dirumuskan pada Bab 2:

1. Pengujian Hipotesis 1 (H1): Diterima
 - Analisis: Hasil visualisasi pada Gambar 20 dan Gambar 21 menunjukkan bahwa fluktuasi pembebanan generator tinggi memengaruhi sebaran nilai ΔT air pendingin radiator. Pola grafik menunjukkan nilai ΔT sirkuit HT bergerak fluktuatif merespons panas *jacket water* dan *intercooler* guna menjaga pembuangan kalor total sistem tetap stabil. Hal ini membuktikan bahwa mekanisme kontrol laju aliran massa *coolant* bekerja optimal seiring variasi beban kerja mesin.
2. Pengujian Hipotesis 2 (H2): Diterima
 - Analisis: Evaluasi parameter kelistrikan pada motor fan radiator KEMAO Model MT1605-6 menunjukkan konsumsi arus rata-rata bergerak stabil pada rentang 73–80 A untuk Unit GE#01 dan 71–77 A untuk Unit GE#03. Meskipun fluktuasi arus tertinggi terkonsentrasi pada siang hari akibat pengaruh temperatur ambien puncak, nilai tersebut terbukti secara konsisten berada di bawah batas arus nominal spesifikasi pabrikan, sehingga status operasional motor fan dipastikan andal dan bebas dari kendala *overcurrent/load*.
3. Pengujian Hipotesis 3 (H3): Diterima
 - Analisis: Perhitungan efektivitas aktual radiator menunjukkan nilai yang stabil, di mana sirkuit *Low Temperature* (LT) memiliki efektivitas lebih tinggi (78,2% – 97,0% pada GE#01 dan 71,8% – 98,9% pada GE#03) dibandingkan sirkuit *High Temperature* (HT). Kemampuan kedua sirkuit pendingin dalam mempertahankan efektivitas termal ini secara nyata membuktikan sistem pendingin radiator eksisting mampu meredam fluktuasi perubahan temperatur lingkungan (T_{amb}) secara optimal.
4. Pengujian Hipotesis 4 (H4): Diterima
 - Analisis: Berdasarkan visualisasi grafik Batang Potensi Dampak Operasional pada Gambar 22, ditemukan bukti nyata bahwa lonjakan temperatur lingkungan eksternal (T_{amb}) yang mendekati atau melewati batas referensi spesifikasi pabrikan ($T_{ref} = 35^{\circ}\text{C}$) secara langsung memicu kemunculan status potensi *derating*. Tercatat Unit GE#01 mengalami 2 kali potensi *derating* dan Unit GE#03 mengalami 8 kali potensi *derating* akibat paparan temperatur lingkungan lokal yang tinggi.

Bab 5. Kesimpulan dan Saran

5. 1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kinerja sistem pendingin radiator pada Gas Engine Jenbacher JMS 620 di PT Maxpower Indonesia, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Kinerja radiator dalam menurunkan temperatur *return water* pada kedua unit gas engine secara umum mampu menjaga temperatur kerja fluida tetap berada dalam batas operasional aman sesuai standar spesifikasi pabrikan Jenbacher. Nilai penurunan temperatur (ΔT) radiator pada sirkuit *Low Temperature* (LT) berkisar 18,6°C–25,4°C untuk Unit GE#01 dan 15,1°C–22,7°C untuk Unit GE#03. Sementara itu, pada sirkuit *High Temperature* (HT) diperoleh ΔT sebesar 15,8°C–31,9°C pada Unit GE#01 dan 19,8°C–32,7°C pada Unit GE#03. Hasil ini menegaskan bahwa sirkuit HT memikul beban pelepasan panas utama yang lebih besar dari *jacket water* mesin guna mempertahankan temperatur operasi yang aman.
2. Efektivitas radiator dalam membuang beban termal menunjukkan bahwa sirkuit *Low Temperature* (LT) memiliki nilai efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan sirkuit *High Temperature* (HT). Pada Unit GE#01, efektivitas LT berada pada kisaran 78,2%–97,0% dan HT sebesar 37,2%–68,3%. Pada Unit GE#03, efektivitas LT berada pada kisaran 71,8%–98,9% dan HT sebesar 48,4%–74,4%. Analisis data operasional tanpa nilai nol (0) menunjukkan bahwa sistem pendingin radiator kedua unit mampu mempertahankan efektivitas termal secara stabil di bawah ambang batas kerja optimal. Munculnya status potensi *derating* murni dipicu oleh faktor eksternal berupa temperatur lingkungan aktual (T_{amb}) yang melebihi batas referensi spesifikasi pabrikan ($T_{ref} = 35^{\circ}\text{C}$), di mana Unit GE#01 hanya mengalami 2 kali potensi *derating*, sedangkan Unit GE#03 mengalami 8 kali potensi *derating* akibat paparan temperatur lingkungan lokal yang lebih tinggi.
3. Evaluasi karakteristik pembebanan elektrik motor fan radiator KEMAO Model MT160S-6 berdasarkan parameter kelistrikan menunjukkan

bahwa komponen penggerak *forced convection* ini beroperasi secara proporsional dan berada di bawah batas arus nominal (I_{nom}) standar spesifikasi teknis pabrikan. Konsumsi arus listrik rata-rata motor fan bergerak stabil pada kisaran 73–80 A (GE#01) dan 71–77 A (GE#03), di mana peningkatan arus hanya terjadi sebagai respons alami terhadap kenaikan temperatur lingkungan tanpa memicu beban berlebih (*overload*).

5. 2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan pemantauan temperatur lingkungan, temperatur *coolant*, dan parameter operasi radiator secara berkala agar potensi penurunan performa sistem pendingin dapat dideteksi lebih awal.
2. Perawatan preventif terhadap radiator dan motor fan, seperti pembersihan sirip radiator, pemeriksaan kondisi motor, *bearing*, *fan blade*, serta keseimbangan arus tiap fasa, perlu dilakukan secara rutin untuk menjaga efektivitas sistem pendingin.
3. Untuk penelitian selanjutnya, analisis dapat dikembangkan dengan menambahkan parameter operasional lain (seperti debit aliran *coolant*, kecepatan putaran motor fan, temperatur *intake air*, tekanan *coolant*, maupun pengaruh kelembapan udara), serta memperpanjang periode pengambilan data dengan melibatkan lebih banyak unit pembangkit agar hasil evaluasi kinerja sistem pendingin dan analisis potensi *derating* menjadi lebih komprehensif serta representatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Ashraff, Fauzan, dan Nazaruddin, "Studi Pengaruh Perubahan Temperatur Terhadap Kinerja Engine Pada PLTMG Panaran PT. Bright Batam," *Jurnal Tektro*, vol. 4, no. 2, pp. 149–153, 2020.
- [2] Muammar, Fauzan, dan Zamzami, "Studi Proses Cooling Sistem Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas Di PT. PJB UBJOM PLTMG Arun," *Jurnal Tektro*, vol. 6, no. 2, pp. 245–251, 2022.
- [3] N. K. Caturwati, dkk., "Analisis Pengaruh Temperatur Lingkungan Terhadap Kinerja Radiator pada Sistem Pendingin Mesin Pembangkit," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 12, no. 1, 2019.
- [4] N. Hidayat, M. Y. Setiawan, dan A. Arif, "Studi Eksperimental Kemampuan Pelepasan Panas pada Radiator Straight Fin Jenis Flat Tube dengan Variasi Cooling Liquid," *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, vol. 20, no. 3, pp. 71–78, 2020.
- [5] M. Huda, S. B. Utomo, dan D. Nugroho, "Analisis Konsumsi Energi Listrik Pada Motor Induksi Di Instalasi Pengolahan Air Produksi II Perusahaan Umum Daerah Air Minum (Perumda) Kota Semarang," *Energi dan Kelistrikan: Jurnal Ilmiah*, vol. 13, no. 2, pp. 143–151, 2021.
- [6] F. Luthfiani, I. M. A. Nugraha, dan M. Ilham, "Preventive Maintenance Pada Sistem Pendingin Mesin Induk Di Kapal Layar Motor Arimby," *Jurnal Megaptera*, vol. 1, no. 1, pp. 33–38, 2022.
- [7] Julianto, A. Hiendro, dan M. Taufiqurrahman, "Analisis Efektivitas Laju Perpindahan Panas Alat Penukar Kalor Tipe Shell And Tube," *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin (JTRAIN)*, vol. 3, no. 1, pp. 92–97, 2022.
- [8] D. S. P. Menggolo, B. Yunianto, dan Muchammad, "Uji Efektivitas Air Cooler Dengan Fluida Dingin Berubah Terhadap Waktu," *Jurnal Teknik Mesin S-1*, vol. 12, no. 3, 2024.
- [9] Akhyan, dkk., "Analisis Karakteristik Aliran Udara Fan Terhadap Laju Perpindahan Panas Radiator," *Jurnal Teknik Energi*, vol. 14, no. 2, 2021.
- [10] GE Jenbacher, *Technical Instruction: Operation and Maintenance Manual Gas Engine Jenbacher JMS 620 GS-N.L*, Austria: GE Jenbacher GmbH & Co OG.
- [11] T. Hidayat, M. Arif, dan Martias, "Perbandingan Karakteristik Pelepasan Panas Berbagai Tipe Radiator Pada Mesin Pembangkit," *Jurnal Rekayasa Termal*, vol. 10, no. 3, pp. 101–109, 2022.
- [12] D. Lestari dan A. Kurniawan, "Analisis Efektivitas Radiator Terhadap Kestabilan Temperatur Coolant Pada Mesin Gas," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 12, no. 2, pp. 85–93, 2020.
- [13] F. Muhammad, "Analisis Teknis dan Ekonomis Efek Rasio Kompresi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) Menggunakan Siklus Energi

Otto," Tugas Akhir, Program Studi Teknik Elektro, UIN Sultan Syarif Kasim Riau, 2021.

BIODATA



Nama : Ghyna Insyirah Putri Yunky
TTL : Palembang, 11 Agustus 2003
Agama : Islam
Alamat : Taman Hang Tuah Blok A6 No. 9
Email : ghynayunky118@gmail.com
Riwayat Pendidikan : SMAN 20 BATAM
SMPN 43 BATAM

LAMPIRAN

Lampiran A. Data Hasil Pengamatan

Tabel 8. Data Operasional Sistem Pendingin – GE#01

Tanggal	Waktu	T_{amb} (°C)	T_{out} (°C)	T_{in} (°C)	Beban Mesin (KW)	Total Arus Fan (A)
04/02/2026	10:00	34.9	LT= 40.5 HT= 62.3	LT= 59.1 HT= 78.1	2802	R= 73.4 S= 73.1 T= 73.4
	19:00	30.4	LT= 32.6 HT= 53.7	LT= 56.3 HT= 76.5	2806	R= 74.1 S= 74.1 T= 74.7
05/02/2026	10:00	33.5	LT= 36.2 HT= 51.3	LT= 55.8 HT= 76.3	2792	R= 78.8 S= 78.6 T= 79.2
	19:00	29.9	LT= 32.2 HT= 49.4	LT= 56.5 HT= 76.6	2780	R= 79.5 S= 79.1 T= 79.6
06/02/2026	10:00	35.2	LT= 38.9 HT= 56.1	LT= 58.3 HT= 77.3	2811	R= 78.7 S= 78.6 T= 79.1
	19:00	29.4	LT= 35 HT= 45	LT= 57.6 HT= 76.9	2830	R= 74.5 S= 73.9 T= 74.3
07/02/2026	10:00	32.4	LT= 35.8 HT= 51.8	LT= 58 HT= 77.4	2803	R= 78.7 S= 78.4 T= 79.3
	19:00	29.5	LT= 31.1 HT= 47.8	LT= 56.5 HT= 76.7	2801	R= 79.8 S= 80 T= 80.3
08/02/2026	10:00	33.3	LT= 35.2 HT= 50.4	LT= 57.2 HT= 77.3	2797	R= 79.5 S= 79.1 T= 79.2
	19:00	30.5	LT= 31.7 HT= 47.6	LT= 56.3 HT= 77.8	2780	R= 79.8 S= 79.9 T= 80.4

09/02/2026	10:00	34.6	LT= 37.7 HT= 54.2	LT= 58.1 HT= 77.8	2818	R= 78.4 S= 78.4 T= 78.7
	19:00	30.8	LT= 34.3 HT= 50	LT= 56.7 HT= 76.7	2806	R= 78.3 S= 78.7 T= 79.3
10/02/2026	10:00	34.2	LT= 37.8 HT= 54.8	LT= 57.8 HT= 77.3	2801	R= 78.3 S= 78.2 T= 79.4
	19:00	31.7	LT= 34.8 HT= 52.5	LT= 57 HT= 77.9	2820	R= 79.5 S= 79.3 T= 79.9
11/02/2026	10:00	34.5	LT= 35.8 HT= 55.5	LT= 58.2 HT= 77.9	2801	R= 79 S= 78.8 T= 79.3
	19:00	31.2	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
12/02/2026	10:00	35.5	LT= 36.5 HT= 51.5	LT= 55.3 HT= 76	2806	R= 78.6 S= 78.6 T= 79.1
	19:00	30.5	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
13/02/2026	10:00	33	LT= 35.3 HT= 50.6	LT= 57 HT= 76.5	2805	R= 78.9 S= 78.3 T= 79
	19:00	29.7	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
14/02/2026	10:00	33.9	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
	19:00	29.7	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
15/02/2026	10:00	33.1	LT= 35.5 HT= 54.9	LT= 58.4 HT= 77.4	2832	R= 79 S= 78.5 T= 78.9
	19:00	29.9	LT= 32.2 HT= 49.4	LT= 56.5 HT= 76.6	2780	R= 79.5 S= 79.1

						T= 79.6
16/02/2026	10:00	33.8	LT= 37.0 HT= 53.3	LT= 57.6 HT= 77.1	2829	R= 79.1 S= 78.7 T= 79.5
	19:00	30.7	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
17/02/2026	10:00	31.2	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
	19:00	30.2	LT= 34 HT= 51.8	LT= 56.4 HT= 76.1	2834	R= 80.2 S= 80 T= 80.5

0

Unit tidak beroperasi (shutdown, breakdown, atau standby); nilai 0 menunjukkan data operasional tidak tersedia.

Tabel 9. Data Operasional Sistem Pendingin – GE#03

Tanggal	Waktu	T_{amb} (°C)	T_{out} (°C)	T_{in} (°C)	Beban Mesin (KW)	Total Arus Fan (A)
04/02/2026	10:00	37.4	LT= 42 HT= 57.6	LT= 59 HT= 78.3	2820	R= 76.5 S= 74.6 T= 76.4
	19:00	32.9	LT= 36 HT= 49.2	LT= 56.1 HT= 76	2815	R= 77 S= 76.9 T= 76.7
05/02/2026	10:00	35.4	LT= 39.4 HT= 57.1	LT= 57.6 HT= 78.3	2828	R= 77.4 S= 75.8 T= 77
	19:00	32.1	LT= 35.7 HT= 52.8	LT= 57.2 HT= 78	2846	R= 76.9 S= 76.4 T= 76.9
06/02/2026	10:00	38.5	LT= 42.1 HT= 60.2	LT= 60.3 HT= 80.5	2813	R= 76.3 S= 76.2 T= 76.4
	19:00	35	LT= 35.9 HT= 51.9	LT= 57.6 HT= 76.9	2802	R= 74.5 S= 73.9 T= 74.3
07/02/2026	10:00	35.8	LT= 38.1 HT= 56.7	LT= 57.4 HT= 77.4	2833	R= 76.8 S= 76.5

						T= 76.4
	19:00	32.5	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
08/02/2026	10:00	36.6	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
	19:00	32.7	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
09/02/2026	10:00	35.9	LT= 37.1 HT= 54.2	LT= 56.8 HT= 76.2	2710	R= 70.9 S= 70.8 T= 71.6
	19:00	32.5	LT= 34.0 HT= 44.5	LT= 56.7 HT= 77.2	2822	R= 77.1 S= 77.4 T= 78.4
10/02/2026	10:00	36.6	LT= 40.8 HT= 55.7	LT= 58.6 HT= 78.5	2830	R= 76.1 S= 76 T= 76.5
	19:00	33.2	LT= 40.2 HT= 53.3	LT= 57.2 HT= 77.4	2800	R= 76.6 S= 76.3 T= 76.9
11/02/2026	10:00	36.6	LT= 42.9 HT= 57.6	LT= 58 HT= 77.4	2838	R= 76.2 S= 76.9 T= 76.7
	19:00	33.6	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
12/02/2026	10:00	37.3	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
	19:00	33.2	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
13/02/2026	10:00	33.9	LT= 38.1 HT= 56.8	LT= 57.4 HT= 77.6	2836	R= 76.8 S= 76.5 T= 76.8
	19:00	31.8	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
14/02/2026	10:00	35.5	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0

						S= 0 T= 0
	19:00	31.5	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
15/02/2026	10:00	33.9	LT= 40.4 HT= 54.2	LT= 57.5 HT= 78.3	2805	R= 70.8 S= 68.9 T= 71.6
	19:00	32.1	LT= 35.7 HT= 52.8	LT= 57.2 HT= 78	2846	R= 76.9 S= 76.4 T= 76.9
16/02/2026	10:00	35.7	LT= 36.3 HT= 50.2	LT= 57.5 HT= 77.1	2830	R= 76.8 S= 76.8 T= 77.2
	19:00	32.7	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
17/02/2026	10:00	32.5	LT= 0 HT= 0	LT= 0 HT= 0	0	R= 0 S= 0 T= 0
	19:00	31.2	LT= 35 HT= 51.9	LT= 56 HT= 76.3	2832	R= 77.2 S= 77 T= 77.5

0

Unit tidak beroperasi (shutdown, breakdown, atau standby); nilai 0 menunjukkan data operasional tidak tersedia.

Lampiran B. Hasil Perhitungan

Tabel 10. Tabel Hasil Perhitungan Sistem Pendingin – GE#01

Tanggal	Waktu	$Q_{aktual}(kW)$	$Q_{maks}(kW)$	$\varepsilon(\%)$	$P_{fan}(kW)$	Status Derating
04/02/2026	10:00	LT= 971,9 HT= 825,6	LT= 1242,7 HT= 2218,3	LT= 78,2 HT= 37,2	40,6	Tidak terjadi potensi derating
	19:00	LT= 1238,3 HT= 1191,3	LT= 1330,0 HT= 2367,2	LT= 93,1 HT= 50,3	41,2	Tidak terjadi potensi derating

05/02/2026	10:00	LT= 1024,1 HT= 1306,3	LT= 1145,1 HT= 2197,8	LT= 89,4 HT= 59,4	43,7	Tidak terjadi potensi derating
	19:00	LT= 1269,7 HT= 1421,2	LT= 1365,9 HT= 2398,0	LT= 93,0 HT= 59,3	44,0	Tidak terjadi potensi derating
06/02/2026	10:00	LT= 1013,7 HT= 1107,7	LT= 1186,2 HT= 2161,8	LT= 85,5 HT= 51,2	43,7	Terjadi potensi derating
	19:00	LT= 1180,9 HT= 1666,8	LT= 1448,1 HT= 2439,1	LT= 81,5 HT= 68,3	41,1	Tidak terjadi potensi derating
07/02/2026	10:00	LT= 1159,9 HT= 1337,6	LT= 1314,6 HT= 2310,8	LT= 88,2 HT= 57,9	43,7	Tidak terjadi potensi derating
	19:00	LT= 1327,2 HT= 1509,0	LT= 1386,5 HT= 2423,7	LT= 95,7 HT= 62,3	44,4	Tidak terjadi potensi derating
08/02/2026	10:00	LT= 1149,5 HT= 1405,5	LT= 1227,3 HT= 2259,4	LT= 93,7 HT= 62,2	44,0	Tidak terjadi potensi derating
	19:00	LT= 1285,4 HT= 1577,9	LT= 1325,0 HT= 2428,8	LT= 97,0 HT= 65,0	44,4	Tidak terjadi potensi derating
09/02/2026	10:00	LT= 1065,9 HT= 1232,9	LT= 1206,7 HT= 2218,3	LT= 88,3 HT= 55,6	43,5	Tidak terjadi potensi derating
	19:00	LT= 1170,4 HT= 1395,1	LT= 1330,0 HT= 2356,9	LT= 88,0 HT= 59,2	43,7	Tidak terjadi potensi derating
10/02/2026	10:00	LT= 1045,0 HT= 1175,6	LT= 1211,9 HT= 2213,2	LT= 86,2 HT= 53,1	43,6	Tidak terjadi potensi derating
	19:00	LT= 1159,9 HT= 1327,2	LT= 1299,2 HT= 2372,4	LT= 89,3 HT= 55,9	44,1	Tidak terjadi potensi derating
11/02/2026	10:00	LT= 1170,4 HT= 1170,4	LT= 1217,0 HT= 2228,6	LT= 96,2 HT= 52,5	43,8	Tidak terjadi potensi derating
	19:00	-	-	-	-	-

12/02/2026	10:00	LT= 982,4 HT= 1279,9	LT= 1016,7 HT= 2079,7	LT= 96,6 HT= 61,5	43,7	Terjadi potensi derating
	19:00	-	-	-	-	-
13/02/2026	10:00	LT= 1133,8 HT= 1353,3	LT= 1232,4 HT= 2233,8	LT= 92,0 HT= 60,6	43,6	Tidak terjadi potensi derating
	19:00	-	-	-	-	-
14/02/2026	10:00	-	-	-	-	-
	19:00	-	-	-	-	-
15/02/2026	10:00	LT= 1196,5 HT= 1175,6	LT= 1299,2 HT= 2274,8	LT= 92,1 HT= 51,7	43,7	Tidak terjadi potensi derating
	19:00	LT= 1265,1 HT= 1412,0	LT= 1367,9 HT= 2400,6	LT= 92,5 HT= 58,8	44,0	Tidak terjadi potensi derating
16/02/2026	10:00	LT= 1076,4 HT= 1243,6	LT= 1222,1 HT= 2223,5	LT= 88,1 HT= 55,9	43,8	Tidak terjadi potensi derating
	19:00	-	-	-	-	-
17/02/2026	10:00	-	-	-	-	-
	19:00	LT= 1170,4 HT= 1269,7	LT= 1345,4 HT= 2356,9	LT= 87,0 HT= 53,9	44,5	Tidak terjadi potensi derating

- Unit tidak beroperasi (shutdown, breakdown, atau standby); simbol (-) menunjukkan perhitungan tidak dilakukan.

Tabel 11. Tabel Hasil Perhitungan Sistem Pendingin – GE#03

Tanggal	Waktu	$Q_{aktual}(kW)$	$Q_{maks}(kW)$	$\varepsilon(\%)$	$P_{fan}(kW)$	Status Derating
04/02/2026	10:00	LT= 888,3 HT= 1081,6	LT= 1109,2 HT= 2100,2	LT= 80,1 HT= 51,5	42,0	Terjadi potensi derating
	19:00	LT= 1049,2 HT= 1390,9	LT= 1192,3 HT= 2203,0	LT= 88,0 HT= 63,1	42,6	Tidak terjadi potensi derating
05/02/2026	10:00	LT= 950,9 HT= 1112,9	LT= 1130,5 HT= 2202,3	LT= 84,1 HT= 50,5	42,6	Terjadi potensi derating

	19:00	LT= 1118,2 HT= 1316,8	LT= 1289,0 HT= 2357,0	LT= 86,7 HT= 55,9	42,5	Tidak terjadi potensi derating
06/02/2026	10:00	LT= 950,9 HT= 1060,7	LT= 1119,4 HT= 2156,7	LT= 84,9 HT= 49,2	42,2	Terjadi potensi derating
	19:00	LT= 1133,8 HT= 1306,3	LT= 1150,2 HT= 2151,6	LT= 98,6 HT= 60,7	41,1	Tidak terjadi potensi derating
07/02/2026	10:00	LT= 1008,5 HT= 1081,6	LT= 1109,2 HT= 2156,7	LT= 90,9 HT= 50,2	42,4	Terjadi potensi derating
	19:00	-	-	-	-	-
08/02/2026	10:00	-	-	-	-	-
	19:00	-	-	-	-	-
09/02/2026	10:00	LT= 1029,4 HT= 1149,5	LT= 1073,2 HT= 2069,4	LT= 95,9 HT= 55,5	39,4	Terjadi potensi derating
	19:00	LT= 1185,6 HT= 1708,1	LT= 1242,7 HT= 2295,3	LT= 95,4 HT= 74,4	43,0	Tidak terjadi potensi derating
10/02/2026	10:00	LT= 929,8 HT= 1191,3	LT= 1129,7 HT= 2151,6	LT= 82,3 HT= 55,4	42,2	Terjadi potensi derating
	19:00	LT= 888,3 HT= 1259,8	LT= 1232,4 HT= 2269,9	LT= 72,1 HT= 55,5	42,4	Tidak terjadi potensi derating
11/02/2026	10:00	LT= 788,7 HT= 1034,6	LT= 1098,9 HT= 2095,1	LT= 71,8 HT= 49,4	42,4	Terjadi potensi derating
	19:00	-	-	-	-	-
12/02/2026	10:00	-	-	-	-	-
	19:00	-	-	-	-	-
13/02/2026	10:00	LT= 1008,5 HT= 1086,8	LT= 1206,7 HT= 2243,9	LT= 83,6 HT= 48,4	42,5	Tidak terjadi potensi derating
	19:00	-	-	-	-	-
14/02/2026	10:00	-	-	-	-	-
	19:00	-	-	-	-	-

15/02/2026	10:00	LT= 893,5 HT= 1259,8	LT= 1211,9 HT= 2279,9	LT= 73,7 HT= 55,3	39,0	Tidak terjadi potensi derating
	19:00	LT= 1123,4 HT= 1316,7	LT= 1288,9 HT= 2357,0	LT= 87,2 HT= 55,9	42,5	Tidak terjadi potensi derating
16/02/2026	10:00	LT= 1107,7 HT= 1405,5	LT= 1119,4 HT= 2126,0	LT= 98,9 HT= 66,1	42,6	Terjadi potensi derating
	19:00	-	-	-	-	-
17/02/2026	10:00	-	-	-	-	-
	19:00	LT= 1097,3 HT= 1275,0	LT= 1273,5 HT= 2315,9	LT= 86,2 HT= 55,1	42,8	Tidak terjadi potensi derating



Unit tidak beroperasi (shutdown, breakdown, atau standby); simbol (-) menunjukkan perhitungan tidak dilakukan.

Lampiran C. Dokumentasi Pengamatan

Dokumentasi Sampel Data Pengamatan:

<https://drive.google.com/drive/folders/1TRuVuUxgXRKhago5zp0wovVdErCyqX3M>

**FORMULIR LOGBOOK BIMBINGAN DAN PENGAJUAN
SIDANG TUGAS AKHIR**

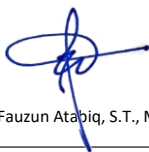
Nama : Ghyna Insyirah Putri Yunky
 NIM : 4232201016
 Pembimbing I : Ir. Fauzun Atabiq, S. T., M. Cs
 Judul : Analisis Kinerja Radiator pada Sistem Pendingin Gas Engine Jenbacher Tipe JMS 620 di PLTMG Batamindo PT. Maxpower Indonesia

No	Hari/Tgl	Rincian Kegiatan	TTD Pembimbing
1	Kamis, 22/01/2026	Mengirimkan hasil revisi Seminar Proposal melalui Google Drive untuk dilakukan pengecekan oleh dosen pembimbing.	
2	Jumat, 23/01/2026	Melakukan revisi format penulisan nama dan gelar pada lembar persetujuan sesuai arahan dosen, kemudian mengunggah kembali dokumen revisi serta menerima TTD digital pembimbing.	
3	Jumat, 30/01/2026	Dosen pembimbing membagikan contoh jurnal dan Tugas Akhir sebagai referensi penyusunan laporan serta pembahasan hasil penelitian.	
4	Minggu, 19/04/2026	Bimbingan pengolahan data dengan melakukan filtering data dan penyajian profil harian menggunakan nilai rata-rata agar hasil analisis lebih jelas.	
5	Minggu, 19/04/2026	Revisi penyajian grafik menggunakan scatter plot untuk melihat korelasi antarvariabel serta penambahan narasi dan analisis deskriptif pada setiap grafik.	
6	Senin, 27/04/2026	Revisi pembahasan Tugas Akhir agar berfokus pada hasil penelitian, termasuk perbaikan penamaan tabel dan subbab sesuai konteks pembahasan.	
7	Senin, 27/04/2026	Melakukan revisi bagian kesimpulan agar sesuai dengan tujuan penelitian sebagai syarat pengajuan Sidang Tugas Akhir.	
8	Kamis, 30/04/2026	Monitoring progres penyelesaian Tugas Akhir dan tindak lanjut revisi sesuai arahan dosen pembimbing sebagai persiapan Sidang Tugas Akhir.	
9	Jumat, 08/05/2026	Penyempurnaan bagian kesimpulan agar selaras dengan tujuan penelitian dan hasil analisis yang diperoleh.	
10	Selasa, 30/06/2026	Finalisasi naskah Tugas Akhir, konfirmasi kesiapan Sidang Tugas Akhir Batch 2, serta pengajuan berkas pendaftaran sidang sesuai arahan dosen pembimbing.	

Berdasarkan hasil bimbingan yang telah dilaksanakan selama 6 bulan dan telah disetujui oleh dosen pembimbing, maka dengan ini saya mengajukan diri sebagai peserta Sidang Tugas Akhir.

Batam, 30 Juni 2026

Dosen Pembimbing



Ir. Fauzun Atabiq, S.T., M.Cs.

NIK: 110073

Mahasiswa



Ghyna Insyirah Putri Yunky

NIM: 4232201016