



**Analisis Pengaruh Temperatur *Exhaust* terhadap
Kinerja Mesin Gas *Rolls-Royce* Unit 1 PLTMG
Maxpower Cogindo Batam**

Tugas Akhir

**Oleh:
Wulan N Hutapea (4232101061)**

**Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi
Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Batam
2025**

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertandatangan dibawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul : **"Analisis Pengaruh Temperatur Exhaust terhadap Kinerja Mesin Gas Rolls-Royce Unit 1 PLTMG Maxpower Cogindo Batam"** 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, 08 Januari 2025



Wulan N Hutapea
NIM: 4232101061

Lembar Pengesahan

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

Oleh:
Wulan N Hutapea (4232101061)

Tanggal Sidang: 08 Januari 2025

Disetujui oleh:

Penguji I



1. Yusiran S.Si., M.T.
NIK: 123294

Pembimbing



1. Hasnira, S.ST., M.Tr.T.
NIK: 113112

Penguji II



2. Didi Istardi S.T., M.Sc.
NIK: 102022

Analisis Pengaruh Temperatur *Exhaust* terhadap Kinerja Mesin Gas *Rolls-Royce* Unit 1 PLTMG Maxpower Cogindo Batam

Abstrak

PLTMG Maxpower Cogindo Batam beroperasi sejak bulan April 2022 dan menghasilkan daya listrik sebesar 30 MW. Penelitian ini didasarkan pada pentingnya temperatur *exhaust* sebagai parameter operasional yang memengaruhi efisiensi dan performa mesin. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis bagaimana temperatur *exhaust* berdampak pada kinerja mesin, serta membandingkan efisiensi dan *heat rate* pada kondisi normal dan kondisi *derating* 30%. Metode yang digunakan adalah kuantitatif dengan pengumpulan data primer dan sekunder serta mencakup studi literatur, observasi lapangan yang kemudian akan dilakukan analisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *exhaust* di atas *set point* yang telah ditentukan dapat menyebabkan mesin mengalami *derating*, yang berdampak pada penurunan daya keluaran, penurunan efisiensi, dan peningkatan *heat rate*. Adapun hubungan antara *heat rate* dan efisiensi mesin gas adalah berbanding terbalik. Ketika nilai *heat rate* semakin tinggi maka efisiensi mesin gas akan semakin rendah. Nilai efisiensi terendah dari tiga bulan dilakukan penelitian adalah pada tanggal 25 Agustus 2024 dengan nilai 43,3% dan *heat rate* tertinggi juga terjadi pada tanggal 25 Agustus 2024 dengan nilai 8.529,39 BTU/kWh. Pemeliharaan yang dilakukan untuk mengatasi masalah naiknya temperatur *exhaust* adalah dengan memperbaiki bagian yang bermasalah seperti melakukan *setting fuel rack*, penggantian komponen sistem pengapian seperti *prechamber*, busi, dan konektor busi serta menerapkan SOP dan *schedule routine maintenance*.

Kata kunci: Temperatur gas buang, Kinerja mesin gas, *Derating*, PLTMG.

Analysis of the Effect of Exhaust Temperature on the Performance of Rolls-Royce Gas Engine Unit 1 PLTMG Maxpower Cogindo Batam

Abstract

Maxpower Cogindo Batam has been operating since April 2022 and produces 30 MW of electricity. This research is based on the importance of exhaust gas temperature as an operational parameter that affects engine efficiency and performance. The purpose of this study is to analyze how exhaust gas temperature affect the engine performance, as well as to compare efficiency and heat rate under normal and 30% derating conditions. The method used is quantitative with primary and secondary data collection and includes literature studies, field observations which will then be analyzed. The results show that an increase in exhaust gas temperature above a predetermined set point can cause the engine to experience derating which has an impact on decreasing output power, decreasing efficiency, and increasing heat rate. The relationship between heat rate and gas engine efficiency is inversely proportional. When the heat rate value is higher, the gas engine efficiency will be lower. The lowest efficiency value of the three months of research was on August 25, 2024 with a value of 43.3% and the highest heat rate also occurred on August 25, 2024 with a value of 8,529.39 BTU/kWh. Maintenance carried out to overcome the problem of rising exhaust gas temperatures is to make repairs to problematic parts such as setting the fuel rack, replacing ignition system components such as prechamber, spark plugs, and spark plug connectors.

Keywords: Exhaust temperature, Gas engine performance, Derating, GEPP.

Kata Pengantar

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena berkat kasih dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul Analisis Pengaruh Temperatur *Exhaust* terhadap Kinerja Mesin Gas *Rolls-Royce* Unit 1 PLTMG Maxpower Cogindo Batam. Penyusunan Tugas Akhir ini bertujuan untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan pendidikan pada Jurusan Teknik Elektro Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi di Politeknik Negeri Batam. Selain itu, penulisan Tugas Akhir ini untuk memberikan pengetahuan kepada pembaca mengenai *Derating* pada Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) dan Pengaruhnya terhadap Kinerja Mesin Gas.

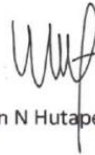
Dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini banyak dukungan dan bantuan yang telah diterima oleh penulis dari berbagai pihak sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan keluarga yang selalu memberikan doa dan dukungan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir.
2. Bapak Ir. Bambang Hendrawan, S.T., MSM. selaku Direktur Politeknik Negeri Batam.
3. Bapak Ir. Indra Hardian Mulyadi, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
4. Bapak Irwanto Zarma Putra, S.Pd., M.Eng selaku Ketua Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi.
5. Bapak Arif Febriansyah Juwito, S.T., M.Eng. selaku dosen wali yang telah memberikan motivasi kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
6. Ibu Hasnira, S.ST., M.Tr.T. selaku koordinator magang dan dosen pembimbing yang telah memberikan saran, bantuan, dan motivasi kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
7. Bapak Yusiran S.Si., M.T. selaku dosen penguji I yang telah memberikan saran serta bantuan dalam penyusunan Tugas Akhir.
8. Bapak Didi Istarti S.T., M.Sc selaku dosen penguji II yang telah memberikan saran dalam penyusunan Tugas Akhir.
9. Seluruh dosen Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir.
10. Bapak Ferhat selaku pembimbing di industri yang telah membantu dan memberikan informasi kepada penulis dalam penyusunan Tugas Akhir.
11. PT Maxpower Cogindo Batam terutama Divisi Operator yang telah membantu dan mengizinkan penulis untuk mengakses data serta memberikan saran dan dukungan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir.

12. Teman-teman kelas B yang telah memberikan bantuan dan semangat dalam penyusunan Tugas Akhir.
13. Pemilik NIM 37, 39, 63, 32, 33 yang menjadi teman penulis sejak awal perkuliahan yang saling memberikan semangat dan bantuan saat proses penyusunan Tugas Akhir.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang turut membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna dan masih terdapat kekurangan serta tidak lepas dari kesalahan. Oleh karena itu, penulis menyambut baik semua kritik dan saran yang bersifat membangun untuk memperbaiki penyusunan Tugas Akhir ini. Harapan penulis semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan menambah pengetahuan baru bagi pembaca.

Batam, 08 Januari 2025



Wulan N Hutapea

Daftar Isi

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir.....	i
Lembar Pengesahan	ii
Abstrak	iii
<i>Abstract</i>	iv
Kata Pengantar.....	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	x
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. Penelitian Terkait	4
2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG)	5
2.2.1. Prinsip Kerja PLTMG (Siklus Otto)	6
2.3. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG)	7
2.3.1. Sistem Bahan Bakar (<i>Fuel Gas System</i>).....	7
2.3.2. Sistem Udara (<i>Air System</i>)	8
2.3.3. Sistem Pembakaran (<i>Combustion System</i>)	9
2.4. <i>Exhaust Cylinder Temperature Derating</i>	10
2.4.1. <i>Derating</i>	11
2.4.2. <i>Cylinder Deviation</i>	11

2.5. Kinerja Mesin Gas.....	12
2.5.1. Formula Perhitungan Kinerja Mesin Gas	13
Bab 3. Metodologi Penelitian / Metode Pelaksanaan	16
3.1. Perancangan	16
3.1.1. Studi Literatur	17
3.1.2. Observasi Lapangan	17
3.1.3. Pengumpulan Data	17
3.1.4. Perhitungan Kinerja Mesin Gas.....	18
3.2. Jadwal Pelaksanaan	22
Bab 4. Hasil dan Pembahasan	24
4.1. Data Hasil Penelitian.....	24
4.2. Pembahasan	46
4.2.1. Derating 30% dengan Indikasi Exhaust Cylinder Temperature High	46
4.2.2. Efisiensi dan Konsumsi Bahan Bakar Gas.....	47
4.2.3. Tindakan Maintenance saat Gangguan	53
Bab 5. Kesimpulan dan Saran	56
5.1. Kesimpulan	56
5.2. Saran	56
Daftar Pustaka.....	57
Biodata	59
Lampiran A.....	60

Daftar Gambar

Gambar 1. PLTMG Maxpower Cogindo Batam 30 MW	5
Gambar 2. Diagram Siklus Otto	7
Gambar 3. Metering Regulating Station (MRS) PLTMG MCB.....	7
Gambar 4. Skema Sistem Udara PLTMG MCB	9
Gambar 5. Sistem Pembakaran <i>lean burn</i> Rolls-Royce [8]	9
Gambar 6. Diagram Alir Metodologi Penelitian.....	16
Gambar 7. Tampilan daya <i>output</i>	19
Gambar 8. Tampilan Alarm <i>Derating 30% cyl 2B</i> pada Panel ECC #1	36
Gambar 9. Parameter cyl 2B Temperatur <i>Exhaust High</i> pada Panel ECC #1.....	37
Gambar 10. Parameter Temperatur <i>Exhaust</i> kembali Normal Setelah Dilakukan <i>Setting Fuel Rack</i>	37
Gambar 11. Tampilan Alarm <i>Derating 30% cyl 2B</i> pada Monitor Scada di CCR ...	45
Gambar 12. Tampilan Daya Keluaran saat Kondisi Derate 30% pada Panel GCC. 45	
Gambar 13. Grafik Pengaruh <i>Intake Temperature</i> terhadap <i>Exhaust Temperature</i> bulan Agustus 2024	48
Gambar 14. Grafik Pengaruh <i>Intake Temperature</i> terhadap <i>Exhaust Temperature</i> bulan September 2024	49
Gambar 15. Grafik Pengaruh <i>Intake Temperature</i> terhadap <i>Exhaust Temperature</i> bulan Oktober 2024.....	50
Gambar 16. Grafik Pengaruh Daya Keluaran terhadap Efisiensi Termal PLTMG..	51
Gambar 17. Grafik Pengaruh Daya Keluaran terhadap Heat Rate	52
Gambar 18. <i>Prechamber Valve Gas</i>	53
Gambar 19. <i>Spark Plug</i> (busi).....	54
Gambar 20. Konektor Busi	55

Daftar Tabel

Tabel 1. Set point Engine Derating 30% PLTMG MCB	10
Tabel 2. Data Perhitungan.....	18
Tabel 3. Jadwal Pelaksanaan	22
Tabel 4. Spesifikasi Mesin Gas.....	24
Tabel 5. Hasil perhitungan konsumsi bahan bakar pada bulan Agustus 2024	25
Tabel 6. Hasil perhitungan efisiensi mesin gas (siklus Otto) bulan Agustus 2024	27
Tabel 7. Hasil perhitungan konsumsi bahan bakar pada bulan September 2024	31
Tabel 8. Hasil perhitungan efisiensi mesin gas (siklus Otto) bulan September 2024	33
Tabel 9. Hasil perhitungan konsumsi bahan bakar pada bulan Oktober 2024.....	39
Tabel 10. Hasil perhitungan efisiensi mesin gas (siklus Otto) bulan Oktober 2024	42

Bab 1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Energi merupakan salah satu penopang utama dalam pertumbuhan infrastruktur dan industri, selain untuk memenuhi kebutuhan energi manusia. Seiring berjalannya waktu kebutuhan terhadap energi akan semakin meningkat, terutama di Kota Batam. Terdapat beberapa perusahaan pembangkit listrik di Kota Batam yang bahan bakarnya cukup bervariasi mulai dari batu bara, diesel, maupun gas [1].

Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) merupakan pembangkit listrik yang menggunakan peralatan atau mesin gas untuk menggerakkan generator. Mesin gas dirancang dengan prinsip kerja yang sederhana yakni mengonversikan energi termal yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar menjadi energi mekanik, kemudian dikonversikan lagi menjadi energi listrik oleh generator [2].

PT Maxpower Cogindo Batam merupakan salah satu perusahaan pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar *natural gas* dalam pengoperasiannya dan ruang lingkupnya ialah memiliki dan mengoperasikan sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas. Pada PLTMG Maxpower Cogindo Batam memiliki empat unit mesin gas *Rolls-Royce* tipe *B35:40V16AG2* berkapasitas daya terpasang $4 \times 7,76$ MW dengan letak antara mesin gas dan generatornya yang berada dalam satu poros [3].

Mesin gas *Rolls-Royce* tipe *B35:40V16AG2* merupakan mesin yang berasal dari Norwegia yang didominasi oleh suhu dingin, sehingga spesifikasi mesin gas disesuaikan mengikuti dengan pabrikan asalnya. Dalam pengoperasian unit mesin gas di PLTMG MCB, tidak terlepas dari permasalahan yang terjadi di lapangan dan dampaknya dapat menurunkan kinerja dari mesin gas. Salah satu penyebab ialah masalah temperatur.

Temperatur sangat berperan penting sebagai parameter acuan dalam pengoperasian mesin. Temperatur memiliki *set point* agar mesin dapat beroperasi secara optimal pada temperatur yang diinginkan. Namun sering ditemukan parameter temperatur melebihi dari *set point* yang telah ditentukan. Jika temperatur *exhaust* di masing-masing silinder bernilai *high* maka akan ada indikasi yang muncul, seperti terjadinya *derating* atau mesin *trip*. *Derating* adalah kondisi dimana unit tidak mampu untuk mengeluarkan daya (MW) secara maksimal saat temperatur *exhaust* bernilai tinggi dan mendekati *set point*. Indikasi seperti ini yang dapat memengaruhi kinerja dari mesin gas menjadi tidak optimal. Pada PLTMG MCB, *set point engine derating* mengikuti standar dari pabrikan *Bergen Rolls-Royce*. Terdapat 2 tipe *derating* yaitu *derating* 15% dan *derating* 30%, namun penulis berfokus pada kondisi *derating* 30% dimana hal tersebut menyebabkan beban turun secara drastis.

Untuk itu perlu dilakukan penelitian pengaruh dari temperatur *exhaust* terhadap kinerja mesin agar dapat dibuktikan secara ilmiah dengan perhitungan siklus *Otto*. Dengan demikian, dapat diperoleh perbandingan kinerja mesin gas pada saat kondisi temperatur *exhaust* tertentu. Oleh karena itu, penulis melakukan penelitian berjudul "Analisis Pengaruh Temperatur *Exhaust* terhadap Kinerja Mesin Gas *Rolls-Royce* Unit 1 PLTMG Maxpower Cogindo Batam".

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang disusun berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan antara lain:

1. Bagaimana pengaruh temperatur *exhaust* terhadap kinerja mesin gas?
2. Bagaimana perbandingan nilai efisiensi dan *heat rate* saat kondisi temperatur *exhaust* normal dan kondisi *derating* 30%?
3. Bagaimana tindakan yang dapat dilakukan untuk mencegah atau menangani saat ada indikasi tingginya temperatur pada *exhaust*?

1.3. Tujuan

Beberapa tujuan dari penelitian dan penyusunan tugas akhir ini, yaitu:

1. Menganalisis bagaimana pengaruh temperatur *exhaust* terhadap kinerja mesin gas.
2. Menganalisis perbandingan dari nilai efisiensi dan *heat rate* saat kondisi temperatur *exhaust* normal dan kondisi *derating* 30%.
3. Menelaah tindakan yang harus dilakukan untuk mencegah atau menangani saat ada indikasi tingginya temperatur pada *exhaust*.

1.4. Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini, yakni:

1. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai pengetahuan untuk perusahaan terkait permasalahan yang disebabkan oleh tingginya temperatur *exhaust*.
2. Dapat digunakan sebagai referensi bagi mahasiswa yang mempelajari mesin gas khususnya mahasiswa program studi Rekayasa Pembangkit Energi.
3. Dapat bermanfaat bagi penulis untuk menambah wawasan dan menjadi modal bagi penulis sebelum memasuki dunia kerja.

1.5. Batasan

Berikut ini beberapa batasan masalah dari penelitian ini, yaitu:

1. Data yang digunakan adalah data parameter *engine* 1 mencakup data volume bahan bakar gas, *GHV*, temperatur masuk, temperatur buang.
2. Penelitian mencakup perhitungan kinerja mesin gas yang berfokus pada siklus pembakaran (siklus *Otto*) dengan menggunakan nilai konstanta kalor pembakaran $c_v = 0.821 \text{ Kj/Kg.K}$ [4] dan rasio kompresi 13,3.
3. Penelitian berfokus pada proses pembakaran yang terjadi di ruang bakar dengan mengabaikan pengaruh sistem pendingin.
4. Perhitungan konsumsi energi bahan bakar menggunakan perhitungan bahan bakar *natural gas* di PLTMG MCB.
5. Periode pengambilan data dalam waktu tiga bulan (Agustus – Oktober) 2024.

Bab 2. Tinjauan Pustaka

2.1. Penelitian Terkait

Dalam penelitian dan penyusunan tugas akhir ini dibutuhkan beberapa referensi dari penelitian sebelumnya, buku, jurnal, dan literatur lainnya. Beberapa referensi tersebut dapat memberikan pemahaman mengenai penelitian yang akan dilakukan. Dengan demikian, dapat membantu dalam menyelesaikan penelitian yang berjudul "Pengaruh Temperatur *Exhaust* terhadap Kinerja Mesin Gas *Rolls-Royce* Unit 1 PLTMG Maxpower Cogindo Batam".

Penelitian [5] berjudul "Evaluasi *Low Exhaust* Pada Mesin Wartsila 20V34SG di PT Pjb Ubjom PLTMG Arun Lhokseumawe" yang diteliti oleh Rodiana, Rachmad Almi Putra, 2019. Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi bagaimana terjadinya kondisi *low* temperatur pada *exhaust*. Metode yang digunakan meliputi pengamatan, peninjauan, dan mengevaluasi proses pembakaran. Melakukan pencatatan parameter *exhaust* di masing-masing silinder dan melakukan penggantian *pre-chamber*. Hasil dari penelitian yaitu diketahui bahwa faktor yang memengaruhi terjadinya *low exhaust* dikarenakan partikel yang menempel pada *pre-chamber* membuat pembakaran langkah awal menjadi rendah.

Penelitian [6] berjudul "Analisis Performansi Aktual Mesin Gas *Rolls Royce* Tipe B35:40V20AG Unit Tiga di Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas Panaran Batam dan Perbandingan dengan Performansi Teoritis untuk Penilaian Kinerja Pembangkit" yang diteliti oleh Diah Novita Sari, 2019. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan perbandingan efisiensi dengan menerapkan siklus termodinamika Otto dan konsumsi bahan bakar pembangkit listrik secara teoritis dan aktual di PLTMG Panaran Batam. Berdasarkan penelitian ini efisiensi *engine* tiga pada PLTMG Panaran mengalami penurunan sebesar 12% serta adanya perbandingan konsumsi energi bahan bakar gas aktual dan teoritis.

Penelitian [7] berjudul "Identifikasi Tingginya Suhu Gas Buang Pada Mesin Diesel Penggerak Utama di KM.Nggapulu" yang diteliti oleh Galih Agimnastiar Putra, 2022. Tujuan dari penelitian adalah untuk mengetahui apa yang menyebabkan tingginya suhu gas buang pada mesin diesel sebagai penggerak utama dan mengakibatkan kerusakan pada *supporting device* serta bagaimana upaya yang dilakukan untuk mengatasi tingginya suhu gas buang. Metode yang digunakan dalam penelitian yaitu metode deskriptif kualitatif dan melakukan analisis data sehingga mendapatkan hasil penelitian yang sebenarnya terjadi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingginya suhu gas buang disebabkan oleh penerapan pekerjaan yang tidak sesuai dengan *manual book*, ditemukan adanya kerusakan pada *supporting device*, dan suhu air laut yang tinggi.

Berdasarkan tiga penelitian terdahulu, dilakukan penelitian mengenai Pengaruh Temperatur *Exhaust* terhadap Kinerja Mesin Gas Roll-Royce unit 1 PLTMG MCB yang dapat dilihat berdasarkan daya keluaran yang dihasilkan, nilai

efisiensi termal dan konsumsi energi bahan bakar *gas engine*. Setelah itu, membandingkan ketiga parameter tersebut pada kondisi *engine* normal dan saat *derating* 30%. Dari perbandingan tersebut maka mampu menganalisis kinerja mesin gas Rolls Royce unit 1 PLTMG MCB.

2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG)

Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) atau yang lebih dikenal dengan *Gas Engine Power Plant* (GEPP) merupakan tipe pembangkit listrik yang menggunakan gas sebagai bahan bakarnya. PLTMG termasuk salah satu pembangkit listrik yang banyak dioperasikan [8], dengan alasan:

1. Ketersediaan bahan bakar (*natural gas*) lebih baik dan efisien.
2. Emisi dari gas buang lebih bersih sehingga tidak menimbulkan pencemaran lingkungan.
3. Tahapan dalam pengoperasian dan perawatan dikategorikan lebih sederhana jika dibandingkan dengan jenis pembangkit lain.

Pada PLTMG MCB 30 MW yang terlampir pada gambar 1 terlihat empat unit mesin gas dan generator yang terletak seporos. Masing-masing dari unit tersebut menghasilkan energi listrik sebesar 7,764 MW. Mesin gas jenis torak (*reciprocating*) *Rolls-Royce* tipe B35:40V16AG2 memiliki 16 buah silinder yang artinya terdapat 16 ruang bakar. Generator yang dipakai yaitu Nidec tipe LSA 58 XL110/8P memiliki *speed* 750 rpm dan *power factor* 0.85. Tahapan konversi yang terjadi yaitu berasal dari energi termal dikonversi menjadi energi mekanik melalui proses pembakaran gas yang terjadi di ruang bakar, kemudian energi mekanik hasil pembakaran tersebut dikonversi menjadi energi listrik dengan berputarnya rotor dari generator.



Gambar 1. PLTMG Maxpower Cogindo Batam 30 MW

2.2.1. Prinsip Kerja PLTMG (Siklus Otto)

PLTMG merupakan jenis mesin torak (*reciprocating*) yang memiliki siklus Otto empat langkah. PLTMG 30 MW MCB menggunakan bahan bakar jenis *natural gas* untuk memicu pembakaran dalam silinder yang kemudian menggerakkan piston dan memutar poros mesin yang terhubung dengan poros generator, sehingga menghasilkan tegangan. Pada PLTMG, gas dan udara masuk bersamaan ke ruang bakar, dimana aliran gas diatur oleh *solenoid actuating gas valve*. *Pre-chamber* berisikan gas murni yang akan bercampur dengan bahan bakar di ruang bakar dan busi memberikan pengapian sehingga terjadi pembakaran antara udara dan gas yang terkompresi.

Mesin empat-tak adalah mesin yang satu siklus kerjanya diperlukan empat langkah gerakan piston atau dua putaran engkol sehingga menghasilkan usaha, empat langkah piston tersebut yaitu [7]:

- a. Langkah Hisap
- b. Langkah Kompresi
- c. Langkah Usaha
- d. Langkah Buang

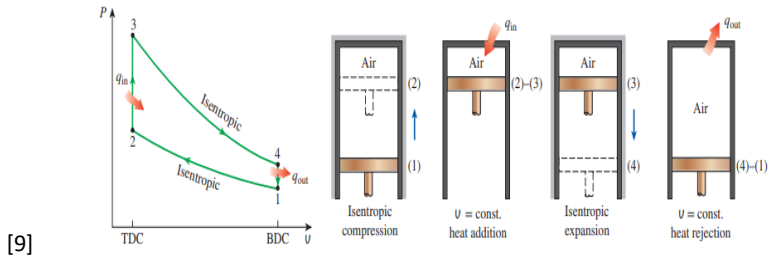
Siklus empat langkah ditemukan oleh seorang insinyur Jerman Nikolas A. Otto pada tahun 1876 dimana percampuran bahan bakar dan udara berlangsung di dalam ruang pembakaran karena tekanan dan temperatur yang tinggi.

Proses kerja motor empat langkah sebagai berikut:

- a. Langkah hisap, merupakan proses dimana campuran udara dan bahan bakar dengan kadar yang telah ditentukan dimasukkan ke dalam ruang bakar. Piston bergerak dari TMA menuju TMB, dimana posisi katup *inlet* terbuka dan katup *outlet* tertutup. Bergeraknya piston menyebabkan volume di dalam silinder membesar sehingga tekanan turun dan menyebabkan adanya perbedaan antara tekanan di luar silinder dan di dalam silinder sehingga udara bersih dari katup *inlet* dapat terhisap masuk ke dalam silinder
- b. Langkah kompresi, pada tahap ini katup *inlet* dan katup *outlet* tertutup. Piston bergerak dari TMB menuju TMA dan gerakan piston menyebabkan volume di dalam silinder mengecil dan mengkompresi campuran bahan bakar yang ada dalam silinder sehingga tekanan dan temperatur naik.
- c. Langkah usaha, pada tahap ini terjadi pembakaran. Pada akhir langkah kompresi, posisi piston sudah berada diatas dengan gas dalam ruang bakar dengan kondisi *high pressure*, kondisi katup *inlet* dan katup *outlet* tertutup. Beberapa saat sebelum TMA, injektor mengabutkan bahan bakar. Dengan terjadinya pemampatan udara menyebabkan bahan bakar terbakar dan mengakibatkan temperatur dan tekanan dalam silinder naik. Tekanan ini mendorong

piston dari TMA menuju TMB kemudian gaya tekan piston digunakan untuk memutar poros engkol, dan poros engkol digunakan untuk memutar beban.

- d. Langkah buang, pada tahap ini piston bergerak dari TMB menuju TMA dengan posisi katup *inlet* tertutup dan katup *outlet* terbuka. Gerakan piston menyebabkan piston mendorong gas buang sisa pembakaran menuju katup *outlet*.



Gambar 2. Diagram Siklus Otto

2.3. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG)

2.3.1. Sistem Bahan Bakar (*Fuel Gas System*)

Sistem bahan bakar adalah sistem yang dirancang untuk mengelola dan mengalirkan pasokan bahan bakar menuju ruang bakar pada mesin. Bahan bakar yang digunakan di PLTMG MCB adalah *natural gas* yang diperoleh dari Perusahaan Gas Negara (PGN) dan didistribusikan melalui stasiun gas terdekat. Sebelum memasuki mesin, gas akan melewati area pembersihan atau yang lebih dikenal dengan *scrubber* dimana gas akan diolah sesuai kebersihan, kadar air atau tekanan agar dapat digunakan saat disuplai ke mesin. Kemudian gas akan masuk melewati MRS (*Metering Regulating Station*) terlampir pada gambar 3. MRS berfungsi untuk mengatur tekanan dan mengukur volume dari gas yang masuk.



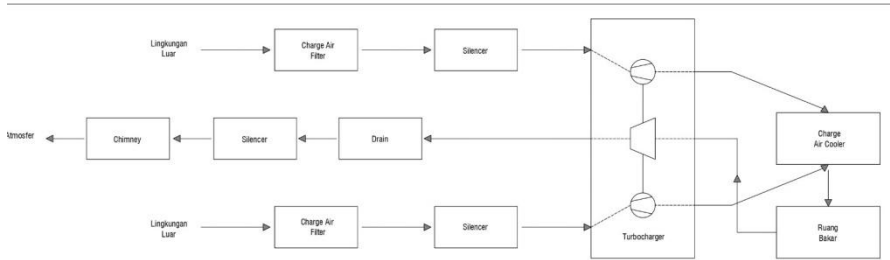
Gambar 3. Metering Regulating Station (MRS) PLTMG MCB

Gas yang diterima dari PGN memiliki tekanan awal sebesar 9 hingga 10 bar. Tekanan ini kemudian diturunkan menjadi 5 hingga 6 bar untuk dapat disuplai ke mesin. Proses penurunan tekanan dan suhu sangat penting untuk menyesuaikan kondisi optimal yang diperlukan oleh mesin agar dapat beroperasi dengan efisien. Setelah melewati *gas train*, gas dialirkan mengarah ke ruang bakar mesin dan mengarah ke *pre-chamber*. Sebelum gas mencapai ruang bakar, volume aliran gas dapat diatur dengan menggunakan *governor* atau *actuator* gas untuk memastikan performa mesin yang optimal.

2.3.2. Sistem Udara (*Air System*)

Sistem udara pada mesin gas terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu sistem udara pembakaran (*charge air*) dan sistem udara sisa pembakaran (*exhaust air*). Sistem udara pembakaran berfungsi untuk mengatur suhu, tekanan, dan jumlah udara yang diperlukan mesin selama proses pembakaran. Sebelum udara dari lingkungan luar masuk ke ruang bakar, udara tersebut disaring terlebih dahulu menggunakan *charge air filter* dan tingkat kebisingan dikurangi dengan bantuan *silencer*. Setelah melewati *charge air filter*, udara tersebut mengalir menuju *turbocharger*. *Turbocharger* memiliki dua peran penting, yaitu menghisap udara *ambient* melalui kompresor dan membuang udara sisa pembakaran dari mesin. Udara yang berasal dari *turbocharger* kemudian masuk ke *Charge Air Cooler* (CAC) yang berfungsi untuk meningkatkan suhu udara dari 27°C menjadi 55°C dengan tekanan 3 bar, sebelum akhirnya udara yang telah diatur tersebut masuk ke ruang bakar, dengan tujuan udara harus didinginkan terlebih dahulu di CAC supaya udara tersebut padat dan kualitas udara semakin bagus untuk bisa dialirkan ke *pre-chamber* dan pembakaran bisa lebih maksimal.

Di sisi lain, sistem udara sisa pembakaran bertugas untuk mengeluarkan udara yang telah digunakan dalam proses pembakaran. Udara sisa ini keluar dari ruang bakar mesin dan menuju *turbocharger*. Selanjutnya, udara tersebut harus dilakukan *drain* untuk menghilangkan kelembabannya dan *silencer* untuk mengurangi tingkat kebisingannya. Kemudian, udara sisa tersebut diarahkan ke *chimney* untuk dibuang langsung ke atmosfer.

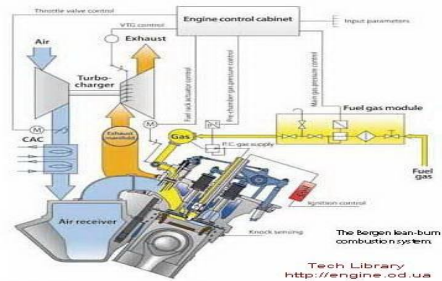


Gambar 4. Skema Sistem Udara PLTMG MCB

2.3.3. Sistem Pembakaran (*Combustion System*)

Sistem pembakaran pada mesin gas *Rolls-Royce* di PLTMG MCB pada prinsipnya sama dengan motor bakar torak empat langkah, yaitu langkah hisap, kompresi, kerja, dan langkah buang. Sebelum masuk ke ruang bakar, udara dari *ambient* akan melalui dua tahap, pada tahap pertama udara di filter terlebih dahulu agar kotoran dan debu dari udara dapat terpisahkan, selanjutnya udara dialirkan melalui CAC (*Charge Air Cooler*) untuk didinginkan supaya udara lebih padat sehingga proses pembakaran yang terjadi lebih optimal. Setelah temperatur naik menjadi sekitar 55°C dan tekanan nya bernilai 3 bar, maka udara akan masuk ke ruang bakar. Pada proses pembakaran diperlukan alat yang disebut dengan *pre-chamber* yang berfungsi menyuplai gas tambahan. Pada *pre-chamber* hanya mengandung gas murni yang didapat dari *gas supply valve*.

Pembakaran yang terjadi dalam ruang bakar merupakan campuran dari bahan bakar dan udara (*mixture*). *Pre-chamber* akan menyuplai gas tambahan dalam proses pembakaran agar lebih maksimal dengan bantuan *spark plug* sebagai pemantik yang akan dikompres di dalam silinder untuk membuatnya lebih mudah terbakar. Ekspansi dari *mixture* yang terbakar akan menggerakkan piston dan menghasilkan tenaga.



Gambar 5. Sistem Pembakaran lean burn Rolls-Royce [8]

2.4. Exhaust Cylinder Temperature Derating

PLTMG MCB berperan sebagai *peaker* dimana unit mesin gas memiliki respon yang cepat jika terjadi fluktuasi pada sistem [10], sehingga kinerja mesin gas perlu diperhatikan mengingat fungsinya yang cukup krusial. Salah satu parameter operasi yang perlu diperhatikan dalam pengoperasian mesin gas adalah temperatur gas buang (*exhaust*), dimana parameter temperatur *exhaust* digunakan sebagai pengontrol temperatur dan proteksi temperatur *trip*. Mesin PLTMG MCB merupakan mesin dengan jenis v-engine, dimana terdapat 16 silinder yang terbagi kedalam dua sisi *engine* yaitu 8 silinder sisi *bank A* dan 8 silinder sisi *bank B*.

Exhaust temperature cylinder itu sendiri merupakan parameter temperatur gas buang yang dihasilkan oleh pembakaran pada ruang bakar utama. Saat mesin beroperasi, *exhaust temperature* merupakan parameter yang harus di pantau untuk memastikan nilai temperatur *exhaust* tersebut tidak melebihi atau lebih kecil dari nilai *set point*. Apabila nilai *exhaust temperature cylinder head* melebihi atau lebih kecil dari *set point* maka dapat menyebabkan mesin *derating*. Tabel 1 merupakan *set point exhaust temperature cylinder* kondisi *derating 30%*.

Tabel 1. Set point Engine Derating 30% PLTMG MCB

SET POINT ENGINE LIST ALARM		
No	Engine Derate 30%	Set Point
1	Charge air temp	60°C
2	Generator winding #1 temp high	135°C
3	Generator winding #2 temp high	135°C
4	Generator winding #3 temp high	135°C
5	Exhaust temp cyl high	545°C
6	Exhaust temp before TC A	600°C
7	Exhaust temp before TC B	600°C
8	Lube oil temp high	69°C

Yang menjadi penyebab naiknya temperatur *exhaust*, yaitu *suction air temperature* dan *pre-chamber*. *Suction air temperature* dapat menyebabkan temperatur *exhaust* menjadi tinggi. *Suction air* merupakan katup masuknya udara yang berasal dari *ambient* dan dialirkan ke mesin, jika udara dari *ambient* masuk dengan suhu yang panas, maka udara dalam ruang bakar juga akan panas dan

kinerja CAC akan diharapkan untuk lebih maksimal dalam menstabilkan suhu udara panas tersebut sesuai dengan kebutuhan *engine*.

Pre-chamber merupakan alat yang berisikan gas murni dimana memiliki fungsi untuk menyuplai gas tambahan pada proses pembakaran di ruang bakar. Di dalam *pre-chamber* terdapat *ball valve* yang merupakan katup pengatur aliran gas dan dapat berputar di dalam sebuah lubang (*bore*) [11]. Jika pada proses pembakaran tersebut bahan bakar yang disuplai terlalu banyak maka dapat menyebabkan tingginya temperatur *exhaust* ditandai dengan kondisi *ball valve* pada *pre-chamber* terbuka di saat piston berada di TMA untuk mengkompresi campuran bahan bakar dan akan mengakibatkan gas mengalir masuk ke ruang bakar.

2.4.1. Derating

Derating adalah gangguan yang terjadi pada unit pembangkit akibat ketidakmampuan unit tersebut untuk mengeluarkan daya dari DMN yang seharusnya, yang bila bebannya dinaikkan maka pembangkit akan *trip*. Jika suhu *exhaust* pada silinder tinggi bahkan melebihi dari *set point manufacture*, maka *derating* dapat terjadi dan menyebabkan turunnya beban sehingga unit pembangkit tidak dapat menghasilkan daya secara maksimal [12].

Jika temperatur *exhaust* tinggi dan menyebabkan *derating*, perlu dilakukan pengecekan terkait temperatur udara masuk (*suction air temperature*) dan *pre-chamber*, dimana temperatur *exhaust* sangat berkaitan erat dengan proses pembakaran yang terjadi di ruang bakar. Pada PLTMG MCB, terdapat *derating 30%* dan jika hal ini terjadi maka beban akan turun secara otomatis menjadi 70%. Hal ini menunjukkan bagaimana kinerja mesin gas jika terjadi *derating 30%* pada waktu tertentu.

2.4.2. Cylinder Deviation

Salah satu parameter yang dapat menyebabkan mesin *trip* adalah *exhaust temperature cylinder deviation*. *Exhaust temperature cylinder deviation* adalah selisih antara nilai *exhaust* temperatur pada salah satu silinder dengan nilai rata-rata 8 silinder pada sisi yang sama (*bank A* atau *bank B*). Deviasi terjadi karena *misfire*. Deviasi umumnya terjadi ditandai dengan adanya kesalahan pada busi, seperti melekatnya kotoran atau partikel yang dapat menyebabkan tidak ada tegangan dan pembakaran yang terjadi tidak sempurna bahkan gagal pembakaran.

Pada PLTMG MCB, apabila nilai dari *exhaust temperature cylinder deviation* mencapai angka 70°C, maka mesin dapat *trip* jika tetap diberi beban. Maka saat terjadi deviasi, hal yang dilakukan adalah menahan *load* dan menunggu deviasinya turun.

2.5. Kinerja Mesin Gas

Karakter unjuk kerja suatu mesin torak dapat dilihat pada beberapa parameter diantaranya konsumsi bahan bakar, daya keluaran dan perbandingan antara bahan bakar-udara. Konsumsi bahan bakar atau *heat rate* memiliki arti seberapa besar *input* energi panas dari bahan bakar yang dibutuhkan suatu pembangkit dalam menghasilkan listrik sebesar 1 *kWh*. *Heat rate* menjadi salah satu parameter yang diperhatikan dalam melihat kinerja dari suatu pembangkit, dalam hal ini pada kinerja mesin gas, karena semakin tinggi nilai *heat rate* maka semakin tinggi tingkat keborosan pemakaian bahan bakar. Pada PLTMG MCB memakai metode perhitungan *direct method* [13] dimana pengujian menggunakan perbandingan antara *input* dan *output* yaitu konsumsi energi bahan bakar dibandingkan langsung dengan daya *output*. Selain *heat rate*, daya keluaran atau yang lebih dikenal dengan daya *output* juga menjadi salah satu parameter penting dalam melihat unjuk kerja suatu unit terutama pada kondisi tertentu yang memungkinkan nilai dari *output* mencapai maksimal atau tidak, seperti pada kondisi normal jika semakin tinggi tegangan dan arus yang mengalir maka semakin besar daya yang dihasilkan oleh pembangkit, dan saat kondisi *derating* yang terjadi adalah hal sebaliknya.

2.5.1. Formula Perhitungan Kinerja Mesin Gas

Untuk menganalisis data yang telah diperoleh maka sebelumnya dilakukan pengolahan data dengan menghitung beberapa parameter seperti:

1. Konsumsi Energi Bahan Bakar Gas

Menghitung energi bahan bakar gas yang dikonsumsi oleh *engine* 1 di PLTMG MCB, terlebih dahulu nilai volume dikonversikan menjadi satuan *feet*³ (ft³) dengan setiap 1 m³ bernilai 35,315 ft³. Berikut ini persamaan yang digunakan:

$$\text{Konsumsi energi BBG} = \frac{V \times \text{GHV}}{10^6} \quad (2.5.1)$$

Keterangan:

Konsumsi energi BBG = MMBTU

V = Volume bahan bakar gas (ft³)

GHV = *Gross Heating Value* atau nilai kalor atas (btu/ft³)

2. Heat Rate

Heat rate merupakan jumlah energi bahan bakar yang dibutuhkan untuk membangkitkan energi listrik sebesar 1 kWh. Berikut ini persamaan dalam menghitung *heat rate* mesin gas pada PLTMG Maxpower Cogindo Batam menggunakan *direct method*:

$$\text{HR} = \frac{\text{konsumsi energi BBG} \times 10^6}{\text{kwh output}} \quad (2.5.2)$$

Keterangan:

HR = *Heat Rate* (BTU/kWh)

MMBTU = 10⁶ BTU

3. Efisiensi Mesin Gas

Mengetahui nilai dari parameter ini maka dapat menganalisis kinerja mesin gas. Adapun persamaan yang digunakan untuk mengetahui nilai efisiensi mesin gas, yaitu mengacu pada siklus Otto yang berfokus pada proses pembakaran. Analisa termodinamika dari siklus Otto ialah [14]:

Proses (1-2) merupakan proses adiabatik, dimana tidak ada kalor yang masuk atau keluar. Kompresi isentropic udara saat piston bergerak dari TMB menuju TMA.

Menghitung volume spesifik keadaan 2:

$$\frac{V_{r2}}{V_{r1}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{r} \quad (2.5.3)$$

Keterangan:

V_{r2} = Volume spesifik keadaan 2

V_{r1} = Volume spesifik keadaan 1

r = rasio kompresi

selanjutnya menghitung temperatur pada keadaan 2 dengan menggunakan metode interpolasi mengacu pada tabel properti termodinamika, dengan rumus

$$T_2 = T_x + \left(\frac{V_{r2} - V_{rx}}{V_{ry} - V_{rx}} \right) (T_y - T_x) \quad (2.5.4)$$

Keterangan:

T_x = temperature nilai atas (K)

T_y = temperature nilai bawah (K)

V_{rx} = volume spesifik nilai atas

V_{ry} = volume spesifik nilai bawah

Proses (2-3) adalah proses perpindahan panas volume konstan ke udara dari sumber eksternal saat piston berada di TMA. Proses ini dimaksudkan untuk mewakili penyalan campuran bahan bakar-udara.

Untuk menghitung laju energi yang masuk ke dalam sistem (q_{in}) dapat dilakukan dengan rumus berikut:

$$Q_{in} = m_{air} \times c_v \times (T_3 - T_2) \quad (2.5.5)$$

Keterangan:

m_{air} = laju aliran massa udara (kg/s)

C_v = panas jenis pada volume konstan (Kj.KG.k)

T_3 = temperatur pada keadaan 3 (K)

T_2 = temperatur pada keadaan 2 (K)

Sebelum mendapatkan nilai laju energi yang masuk ke sistem, terlebih dahulu mencari nilai temperatur ruang bakar atau temperatur pada keadaan 3 dengan rumus berikut:

$$T_3 = T_2 + \frac{(m \times GHV)_{fuel}}{(m \times C_v)_{air}} \quad (2.5.6)$$

Keterangan:

T_3 = temperature pada keadaan 3 (K)

T_2 = temperature pada keadaan 2 (K)

m_{fuel} = laju aliran massa bahan bakar (kg/s)

GHV = nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)

m_{air} = laju aliran massa udara (kg/s)

C_v = panas jenis pada volume konstan (kJ/kg.K)

Proses (3-4) merupakan langkah ekspansi isentropik dimana berlangsung proses adiabatik sehingga pada proses ini tidak ada kalor yang masuk ataupun keluar. Untuk mendapatkan temperatur gas buang atau temperatur pada keadaan 4 dengan rumus berikut:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{r}{1} \right)^{\gamma-1} \quad (2.5.7)$$

Keterangan:

R = rasio kompresi

γ = konstanta laplace (1,307)

T_3 = temperature pada keadaan 3 (K)

T_4 = temperature pada keadaan 4 (K)

Proses (4-1) merupakan proses penyelesaian siklus dengan proses volume konstan dimana panas dibuang dari udara saat piston berada di TMB. Proses ini menyatakan besarnya laju energi yang keluar. Untuk mendapatkan besarnya laju energi yang keluar dengan rumus:

$$Q_{out} = m_{air} \times c_v \times (T_4 - T_1) \quad (2.5.8)$$

Keterangan:

m_{air} = laju aliran massa udara (kg/s)

C_v = panas jenis pada volume konstan (Kj.KG.k)

T_4 = temperatur pada keadaan 4 (K)

T_1 = temperatur pada keadaan 1 (K)

Setelah mendapatkan nilai laju energi yang keluar (Q_{out}) kemudian mencari nilai kerja bersih dengan rumus:

$$W_{net} = (Q_{in} - Q_{out}) \quad (2.5.9)$$

Keterangan:

W_{net} = laju kerja bersih selama siklus berlangsung (kW)

Q_{out} = kalor yang dilepas

Q_{in} = kalor masuk

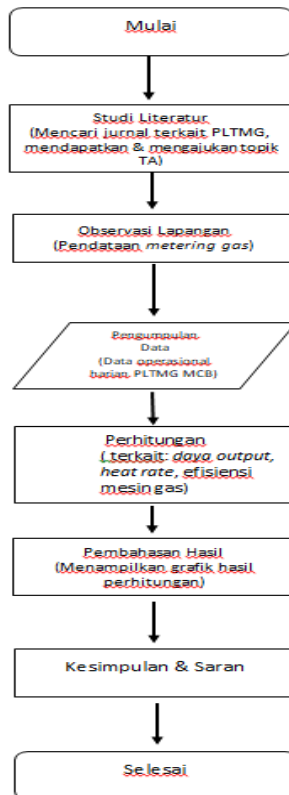
Sehingga efisiensi siklus ialah:

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (2.5.10)$$

Bab 3. Metodologi Penelitian

3.1. Perancangan

Penelitian yang dilakukan adalah jenis penelitian kuantitatif. Aspek dalam penelitian kuantitatif adalah pengumpulan data primer dan sekunder dari PLTMG Maxpower Cogindo Batam yang kemudian dilakukan analisis. Pada tahap penyusunan penelitian ini, memerlukan susunan alur kerja untuk menjelaskan tahapan penelitian. Adapun beberapa tahapan yang akan dilakukan dalam penelitian ini berdasarkan gambar 6 yaitu:



Gambar 6. Diagram Alir Metodologi Penelitian

3.1.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari dan mengumpulkan bahan penelitian dan teori yang relevan terkait penelitian yang akan dilaksanakan. Pencarian tersebut dari beberapa sumber referensi seperti literatur, buku, dan situs internet. Tahapan ini memberikan pemahaman mengenai penelitian yang akan dikerjakan.

3.1.2. Observasi Lapangan

Tahapan ini dilaksanakan dengan pengamatan terhadap objek yang akan diteliti di PLTMG Maxpower Cogindo Batam. Dilakukan juga tanya jawab dengan staf operasional PLTMG MCB. Tujuan tahapan ini adalah untuk mendapatkan data dan informasi yang diperlukan.

3.1.3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang dilakukan akan digunakan sebagai bahan dalam perhitungan kinerja dari mesin dan menganalisa. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data primer dan sekunder. Berikut ini penjelasan data:

1. Data *logsheet* parameter bulan Agustus hingga Oktober 2024 di PLTMG Maxpower Cogindo Batam. Parameter yang dibutuhkan adalah temperatur udara masuk (T_1), temperatur gas buang (T_4), massa aliran bahan bakar gas (\dot{m}_f), laju aliran massa udara (\dot{m}_a).
2. Data komposisi bahan bakar gas yang dipakai oleh mesin pada bulan Agustus hingga Oktober 2024 di PLTMG Maxpower Cogindo Batam. Parameter yang akan diperlukan ialah *Gross Heating Value* (GHV) atau nilai kalor atas gas.
3. Data konsumsi bahan bakar gas dan kWh ekspor dari bulan Agustus hingga Oktober 2024 di PLTMG Maxpower Cogindo Batam. Parameter nya berupa volume gas yang dikonsumsi dan kWh bruto pada *engine 1*.
4. Untuk data sekunder adalah data yang diperoleh dari literatur dan situs internet, seperti nilai ketetapan dari konstanta kalor pembakaran $c_v = 0.821 \text{ KJ/Kg.K}$.

Tabel 2. Data Perhitungan

Parameter	Nilai Ketetapan	Sumber
Massa Aliran Udara (Kg/s)	70,23 Kg/s	
Massa Aliran Bahan Bakar (Kg/s)	Agustus: 1,16 September: 1,52 Oktober: 1,51	
GHV (kJ/Kg)	PLN (data per bulan)	
Temperatur Inlet (°C)		Data Logsheets harian
Temperatur Exhaust (°C)		Data Logsheets harian
Volume Bahan Bakar Gas (m ³)		Data Logsheets harian
kWh Bruto #E1 (kWh)		Data Logsheets harian
Nilai Konstanta kalor Pembakaran (kJ/Kg.K)	0.821 KJ/Kg.K.	

3.1.4. Perhitungan Kinerja Mesin Gas

Untuk menganalisis data yang telah diperoleh maka sebelumnya dilakukan pengolahan data dengan menghitung beberapa parameter dengan mengacu pada data tanggal 25 Agustus 2024 yang akan ditampilkan seperti berikut:

1. Output Power

Daya keluaran adalah besar daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit. Daya mencerminkan kemampuan sistem untuk

mengubah suatu energi dari sumber tertentu menjadi energi listrik yang dapat digunakan. Daya listrik merujuk pada jumlah energi yang dihasilkan, umumnya diukur dalam satuan *megawatt* (MW). Dalam perhitungan daya *output* pada PLTMG MCB, dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar:

$$P = V \times I \times pf \quad (3.1)$$

$$P = 290 \text{ A} \times 6460 \text{ V} \times 0,99$$

$$P = 1.854.666 \text{ MW} \quad [\text{dapat dikalikan 3}]$$

Akan didapatkan hasilnya $P = 5.563.998 \text{ MW}$

Keterangan:

P = daya (MW)

V = tegangan (V)

I = arus (A)

Pf = *power factor* yang diatur



Gambar 7. Tampilan daya output

Satuan daya yang umum dipakai di pembangkit adalah *MegaWatt* (MW). Melalui perhitungan daya *output* dengan memakai rumus dasar dapat diketahui besarnya daya yang dihasilkan pembangkit dalam kondisi tertentu [15]. Terlihat pada rumus bahwa daya tergantung pada dua faktor utama yaitu tegangan dan arus.

2. Konsumsi Energi Bahan Bakar Gas

Menghitung energi bahan bakar gas yang dikonsumsi oleh *engine* 1 di PLTMG MCB, terlebih dahulu nilai volume dikonversikan menjadi satuan *feet*³ (ft³) dengan setiap 1 m³ bernilai 35,315 ft³. Berikut ini persamaan yang digunakan:

$$\text{Konsumsi energi BBG} = \frac{V \times GHV}{10^6} \quad (3.2)$$

$$= \frac{25.688,98 \times 1.071,069}{10^6}$$

$$= 971,68 \text{ MMBTU}$$

3. Heat Rate

Heat rate merupakan jumlah energi bahan bakar yang dibutuhkan untuk membangkitkan energi listrik sebesar 1 kWh. Berikut ini persamaan dalam menghitung *heat rate* mesin gas pada PLTMG Maxpower Cogindo Batam menggunakan *direct method*:

$$HR = \frac{\text{konsumsi energi BBG} \times 10^6}{\text{kwh output}} \quad (3.3)$$

$$HR = \frac{97,68 \times 10^6}{113.921}$$

$$HR = 8529,39 \text{ BTU/kWh}$$

4. Efisiensi Mesin Gas

Mengetahui nilai dari parameter ini maka dapat menganalisis kinerja mesin gas. Adapun persamaan yang digunakan untuk mengetahui nilai efisiensi mesin gas, yaitu mengacu pada siklus *Otto* yang berfokus pada proses pembakaran. Analisa termodinamika dari siklus Otto ialah:

$$T_1 = 299 \text{ K}$$

$$V_{r1} = \frac{T_1 - T_{bawah}}{T_{atas} - T_{bawah}} \times (V_{r_{atas}} - V_{r_{bawah}}) + V_{r_{bawah}}$$

$$V_{r1} = \frac{299 - 298}{300 - 298} \times (621,2 - 631,9) + 631,9$$

$$V_{r1} = \frac{1}{2} \times (-10,7) + 631,9$$

$$V_{r1} = 626,55$$

Menghitung volume spesifik keadaan 2:

$$\frac{V_{r2}}{V_{r1}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{r} \quad (3.4)$$

$$V_{r2} = \frac{V_{r1}}{r}$$

$$V_{r2} = \frac{626,55}{13,3}$$

$$V_{r2} = 47,11$$

Selanjutnya menghitung temperatur pada keadaan 2 dengan menggunakan metode interpolasi mengacu pada tabel properti termodinamika, dengan rumus

$$T_2 = T_x + \left(\frac{V_{r2} - V_{rx}}{V_{ry} - V_{rx}} \right) (T_y - T_x) \quad (3.5)$$

$$T_2 = 800 + \left(\frac{47,11 - 48,08}{44,84 - 48,08} \right) (820 - 800)$$

$$T_2 = 805,99 \text{ K}$$

Sebelum mendapatkan nilai laju energi yang masuk ke sistem, terlebih dahulu mencari nilai temperatur ruang bakar atau temperature pada keadaan 3 dengan rumus berikut:

$$T_3 = T_2 + \frac{(m \times GHV)_{fuel}}{(m \times C_p)_{air}} \quad (3.6)$$

$$T_3 = 805,99 + \frac{(1,16 \times 45.269,621)_{fuel}}{(70,23 \times 0,821)_{air}}$$

$$T_3 = 1.717,32 \text{ K}$$

Untuk menghitung laju energi yang masuk ke dalam sistem (q_{in}) dapat dilakukan dengan rumus berikut:

$$Q_{in} = m_{air} \times cv \times (T_3 - T_2) \quad (3.7)$$

$$Q_{in} = 70,23 \times 0,821 \times (1.717,32 - 805,99)$$

$$Q_{in} = 52.546,083 \text{ kW}$$

Untuk mendapatkan besarnya laju energi yang keluar dengan rumus:

$$Q_{out} = m_{air} \times cv \times (T_4 - T_1) \quad (3.8)$$

$$Q_{out} = 70,23 \times 0,821 \times (816 - 299)$$

$$Q_{out} = 29.797,12 \text{ kW}$$

Setelah mendapatkan nilai laju energi yang keluar (Q_{out}) kemudian mencari nilai kerja bersih dengan rumus:

$$W_{net} = (Q_{in} - Q_{out}) \quad (3.9)$$

$$W_{net} = (52.546,083 - 29.797,12)$$

$$W_{net} = 22.748,96 \text{ kW}$$

Sehingga efisiensi siklus ialah:

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (3.10)$$

$$\eta = \frac{22.748,96}{52.546,083} \times 100\%$$

$$\eta = 43,3\%$$

3.2. Jadwal Pelaksanaan

Tabel 3. Jadwal Pelaksanaan

Bulan	A gustus		Septemb er					Okto ber				Nove mber				Dese mber				
	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1. Identifikasi Masalah (mengumpulkan topik dan mengajukan judul)																				
2. Studi Literatur (mendapatkan jurnal yang relevan)																				
3. Observasi Lapangan (pendataan <i>metering gas</i>)																				
4. Membuat Bab I																				
5. Membuat Bab II																				
6. Membuat Bab III																				
7. Seminar Proposal																				
8. Pengambilan Data (Data operasional harian PLTMG MCB)																				
9. Pengolahan Data (terkait: <i>daya output, heat rate, efisiensi mesin gas</i>)																				
10. Melakukan Analisis Data																				

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Data Hasil Penelitian

Dari penelitian yang telah dilakukan terhadap kinerja mesin gas di PLTMG Maxpower Cogindo Batam maka diketahui nilai konsumsi bahan bakar dan efisiensi mesin gas. Nilai-nilai tersebut diperoleh dengan melakukan metode perhitungan pada data harian operasional PLTMG MCB dengan menerapkan perhitungan siklus energi *Otto*. Data harian tersebut merupakan data operasional pada tanggal 1 Agustus 2024 sampai dengan 31 Oktober 2024. Berikut ini data-data yang diperlukan dalam penelitian ini meliputi:

- Volume bahan bakar gas (V)
- *Gross Heating Value* (GHV) atau nilai kalor atas gas
- kWh produksi/ekspor
- Laju aliran massa bahan bakar
- Laju aliran massa udara
- Temperatur masuk
- Temperatur gas buang

Spesifikasi dari objek penelitian yang dilakukan antara lain:

Tabel 4. Spesifikasi Mesin Gas

<i>Merk</i>	Rolls-Royce Bergen Engines
<i>Tipe</i>	B35:40V16AG2
<i>Bahan bakar</i>	<i>Natural gas</i>
<i>Jumlah silinder</i>	16
<i>Rasio kompresi</i>	1:13,3
<i>Pressure</i>	20,6 bar
<i>Speed</i>	750 RPM
<i>Bore</i>	350 mm
<i>Stroke</i>	400 mm
<i>Built year</i>	2020

Berikut merupakan data gas dan kWh produksi dari mesin gas unit 1 di PLTMG MCB pada tanggal 1 Agustus 2024 sampai dengan 31 Oktober 2024, kemudian dilakukan pengolahan data untuk mendapat nilai konsumsi bahan bakar dan efisiensi mesin gas.

Tabel 5. Hasil perhitungan konsumsi bahan bakar pada bulan Agustus 2024

AGUSTUS	GHV	V gas	Energi BBG	kWh Output	HR
2024	(BTU/ft3)	(m3)	(MMBTU)	(kWh)	(BTU/kWh)
01/08/2024	1076,456	38232,71	1453,42	173.405	8381,66
02/08/2024	1075,367	39556,03	1502,20	178.322	8424,09
03/08/2024	1076,727	39279,40	1493,58	179.205	8334,50
04/08/2024	1075,227	39055,33	1482,99	178.768	8295,63
05/08/2024	1077,449	39903,87	1518,35	180.663	8404,30
06/08/2024	1072,986	39882,18	1511,24	181.969	8304,90
07/08/2024	1066,677	39944,12	1504,68	181.240	8302,16
08/08/2024	1062,707	40773,01	1530,19	182.261	8395,60
09/08/2024	1070,461	39452,48	1491,44	179.801	8294,93
10/08/2024	1069,002	38492,82	1453,17	171.184	8488,95
11/08/2024	1070,465	38473,79	1454,44	173.236	8395,72
12/08/2024	1071,000	39928,57	1510,19	181.883	8303,11
13/08/2024	1066,901	39939,96	1504,84	180.890	8319,11
14/08/2024	1074,809	40491,67	1536,94	182.294	8431,09
15/08/2024	1077,423	40195,79	1529,42	183.035	8355,88
16/08/2024	1079,180	39881,75	1519,94	182.747	8317,22
STANDBY					

19/08/2024	1074,199	39594,01	1502,01	180.619	8315,91
20/08/2024	1071,703	39242,20	1485,21	176.759	8402,44
21/08/2024	1072,697	38953,88	1475,66	175.929	8387,82
22/08/2024	1071,283	39901,08	1509,55	181.906	8298,52
23/08/2024	1072,744	39780,94	1507,06	179.493	8396,22
24/08/2024	1071,121	38380,70	1451,81	174.938	8299,01
25/08/2024	1071,069	25688,98	971,68	113.921	8529,39
26/08/2024	1075,103	38665,44	1468,02	175.839	8348,65
27/08/2024	1073,155	39583,02	1500,14	179.342	8364,69
28/08/2024	1072,968	39499,81	1496,72	179.131	8355,44
29/08/2024	1072,294	40007,18	1514,99	181.923	8327,66
30/08/2024	1072,229	39432,08	1493,13	178.926	8344,94
STANDBY					
Rata-rata	1072,621	39007,60	1477,61	176.772	8361,41

Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai *heat rate* terendah terjadi pada tanggal 09 Agustus 2024 yakni sebesar 8.294,93 BTU/kWh, sedangkan nilai tertingginya pada 25 Agustus 2024 dengan besar *heat rate* 8.529,39 BTU/kWh. Adapun rata-rata *heat rate* pada bulan Agustus 2024 adalah sebesar 8.361,41 BTU/kWh. Nilai *heat rate* didapatkan dengan menggunakan persamaan (3.3), yaitu konsumsi energi bahan bakar dibandingkan dengan kWh yang diproduksi. Satuannya dikonversikan dari MMBTU menjadi BTU dengan mengalikan hasilnya dengan 10^6 .

Tabel 6. Hasil perhitungan efisiensi mesin gas (siklus Otto) bulan Agustus 2024

Agustus	GHV	Nilai Ketetapan		Vr1	Vr2	T2	T3	T1	Qin	T4	Qout	Wnet	Eff
2024	kJ/kg					K	K	K	kW	K	kW	kW	%
01/08/2024	45497,307			611,1	45,95	813,15	1729,06	302	52810,367	793	28322,02	24488,35	46,4%
02/08/2024	45451,279	mf	1,16	611,12	45,95	813,15	1728,13	302	52756,9412	804	28930,32	23826,62	45,2%
03/08/2024	45508,761			596	44,81	820,20	1736,34	305	52823,6621	805	28839,02	23984,64	45,4%
04/08/2024	45445,362	ma	70,23	621,2	46,71	808,46	1723,32	300	52750,0729	804	29005,27	23744,80	45,0%
05/08/2024	45539,256			596	44,81	820,20	1736,96	305	52859,0585	806	28890,92	23968,14	45,3%
06/08/2024	45350,644	Cv	0,821	611,1	45,95	813,15	1726,11	302	52640,1306	807	29068,70	23571,43	44,8%
07/08/2024	45083,985			616,2	46,33	810,80	1718,39	301	52330,6094	807	29193,63	23136,98	44,2%
08/08/2024	44916,173			606,1	45,57	815,49	1719,71	303	52135,8237	810	29258,97	22876,85	43,9%
09/08/2024	45243,923			606,1	45,57	815,49	1726,30	303	52516,2554	808	29105,22	23411,04	44,6%
10/08/2024	45182,257			621,2	46,71	808,46	1718,03	300	52444,6776	801	28906,29	23538,38	44,9%

Agustus	GHV		Vr1	Vr2	T2	T3	T1	Qin	T4	Qout	Wnet	Eff
2024	kJ/kg		K	K	K	K	kW	K	kW	kW	%	
11/08/2024	45244,092		621,2	46,71	808,46	1719,27	300	52516,4516	805	29109,06	23407,39	44,6%
12/08/2024	45266,704		611,1	45,95	813,15	1724,42	302	52542,6985	805	29014,88	23527,81	44,8%
13/08/2024	45093,457		606,1	45,57	815,49	1723,28	303	52341,6037	809	29184,98	23156,63	44,2%
14/08/2024	45427,695		616,2	46,33	810,80	1725,31	301	52729,566	807	29170,56	23559,00	44,7%
15/08/2024	45538,178		616,2	46,33	810,80	1727,54	301	52857,8075	807	29165,76	23692,05	44,8%
16/08/2024	45612,439		621,2	46,71	808,46	1726,69	300	52944	807	29209,00	23735,00	44,8%
17/08/2024	45650,225	STANDBY										
18/08/2024	45492,446	STANDBY										
19/08/2024	45401,913		616,2	46,33	810,80	1724,79	301	52699,6397	804	29031,22	23668,42	44,9%
20/08/2024	45296,417		621,2	46,71	808,46	1720,32	300	52577,1873	802	28966,84	23610,35	44,9%

Agustus	GHV		Vr1	Vr2	T2	T3	T1	Qin	T4	Qout	Wnet	Eff
2024	kJ/kg				K	K	K	kW	K	kW	kW	%
21/08/2024	45338,430		616,2	46,33	810,80	1723,52	301	52625,9524	802	28883,23	23742,72	45,1%
22/08/2024	45278,666	616,2	46,33	810,80	1722,31	301	52556,5823	805	29040,83	23515,75	44,7%	
23/08/2024	45340,416	611,1	45,95	813,15	1725,90	302	52628,2582	805	28975,48	23652,77	44,9%	
24/08/2024	45271,819	637,23	47,91	801,05	1712,42	297	52548,6347	806	29327,20	23221,43	44,2%	
25/08/2024	45269,621	626,6	47,11	805,99	1717,32	299	52546,0836	816	29797,12	22748,96	43,3%	
26/08/2024	45440,121	616,2	46,33	810,80	1725,56	301	52743,9895	816	29724,09	23019,90	43,6%	
27/08/2024	45357,787	621,2	46,71	808,46	1721,56	300	52648,4216	813	29562,64	23085,78	43,8%	
28/08/2024	45349,884	616,2	46,33	810,80	1723,75	301	52639,2475	810	29372,37	23266,88	44,2%	
29/08/2024	45321,396	611,1	45,95	813,15	1725,52	302	52606,1814	807	29131,16	23475,02	44,6%	
30/08/2024	45318,649	611,1	45,95	813,15	1725,46	302	52602,9926	807	29111,94	23491,05	44,7%	

31/08/2024	45628,627		STANDBY
Rata-rata			44,7%

Berdasarkan tabel 6 dapat dilihat bahwa selisih antara kalor *input* dan *output* yang dibandingkan akan menghasilkan nilai efisiensi mesin gas. Menghitung nilai efisiensi menggunakan persamaan (3.4). Sebelum mendapatkan nilai yang dibutuhkan dalam persamaan (3.4), terlebih dahulu memakai persamaan (3.6) untuk mencari nilai energi *input* dan persamaan (3.9) dalam menentukan nilai energi *output*. Pada tabel 5 efisiensi mesin gas terendah terjadi tanggal 25 Agustus 2024 dengan nilai 43,3% dan efisiensi tertinggi pada Agustus 2024 sebesar 45,4%. Adapun rata-rata efisiensi mesin gas pada bulan Agustus 2024 adalah 40,3%.

Tabel 7. Hasil perhitungan konsumsi bahan bakar pada bulan September 2024

SEPTEMBER	GHV	V gas	Energi BBG	kWh Output	HR
2024	(BTU/ft ³)	(m ³)	(MMBTU)	(kWh)	(BTU/kWh)
01/09/2024	1079,765	38989,53	1486,74	175.673	8463,11
02/09/2024	1076,498	38667,90	1470,02	176.117	8346,83
03/09/2024	1074,525	39550,78	1500,83	179.254	8372,64
04/09/2024	1074,061	39613,31	1502,55	176.545	8510,89
05/09/2024	1072,340	39310,04	1488,66	180.642	8240,94
06/09/2024	1071,551	39466,92	1493,50	177.683	8405,44
07/09/2024	1074,609	39131,01	1485,01	177.712	8356,30
08/09/2024	1075,894	37895,28	1439,84	170.951	8422,53
09/09/2024	1077,496	36906,02	1404,34	165.692	8475,59
10/09/2024	1079,386	38886,87	1482,31	179.002	8280,96
11/09/2024	1080,137	39445,32	1504,64	179.146	8398,96
12/09/2024	1075,258	39473,84	1498,93	178.620	8391,72
13/09/2024	1076,261	39739,67	1510,43	180.612	8362,85
14/09/2024	1080,649	33185,48	1266,46	150.484	8415,90
15/09/2024	1078,887	38989,41	1485,53	177.537	8367,43
16/09/2024	1078,887	39172,55	1492,51	179.734	8304,00
STANDBY					

18/09/2024	1081,513	35562,47	1358,26	160.692	8452,59
19/09/2024	1082,728	37491,30	1433,54	171.914	8338,67
20/09/2024	1079,960	38718,35	1476,67	174.817	8446,98
21/09/2024	1079,464	38989,44	1486,33	176.857	8404,13
STANDBY					
23/09/2024	1075,527	38287,50	1454,24	173.072	8402,54
24/09/2024	1078,863	39109,17	1490,06	178.611	8342,48
25/09/2024	1075,982	38562,55	1465,31	174.473	8398,49
26/09/2024	1074,035	38605,59	1464,29	175.437	8346,54
27/09/2024	1074,639	38685,38	1468,14	174.330	8421,64
28/09/2024	1078,700	38421,83	1463,65	175.617	8334,35
29/09/2024	1077,575	35812,15	1362,82	160.969	8466,32
30/09/2024	1080,697	37901,08	1446,49	171.515	8433,57
Rata-rata	1077,353	38377,53	1460,08	174.061	8389,44

Tabel 7 menampilkan nilai *heat rate* pada bulan September 2024, nilai tersebut didapatkan dengan menggunakan persamaan (3.3). *Heat rate* dipengaruhi oleh energi bahan bakar yang dikonsumsi dan kWh produksi. Semakin tinggi konsumsi energi bahan bakar maka semakin tinggi juga *heat rate*, sedangkan peningkatan nilai kWh produksi akan diikuti dengan penurunan *heat rate*. Berdasarkan tabel tersebut nilai *heat rate* terendah pada bulan September 2024 terjadi tanggal 05 September 2024 dengan besar nilai 8.240,94 BTU/kWh dan nilai tertinggi pada 04 September 2024 yaitu sebesar 8.510,89 BTU/kWh. Nilai rata-rata *heat rate* pada bulan September 2024 sebesar 8.389,44 BTU/kWh.

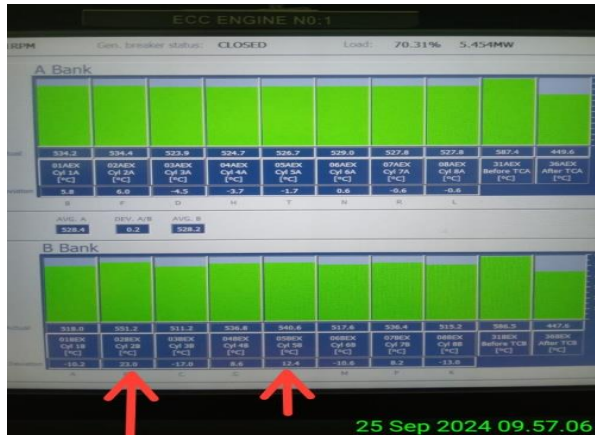
Tabel 8. Hasil perhitungan efisiensi mesin gas (siklus Otto) bulan September 2024

September	GHV	Nilai Ketetapan		Vr1	Vr2	T2	T3	T1	Qin	T4	Qout	Wnet	Eff
2024	kJ/kg					K	K	K	kW	K	kW	kW	%
01/09/2024	45637,164			606,08	45,57	815,49	2018,29	303	69351,88	806	28999,51	40352,37	58,2%
02/09/2024	45499,082	mf	1,52	606,08	45,57	815,49	2014,65	303	69142,05	802	28783,29	40358,76	58,4%
03/09/2024	45415,691			606,08	45,57	815,49	2012,45	303	69015,32	809	29159,03	39856,29	57,7%
04/09/2024	45396,080	ma	70,23	621,2	46,71	808,46	2004,90	300	68985,52	804	29034,10	39951,42	57,9%
05/09/2024	45323,341			611,12	45,95	813,15	2007,67	302	68874,99	808	29149,42	39725,56	57,7%
06/09/2024	45289,993	Cv	0,821	606,08	45,57	815,49	2009,14	303	68824,31	809	29136,93	39687,38	57,7%
07/09/2024	45419,242			601,04	45,19	817,84	2014,89	304	69020,72	807	29039,87	39980,85	57,9%
08/09/2024	45473,553			616,16	46,33	810,80	2009,29	301	69103,25	804	29007,20	40096,06	58,0%
09/09/2024	45541,263			621,2	46,71	808,46	2008,73	300	69206,15	802	28932,24	40273,91	58,2%
10/09/2024	45621,146			621,2	46,71	808,46	2010,83	300	69327,54	804	29036,03	40291,51	58,1%
11/09/2024	45652,887			611,12	45,95	813,15	2016,36	302	69375,78	806	29061,97	40313,80	58,1%

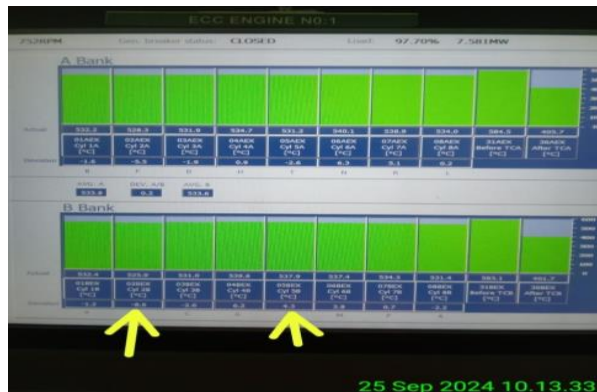
September	GHV	Vr1	Vr2	T2	T3	T1	Qin	T4	Qout	Wnet	Eff
2024	kJ/kg			K	K	K	kW	K	kW	kW	%
12/09/2024	45446,672	616,16	46,33	810,80	2008,58	301	69062,4	806	29103,29	39959,11	57,9%
13/09/2024	45489,065	606,08	45,57	815,49	2014,39	303	69126,83	805	28931,28	40195,55	58,1%
14/09/2024	45674,527	621,2	46,71	808,46	2012,24	300	69408,66	805	29081,19	40327,47	58,1%
15/09/2024	45600,055	621,2	46,71	808,46	2010,28	300	69295,49	804	29069,66	40225,83	58,0%
16/09/2024	45600,055	611,12	45,95	813,15	2014,97	302	69295	806	29066,78	40228,71	58,1%
17/09/2024	45712,144	STANDBY									
18/09/2024	45711,045	611,12	45,95	813,15	2017,893	302	69464,15	802	28856,32	40607,83	58,5%
19/09/2024	45762,398	611,12	45,95	813,15	2019,25	302	69542,19	804	28939,93	40602,26	58,4%
20/09/2024	45645,406	606,08	45,57	815,49	2018,51	303	69364,41	805	28939,93	40424,48	58,3%
21/09/2024	45624,442	621,2	46,71	808,46	2010,92	300	69332,55	793	28441,18	40891,37	59,0%
22/09/2024	45567,341	STANDBY									
23/09/2024	45458,042	606,08	45,57	815,49	2013,57	303	69079,68	805	28922,63	40157,05	58,1%

September	GHV	Vr1	Vr2	T2	T3	T1	Qin	T4	Qout	Wnet	Eff
2024	kJ/kg			K	K	K	kW	K	kW	kW	%
24/09/2024	45599,041	616,16	46,33	810,80	2012,59	301	69293,95	802	28892,84	40401,11	58,3%
25/09/2024	45477,273	596	44,81	820,20	2018,78	305	69108,91	814	29377,17	39731,73	57,5%
26/09/2024	45394,981	626,55	47,11	805,99	2002,40	299	68983,85	804	29100,41	39883,44	57,8%
27/09/2024	45420,510	606,08	45,57	815,49	2012,58	303	69022,65	808	29120,59	39902,05	57,8%
28/09/2024	45592,151	616,16	46,33	810,80	2012,41	301	69283,48	801	28827,49	40455,99	58,4%
29/09/2024	45544,602	611,12	45,95	813,15	2013,51	302	69211,22	805	28979,33	40231,89	58,1%
30/09/2024	45676,556	621,2	46,71	808,46	2012,29	300	69411,74	802	28963,95	40447,79	58,3%
Rata-rata											58,09%

Efisiensi mesin gas pada bulan September 2024 dapat dilihat pada tabel 8. Berdasarkan tabel tersebut efisiensi terendah terjadi pada 25 September 2024 dengan nilai 57,5%, sedangkan nilai tertinggi adalah 59% yang terjadi tanggal 21 September 2024. Adapun nilai rata-rata efisiensi mesin selama bulan September 2024 yaitu sebesar 54,22%. Terjadinya kondisi derating memiliki arti bahwa adanya kegagalan pembakaran pada langkah ekspansi piston yang dapat menyebabkan ketidakseimbangan bagi piston pada silinder yang lain. Untuk memproteksi ketidakseimbangan pada ke 16



Gambar 9. Parameter *cyl 2B Temperatur Exhaust High* pada Panel ECC #1



Gambar 10. Parameter Temperatur *Exhaust* kembali Normal Setelah Dilakukan *Setting Fuel Rack*

Setting fuel rack adalah pengaturan jumlah bahan bakar yang akan diinjeksikan ke dalam ruang bakar. *Fuel rack* atau batang bergirigi pada injector akan bergerak untuk mengurangi jumlah bahan bakar yang diinjeksikan saat putaran mesin naik. Hal ini akan membuat temperatur *exhaust* yang tinggi pada silinder menjadi menurun dan tidak akan melebihi dari yang telah ditentukan

sehingga menahan mesin pada tingkat beban tersebut. Pada saat melakukan pengaturan *fuel rack*, yang menjadi acuan oleh tim operasional adalah parameter pada panel ECC dan jarum penunjuk bahan bakar dalam satuan derajat (°) yang terletak pada sisi silinder head, dimana setiap 1° pergerakan jarum dapat menurunkan nilai dari *temperature exhaust* sebesar 15. Seperti yang terlampir pada gambar 10 menunjukkan bahwa temperatur *exhaust* sudah kembali normal setelah dilakukan *setting fuel rack* terhadap silinder 2B #E1.

Tabel 9. Hasil perhitungan konsumsi bahan bakar pada bulan Oktober 2024

OKTOBER	GHV	V gas	Energi BBG	kWh Output	HR
2024	(BTU/ft3)	(m3)	(MMBTU)	(kWh)	(BTU/kWh)
01/10/2024	1081,543	38138,81	1456,70	173.393	8401,13
02/10/2024	1077,009	39318,74	1495,47	178.507	8377,69
03/10/2024	1076,335	39081,39	1485,51	177.055	8390,11
04/10/2024	1076,170	39490,89	1500,85	180.421	8318,59
05/10/2024	1077,279	36505,29	1388,81	164.819	8426,27
06/10/2024	1075,973	24931,43	947,34	111.088	8527,86
07/10/2024	1079,945	38029,69	1450,39	172.728	8396,92
08/10/2024	1081,542	38265,05	1461,52	174.526	8374,22
09/10/2024	1080,278	38779,23	1479,43	176.106	8400,77
10/10/2024	1076,247	38694,66	1470,69	177.276	8296,08
11/10/2024	1077,600	37086,41	1411,34	167.114	8445,35

12/10/2024	1076,787	37837,08	1438,82	170.770	8425,49
13/10/2024	1075,862	16884,73	641,52	75.340	8515,02
14/10/2024	1077,273	37815,85	1438,66	172.196	8354,82
15/10/2024	1072,126	39303,83	1488,13	178.038	8358,48
16/10/2024	1077,393	39517,48	1503,57	179.715	8366,39
17/10/2024	1072,821	39467,11	1495,28	179.948	8309,49
18/10/2024	1076,827	37462,87	1424,64	169.743	8392,94
19/10/2024	1076,334	37220,11	1414,76	167.854	8428,52
20/10/2024	1076,227	37469,16	1424,09	170.215	8366,42
21/10/2024	1075,374	23268,03	883,65	101.630	8694,77
22/10/2024	1071,050	38016,90	1437,96	171.136	8402,41
23/10/2024	1071,861	36247,50	1372,07	163.869	8372,94
24/10/2024	1072,517	39188,98	1484,32	176.583	8405,77

25/10/2024	1072,517	38784,99	1469,02	175.155	8386,96
26/10/2024	1071,598	39305,62	1487,46	178.149	8349,51
27/10/2024	1073,096	39190,74	1485,19	178.117	8338,28
28/10/2024	1075,573	39304,74	1492,95	177.780	8397,71
29/10/2024	1073,858	38574,52	1462,87	173.796	8417,19
30/10/2024	1071,950	39136,05	1481,53	176.688	8385,02
31/10/2024	1068,856	39259,53	1481,92	176.686	8387,27
Rata-rata	1075,478	36825,08	1398,60	166.659	8400,33

Tabel 9 memperlihatkan *heat rate* mesin gas pada bulan Oktober 2024. Sebelum menentukan nilai *heat rate* menggunakan persamaan (3.3), dibutuhkan perhitungan konsumsi bahan bakar. Perhitungan konsumsi bahan bakar memakai persamaan (3.2), pada persamaan ini melibatkan nilai GHV gas sehingga nilai tersebut memiliki pengaruh pada *heat rate*. Semakin tinggi nilai GHV maka konsumsi energi bahan bakar menjadi lebih banyak, kemudian akan mempengaruhi *heat rate*. Berdasarkan tabel 9 nilai terendah *heat rate* bulan Oktober 2024 terjadi pada tanggal 10 Oktober 2024 yang bernilai 8.296,08 BTU/kWh dan yang tertinggi pada 21 Oktober 2024 sebesar 8.694,77 BTU/kWh. Rata-rata *heat rate* bulan Oktober 2024 yaitu 8.400,33 BTU/kWh.

Tabel 10. Hasil perhitungan efisiensi mesin gas (siklus Otto) bulan Oktober 2024

Oktober	GHV	Nilai Ketetapan		Vr1	Vr2	T2	T3	T1	Qin	T4	Qout	Wnet	Eff
						K	K	K	kW	K	kW	kW	%
2024	kJ/kg					K	K	K	kW	K	kW	kW	%
01/10/2024	45712,313			611,12	45,95	813,15	2009,93	302	69005,02	802	28793,86	40211,16	58,3%
02/10/2024	45520,680	mf	1,51	611,12	45,95	813,15	2004,91	302	68715,74	806	29074,47	39641,28	57,7%
03/10/2024	45492,193			601,04	45,19	817,84	2008,86	304	68672,74	805	28912,06	39760,68	57,9%
04/10/2024	45485,219	ma	70,23	621,2	46,71	808,46	1999,29	300	68662,21	804	29058,13	39604,08	57,7%
05/10/2024	45532,092			601,04	45,19	817,84	2009,90	304	68732,97	801	28675,66	40057,31	58,3%
06/10/2024	45476,892	Cv	0,821	611,12	45,95	813,15	2003,77	302	68649,64	804	28895,72	39753,92	57,9%
07/10/2024	45644,772			616,16	46,33	810,80	2005,82	301	68903,07	805	29107,14	39795,93	57,8%
08/10/2024	45712,271			606,08	45,57	815,49	2012,27	303	69004,96	802	28778,48	40226,48	58,3%
09/10/2024	45658,847			606,08	45,57	815,49	2010,88	303	68924,31	803	28834,22	40090,09	58,2%
10/10/2024	45488,473			626,55	47,11	805,99	1996,91	299	68667,12	805	29189,78	39477,34	57,5%

Oktober	GHV		Vr1	Vr2	T2	T3	T1	Qin	T4	Qout	Wnet	Eff
2024	kJ/kg				K	K	K	kW	K	kW	kW	%
11/10/2024	45545,659		621,2	46,71	808,46	2000,88	300	68753,45	801	28907,25	39846,19	58,0%
12/10/2024	45511,297		611,12	45,95	813,15	2004,67	302	68701,58	805	28985,09	39716,48	57,8%
13/10/2024	45472,201		606,08	45,57	815,49	2005,99	303	68642,56	802	28781,37	39861,19	58,1%
14/10/2024	45531,838		616,16	46,33	810,80	2002,86	301	68732,59	802	28872,66	39859,93	58,0%
15/10/2024	45314,296		616,16	46,33	810,80	1997,16	301	68404,2	804	28973,56	39430,63	57,6%
16/10/2024	45536,910		621,2	46,71	808,46	2000,65	300	68740	806	29143,66	39596,59	57,6%
17/10/2024	45343,671		611,12	45,95	813,15	2000,28	302	68448,54	793	28356,61	40091,93	58,6%
18/10/2024	45512,987		611,12	45,95	813,15	2004,71	302	68704,13	804	28911,1	39793,03	57,9%
19/10/2024	45492,150		616,16	45,57	810,80	2001,82	303	68672,68	805	28920,71	39751,97	57,9%
20/10/2024	45487,628		621,2	46,71	808,46	1999,36	300	68665,85	802	28940,89	39724,96	57,9%
21/10/2024	45451,575		616,16	46,33	810,80	2000,76	301	68611,43	802	28925,51	39685,91	57,8%
22/10/2024	45268,818		616,16	46,71	810,80	1995,97	300	68335,54	809	29332,01	39003,54	57,1%

Oktober	GHV		Vr1	Vr2	T2	T3	T1	Qin	T4	Qout	Wnet	Eff
2024	kJ/kg				K	K	K	kW	K	kW	kW	%
23/10/2024	45303,095				611,12	46,33	813,15	1999,22	301	68387,29	804	28969,72
24/10/2024	45330,822	637,23	46,33	801,05	1987,84	301	68429,14	800	28733,32	39695,82	58,0%	
25/10/2024	45330,822	626,55	44,81	805,99	1992,78	305	68429,14	814	29348,34	39080,80	57,1%	
26/10/2024	45291,979	616,16	47,91	810,80	1996,58	297	68370,51	807	29423,30	38947,21	57,0%	
27/10/2024	45355,294	621,2	47,11	808,46	1995,89	299	68466,08	804	29143,66	39322,43	57,4%	
28/10/2024	45459,986	616,16	46,33	810,80	2000,98	301	68624,12	802	28897,64	39726,48	57,9%	
29/10/2024	45387,500	611,12	46,71	813,15	2001,43	300	68514,7	804	29024,49	39490,21	57,6%	
30/10/2024	45306,857	611,12	46,33	813,15	1999,31	301	68392,97	806	29122,51	39270,45	57,4%	
31/10/2024	45176,086	611,12	45,95	813,15	1995,89	302	68195,56	802	28842,87	39352,69	57,7%	
Rata-rata												57,8%

Efisiensi mesin gas pada bulan Oktober 2024 dapat dilihat pada tabel 10. Berdasarkan tabel tersebut efisiensi terendah terjadi pada 25 & 26 Oktober 2024 dengan nilai 57,1% dan 57%, sedangkan nilai tertingginya adalah 58,6% yang terjadi tanggal 17 Oktober 2024. Adapun nilai rata-rata efisiensi mesin selama bulan Oktober 2024 yaitu sebesar 57,8%. Kondisi *derating* 30% kembali terjadi di bulan Oktober 2024. Saat kondisi normal dengan beban maksimum 7 MW atau sekitar 97% muncul alarm *derating* 30% dengan indikasi *exhaust cylinder* 2B *temperature high* pada *engine* 1 yang terpantau

oleh penulis pada monitor scada di CCR. Saat terjadi *derating* 30% mengakibatkan beban menurun secara drastis menjadi 70% atau sekitar 5.43 MW.

	GEG01	GEG02	GEG03	GEG04
RPM	701	701	701	701
MW	5.43	7.56	7.57	7.54
MVAT	1.99	2.80	2.82	2.78
Hz	70	98	97	97
	RESET	RESET	RESET	RESET

Gambar 11. Tampilan Alarm *Derating* 30% cyl 2B pada Monitor Scada di CCR

Terjadinya *derating* karena tingginya temperatur *exhaust* dari salah satu silinder cukup memengaruhi *heat rate* dan efisiensi dari tingkat kinerja pada mesin gas. Dapat dilihat dari tabel bahwa perhitungan *heat rate* dan nilai efisiensi pada kondisi *derating* memiliki perbedaan dengan kondisi mesin saat normal tanpa gangguan walau tidak terlalu signifikan.



Gambar 12. Tampilan Daya Keluaran saat Kondisi Derate 30% pada Panel GCC

Derating 30% memengaruhi beban turun menjadi 70% atau berkisar 5.4 MW seperti yang terlihat pada gambar 12 perangkat ini memantau dan menyesuaikan frekuensi, tegangan dan arus dari setiap fasa untuk memastikan sinkronisasi yang tepat oleh generator. Saat terjadi gangguan seperti ini ada beberapa faktor yang

perlu diperhatikan terkait penyebab tingginya temperatur *exhaust* yang menyebabkan *derating* 30% dapat terjadi. Faktor tersebut yakni *temperature inlet* atau suhu *ambient* yang panas dapat membuat temperatur *exhaust* menjadi tinggi. Faktor lainnya yang dapat menyebabkan tingginya temperatur *exhaust* melebihi dari *setpoint* yang telah ditentukan yaitu berupa *prechamber* dan *spark plug* (busi).

4.2. Pembahasan

Mesin PLTMG MCB merupakan mesin pembangkit yang beroperasi menggunakan bahan bakar gas dengan jumlah silinder 16 unit (8 silinder sisi A dan 8 silinder sisi B). Pada masing-masing *block engine* terdapat *cylinder liner*, piston, dan *cylinder head*. Pertemuan antara permukaan atas piston dengan permukaan bagian bawah *cylinder head* merupakan tempat terjadinya pembakaran (campuran antara bahan bakar gas dengan udara yang terkompresi dan di picu oleh sistem pengapian). Pada masing-masing ruang pembakaran utama pada silinder terdapat parameter *exhaust temperature* yang dibaca oleh sensor thermocouple. Nilai *exhaust temperature* normal yang terbaca oleh sensor pada saat mesin beroperasi pada beban maksimal (7.5 MW) adalah 505°C - 530°C. Pada saat mesin dalam keadaan sedang beroperasi, pemantauan terhadap nilai *exhaust temperature cylinder* tersebut dilakukan oleh tim operasi. Hal tersebut perlu dilakukan untuk menjaga agar nilai *exhaust temperature cylinder* beroperasi pada *range* normal.

4.2.1. Derating 30% dengan Indikasi Exhaust Cylinder Temperature High

Temperatur *exhaust* sangat dipengaruhi pada pembakaran awal. Jika terjadi kegagalan pada pembakaran awal maka dapat menyebabkan pembakaran di ruang bakar utama menjadi tidak maksimal. Pembakaran awal dipengaruhi oleh 2 sistem, yaitu sistem bahan bakar dan sistem pengapian, jika terjadi kegagalan pada kedua sistem maka akan berakibat pada pembakaran di ruang bakar tidak optimal dan hal ini dapat menyebabkan nilai *exhaust temperature* melonjak naik melebihi batas yang telah ditentukan.

Untuk menjaga keseimbangan kerja 16 piston untuk menggerakkan *crankshaft engine*, proses pembakaran yang terjadi pada ruang bakar 16 silinder harus maksimal. Piston bekerja secara bergantian untuk menggerakkan *crankshaft engine* yang dihubungkan dengan *shaft* generator sehingga menghasilkan energi listrik. Saat terjadi kegagalan pembakaran pada langkah ekspansi piston, dapat menyebabkan ketidakseimbangan bagi piston pada silinder yang lain. Untuk memproteksi ketidakseimbangan pada ke 16 piston, mesin akan *derate* dengan indikasi *exhaust temperature high* dan akan muncul alarm pada panel ECC.

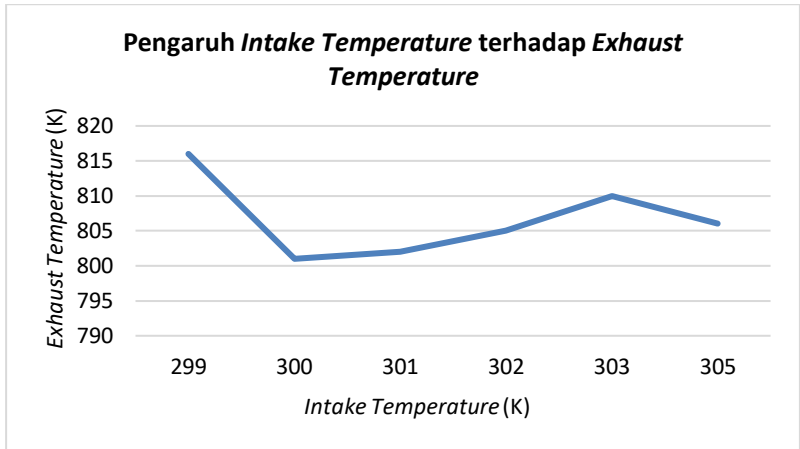
4.2.2. Efisiensi dan Konsumsi Bahan Bakar Gas

Dalam tahapan konversi energy termal menjadi energi mekanik, mesin gas mengalami kehilangan kalor (*losses*) yang dapat membuat efisiensi mesin gas tidak dapat mencapai 100%. Selain itu, prinsip kerja dari mesin *Rolls-Royce* tipe *B35:40V16AG2* berdasarkan siklus *Otto*, dimana siklus ini merupakan penerapan hukum II Termodinamika yang menyatakan bahwa tidak ada mesin kalor yang bekerja dalam suatu siklus yang mampu mengubah seluruh energi termal menjadi usaha mekanik. Berdasarkan tabel 6, 8, dan 10 dapat dilihat nilai efisiensi mesin gas *Rolls-Royce* tipe *B35:40V16AG2* selama tiga bulan dari tanggal 1 Agustus 2024 hingga 31 Oktober 2024 tidak mencapai nilai 100%.

Dalam waktu tiga bulan tersebut ada saatnya *engine* tidak bekerja selama 24 jam. Hal ini disebabkan adanya permintaan dari pihak PLN melalui *BCC* (Batam Control Centre). Adapun nilai efisiensi tertinggi selama tiga bulan adalah sebesar 59% pada tanggal 21 September 2024, sedangkan untuk nilai efisiensi terendah terjadi pada 25 Agustus 2024 sebesar 43,3%.

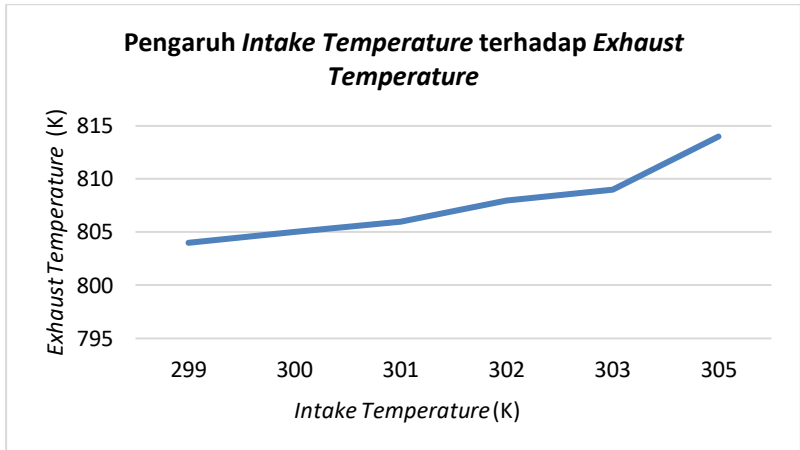
Pada tabel 5, 7, dan 9 menunjukkan konsumsi bahan bakar pada tanggal 1 Agustus 2024 hingga 31 Oktober 2024. Perbedaan nilai volume konsumsi bahan bakar dapat disebabkan oleh banyak faktor seperti karena adanya perbedaan lama pengoperasian mesin serta perbedaan nilai *GHV* (*Gross Heating Value*) yang didapat dari PLN setiap bulan. Oleh karena itu, dibutuhkan nilai *heat rate* untuk mengetahui tingkat keborosan dari mesin yang beroperasi. Berdasarkan ketiga tabel perhitungan konsumsi bahan bakar yaitu tabel 5, 7, dan 9 dapat diketahui nilai *heat rate* tertinggi terjadi pada tanggal 25 Agustus 2024 sebesar 8.529,39 BTU/kWh, sedangkan nilai *heat rate* terendah adalah 8.240,94 tepatnya pada 05 September 2024.

Terdapat hubungan antara *heat rate* dan efisiensi mesin gas, nilai *heat rate* berbanding terbalik dengan efisiensi. Ketika nilai *heat rate* semakin tinggi maka efisiensi mesin gas akan semakin rendah, dapat dilihat dari nilai *heat rate* tertinggi dan efisiensi mesin terendah terjadi pada waktu yang sama, yaitu pada tanggal 25 Agustus 2024 begitupun sebaliknya. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efisiensi mesin gas maka harus didapati *heat rate* yang rendah agar mesin dapat memiliki efisiensi yang tinggi.



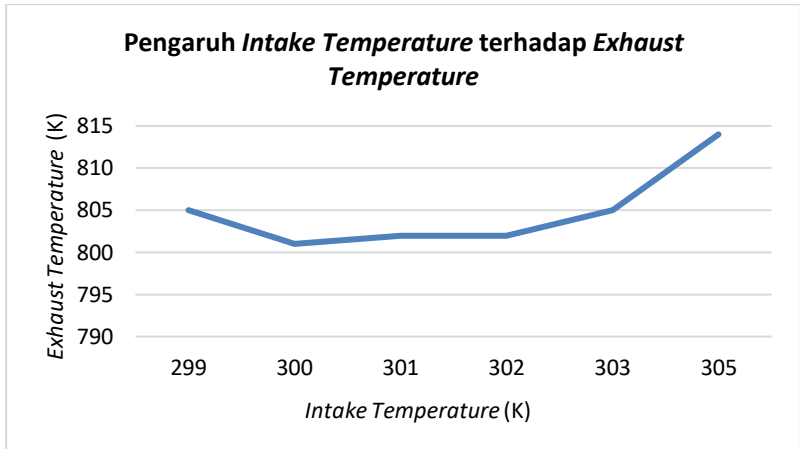
Gambar 13. Grafik Pengaruh *Intake Temperature* terhadap *Exhaust Temperature* bulan Agustus 2024

Gambar 13 menampilkan grafik hubungan antara T_1 (*intake temperature*) terhadap T_4 (*temperatur gas buang/exhaust*) pada bulan Agustus 2024. Gambar 13 bertujuan mengetahui bagaimana nilai T_4 berubah seiring dengan peningkatan nilai T_1 . Dapat dilihat pada grafik, T_1 berada pada sumbu X dan terlihat grafik menunjukkan tren yang tidak linear dimana nilai T_4 meningkat bahkan menjadi nilai T_4 yang tertinggi pada bulan Agustus sementara nilai T_1 hanya bernilai 300K. Grafik bulan Agustus mengindikasikan nilai T_1 tidak sepenuhnya memengaruhi kenaikan T_4 karena adanya pergerakan yang seharusnya tidak terjadi, hal ini menandakan adanya faktor lain yang membuat T_4 bernilai 815K di rentang suhu T_1 sebesar 299K sehingga menyebabkan pola fluktuasi seperti yang terlihat pada gambar 13.



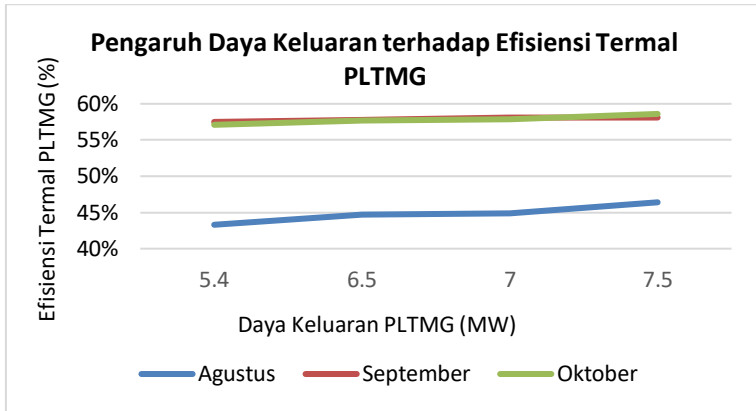
Gambar 14. Grafik Pengaruh *Intake Temperature* terhadap *Exhaust Temperature* bulan September 2024

Gambar 14 menampilkan grafik hubungan antara T1 (*intake temperature*) terhadap T4 (*temperatur gas buang/exhaust*) pada bulan September 2024. Gambar 14 bertujuan mengetahui bagaimana korelasi dari kedua parameter tersebut, dimana jika sesuai teori T1 yang nilainya semakin tinggi berpotensi menyebabkan peningkatan T4. Dapat dilihat pada grafik, T1 berada pada sumbu X dan terlihat ada kecenderungan meningkatnya suhu T4 seiring dengan meningkatnya suhu T1 yang ditandai ketika T1 berada di suhu 299K dan T4 berada di 804K dan semakin meningkat mengikuti parameter T1 menunjukkan adanya korelasi. Akan tetapi kenaikan T4 terhadap T1 tidak bersifat linear sempurna, di awal kenaikan T4 lebih lambat, namun semakin ke kanan T1 semakin besar dan T4 meningkat lebih cepat, hal ini memiliki arti bahwa pengaruh T1 terhadap T4 tidak konstan pada laju kenaikannya melainkan bergantung pada variasi dari nilai T1. Pada gambar 14 dapat dilihat beberapa data yang sudah sesuai dengan keadaan riil di lapangan, seperti pada T1 bernilai 305K memengaruhi peningkatan temperatur dari T4 yaitu menjadi 814K yang bertepatan dengan terjadinya derating 30% akibat tingginya temperatur *exhaust* yang sudah melebihi dari *setpoint* yang telah ditentukan, sehingga dapat dikatakan T1 cukup berpengaruh terhadap kenaikan T4.



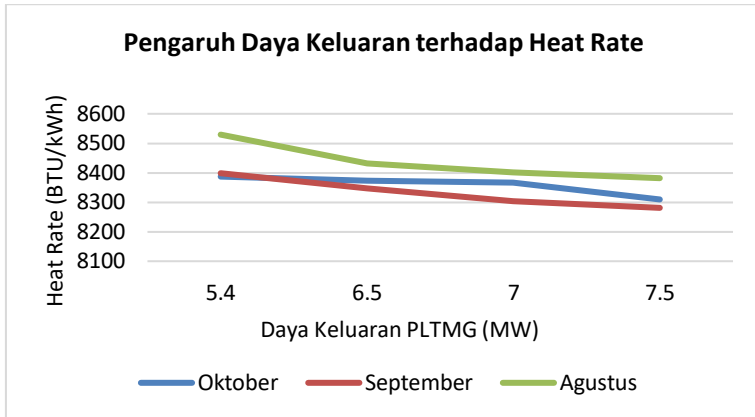
Gambar 15. Grafik Pengaruh *Intake Temperature* terhadap *Exhaust Temperature* bulan Oktober 2024

Gambar 15 menampilkan grafik hubungan antara T1 (*intake temperature*) terhadap T4 (*temperatur gas buang/exhaust*) pada bulan Oktober 2024. Dapat dilihat pada grafik, T1 berada pada sumbu X dan terlihat grafik menunjukkan fluktuasi. Di awal data dengan suhu T1 bernilai 300K nilai T4 mengalami penurunan. Setelah itu nilai T4 relatif stabil dengan rentang T1 bernilai 300K hingga 302K yang berarti T1 tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan T4. Di akhir data dengan T1 bernilai 303K & 305K, nilai T4 mengalami peningkatan seiring naiknya suhu T1, ini berarti T1 berpengaruh terhadap peningkatan T4. T1 yang tinggi menandakan bahwa cuaca di sekitar unit beroperasi sedang tinggi dan mengakibatkan suhu *ambient* juga tinggi. Suhu *intake/inlet* merupakan suhu awal dimana mengambil udara *ambient* untuk dapat dialirkan masuk ke dalam ruang bakar, sehingga jika suhu *ambient/intake* tinggi maka T4 akan tinggi dan berakibat melebihi dari *setpoint* yang kemudian *derating* 30% dapat terjadi di rentang suhu T1 dan T4 yang tinggi.



Gambar 16. Grafik Pengaruh Daya Keluaran terhadap Efisiensi Termal PLTMG

Berdasarkan gambar 16 grafik beban terhadap efisiensi, dimana terdiri atas tiga bulan penelitian yang ditampilkan dalam satu grafik memperlihatkan adanya hubungan antara beban yang dicapai oleh suatu unit dibandingkan dengan efisiensi yang mampu dihasilkan. Sumbu X memperlihatkan variasi beban yang tercatat, dimulai dari 5,4 MW dimana beban terendah yang terjadi pada saat kondisi *derate 30%* kemudian diikuti dengan variasi beban hingga keadaan normal di 7.5 MW. Terlihat dari gambar 16 semakin besar beban maka nilai efisiensi semakin tinggi pula. Artinya jika ada terjadi indikasi maka hal itu dapat memengaruhi efisiensi. Grafik pada bulan September dan Oktober memiliki selisih yang sedikit sehingga terlihat menempel satu sama lain dan berada di *range 57%* hingga *58%*. Gambar 16 menunjukkan nilai efisiensi tertinggi berada pada bulan Oktober dengan nilai 58,6% di beban 7,5 MW dan nilai efisiensi terendah terjadi pada bulan Agustus dengan nilai 43,3% di beban 5,4 MW bertepatan dengan terjadinya *derating 30%*, maka dapat dikatakan *derating 30%* memiliki pengaruh terhadap kinerja mesin gas salah satunya dilihat dari efisiensi yang dihasilkan oleh unit tersebut. Pada bulan Agustus nilai efisiensi terlihat rendah dari dua bulan lainnya dengan selisih 14% yang memungkinkan adanya faktor lain yang terjadi pada bulan Agustus sehingga membuat nilai efisiensi rendah. Sementara itu, kinerja mesin gas juga dapat dilihat dari nilai *heat rate* unit seperti yang ditampilkan pada grafik berikut.



Gambar 17. Grafik Pengaruh Daya Keluaran terhadap Heat Rate

Gambar 17 menampilkan grafik hasil pengolahan data berupa *heat rate* yang akan dibandingkan dengan beban, dimana terdiri atas tiga bulan penelitian yang ditampilkan dalam satu grafik. Sama seperti grafik 16, pada sumbu X memperlihatkan variasi beban yang tercatat, dimulai dari 5,4 MW dimana beban terendah yang terjadi pada saat kondisi *derate* 30% kemudian diikuti dengan variasi beban hingga keadaan normal di 7,5 MW. Berbeda dengan perbandingan terhadap efisiensi, gambar 17 yang menampilkan perbandingan antara beban dengan *heat rate* mengalami penurunan, yang artinya semakin kecil nilai *heat rate* maka performa dari mesin gas akan semakin baik yang menandakan mesin tersebut hemat dalam konsumsi bahan bakar. Nilai *heat rate* dibutuhkan untuk mengetahui tingkat keborosan dari mesin yang beroperasi, maka dari itu nilai *heat rate* dan efisiensi memiliki hubungan yang berlawanan. Seperti yang terlihat pada gambar 17 grafik menampilkan bahwa semakin besar beban pengoperasian suatu unit maka *heat rate* nya tercatat semakin rendah, hal ini berarti unit 1 mesin gas PLTMG MCB masih tergolong hemat dalam konsumsi bahan bakar. Sementara di saat beban pengoperasian rendah seperti di 5,4 MW *heat rate* terpantau tinggi yang bertepatan dengan terjadinya *derating* 30%, hal ini berarti *derating* 30% mengakibatkan daya keluaran menurun dan konsumsi bahan bakar yang meningkat menandakan unit tidak efisien sehingga dapat dikatakan *derating* 30% memengaruhi kinerja mesin gas yang dilihat dari nilai *heat rate*. Gambar 17 menunjukkan nilai *heat rate* tertinggi berada pada bulan Agustus dengan nilai 8529,39 BTU/kWh di beban 5,4 MW yang bertepatan dengan terjadinya *derating* 30% dan nilai *heat rate* terendah terjadi pada bulan September dengan nilai 8280,96 BTU/kWh di beban 7,5 MW.

4.2.3. Tindakan Maintenance saat Gangguan

Temperatur *exhaust* sangat dipengaruhi pada pembakaran awal. Jika terjadi kegagalan pada pembakaran awal maka dapat menyebabkan pembakaran di ruang bakar utama menjadi tidak maksimal. Pembakaran awal dipengaruhi oleh 2 sistem, yaitu sistem bahan bakar dan sistem pengapian, jika terjadi kegagalan pada kedua sistem maka akan berakibat pada pembakaran di ruang bakar tidak optimal dan hal ini dapat menyebabkan nilai *exhaust temperature* melonjak naik melebihi batas yang telah ditentukan. Pertemuan antara permukaan atas piston dengan permukaan bagian bawah *cylinder head* merupakan tempat terjadinya pembakaran (campuran antara bahan bakar gas dengan udara yang terkompresi dan dipicu oleh sistem pengapian).

Kegagalan pembakaran dapat dipengaruhi oleh sistem bahan bakar. Komponen yang dapat menyebabkan kegagalan pada sistem pembakaran awal adalah *prechamber*. *Prechamber* merupakan saluran gas yang berfungsi untuk mengalirkan bahan bakar gas agar dapat masuk ke dalam ruang bakar, peran *prechamber* sangat penting dalam proses pembakaran awal.



Gambar 18. Prechamber Valve Gas

Tingginya temperatur *exhaust* dapat disebabkan oleh kinerja *prechamber* yang kurang maksimal, umumnya terjadi karena *prechamber* kotor, komponennya seperti *valve seat* nya berkerak dan bahkan *ball valve* yang sudah tidak berbentuk bulat sempurna. *Prechamber* terletak bersebelahan dengan busi, fungsi *prechamber* adalah untuk mengalirkan gas murni dalam proses pembakaran di ruang bakar. *Prechamber* memiliki beberapa komponen di dalamnya, salah satu ialah *ball valve*. *Ball valve* berada di dalam *prechamber* bekerja dengan menyemprotkan (*spray*) gas tambahan. Ketika *ball valve* dalam keadaan macet atau kondisi tidak terbuka maka *ball valve* tidak dapat menyemprotkan gas tambahan ke ruang bakar sehingga dapat menyebabkan temperatur *exhaust* naik karena komposisi dari udara yang masuk ke ruang bakar lebih dominan dibandingkan dengan gas murni dari saluran *prechamber* tersebut.

Penggantian *prechamber* menjadi salah satu *action* yang akan dilakukan oleh tim operasi pada saat terjadi kondisi *derating*. Umumnya *action* yang akan dilakukan adalah *adjust fuel rack*, akan tetapi jika temperatur *exhaust* terus meningkat maka akan diperintahkan untuk stop unit dan melakukan penggantian dengan *prechamber* bekas ataupun baru serta dengan melihat *history* pemakaian dari *prechamber* pada unit tersebut.

Kegagalan pembakaran juga dapat dipengaruhi oleh sistem pengapian. Komponen yang dapat menyebabkan kegagalan pada sistem pengapian umumnya terjadi karena *spark plug* (busi), koil atau konektor busi. *Spark plug* atau umumnya disebut busi merupakan sistem pengapian yang berfungsi untuk menghasilkan arus listrik bertegangan tinggi untuk kebutuhan pembakaran campuran bahan bakar dan udara dalam ruang bakar.



Gambar 19. Spark Plug (busi)

Berawal dari tingginya temperatur *exhaust* pada salah satu silinder dapat menyebabkan munculnya alarm berupa kondisi *derating* pada unit. Busi menjadi salah satu komponen yang dapat menyebabkan hal ini terjadi. Adanya partikel berupa kotoran yang melekat di sekitar busi dapat membuat busi menjadi tidak memiliki tegangan, sehingga saat proses pembakaran terjadi busi tidak dapat memercikkan api secara sempurna di ruang bakar. Busi dan *prechamber* terletak dalam satu *line* dimana saat terjadi proses pembakaran kedua komponen ini saling bekerja sama, *prechamber* akan menyemprotkan gas murni dan busi akan memercikkan api kemudian bercampur dengan udara yang terkompresi sehingga pembakaran dapat terjadi.

Penggantian busi juga menjadi salah satu *action* yang akan dilakukan oleh tim operasi pada saat terjadi kondisi *derating* 30%. Umumnya *action* yang akan dilakukan adalah *adjust fuel rack*, akan tetapi jika temperatur *exhaust* terus meningkat dalam kurun waktu yang berdekatan maka tim operasi akan melakukan

pengecekan *running hours* dan *history* dari pemakaian busi tersebut sebelum dilakukan penggantian komponen yang baru.

Konektor busi juga termasuk salah satu komponen yang dapat menyebabkan kegagalan pada sistem pengapian. Konektor busi atau *high tension* merupakan komponen yang berfungsi untuk mengalirkan tegangan listrik. Keberadaan komponen ini sangat penting untuk memastikan terjadinya proses pembakaran yang efisien di dalam ruang bakar.



Gambar 20. Konektor Busi

Jika didapati konektor busi tidak berfungsi dengan baik maka hal ini dapat menyebabkan kegagalan pembakaran pada ruang bakar dan menyebabkan *engine derating* atau bahkan *trip*. Konektor busi berkaitan dengan energi busi per silinder. Dalam permasalahan tingginya temperatur *exhaust* pada salah satu silinder, jika ditemukan nilai dari energi busi melompat/*hunting*, maka dilakukan pengecekan terhadap konektor busi. Umumnya disebabkan karena panas berlebih yang dihasilkan oleh *engine* saat beroperasi, paparan panas menyebabkan lapisan isolator pada konektor busi mengalami perubahan fisik yang membuat konektor bekerja tidak maksimal dalam menghantarkan listrik atau dapat dikatakan listrik yang bertegangan tidak tersalurkan ke busi sehingga membuat temperatur *exhaust* tinggi dan dapat menyebabkan *derating*.

Penggantian konektor busi juga menjadi salah satu *action* yang akan dilakukan oleh tim operasi pada saat terjadi kondisi *derating* 30% dengan catatan jika pada kondisi temperatur *exhaust* dalam keadaan tinggi diikuti dengan *huntingnya* energi busi, maka konektor busi akan dilakukan penggantian baik hanya menukar dengan konektor bekas ataupun mengganti konektor baru.

Bab 5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengumpulan dan analisis data maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur *exhaust* memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja mesin gas Rolls-Royce di PLTMG Maxpower Cogindo Batam. Peningkatan temperatur *exhaust* yang melebihi *set point* dapat menyebabkan gangguan yaitu *derating* dan menyebabkan menurunnya daya keluaran mesin. Hal ini disebabkan oleh kondisi pembakaran yang tidak optimal, yang dapat mengakibatkan menurunnya efisiensi dan performa mesin.
2. Penelitian ini membandingkan nilai efisiensi dan *heat rate* antara kondisi temperatur *exhaust* normal dan kondisi *derating* 30%. Ditemukan bahwa saat kondisi *derating*, efisiensi mesin mengalami penurunan yang signifikan, sementara *heat rate* meningkat. Ini menunjukkan bahwa pengoperasian mesin pada temperatur *exhaust* yang tinggi tidak hanya mengurangi daya keluaran tetapi juga mengakibatkan unit tidak efisien dalam mengonsumsi bahan bakar.
3. Tindakan yang dilakukan untuk menangani tingginya temperatur *exhaust* adalah dengan melakukan *setting fuel rack*, pengecekan *history* pemakaian komponen yang dilihat dari *running hours* komponen, kemudian melakukan penggantian komponen seperti *prechamber*, *spark plug*, dan konektor busi.

5.2. Saran

Berikut ini saran yang diajukan untuk pengembangan lebih lanjut mengenai penelitian Pengaruh Temperatur *Exhaust* terhadap Kinerja Mesin Gas di PLTMG Maxpower Cogindo adalah:

1. Penelitian lebih lanjut dapat dikembangkan dengan mencari pengaruh variabel lain seperti kelembapan udara dan kualitas bahan bakar terhadap kinerja mesin gas, sehingga dapat lebih kompleks dalam melakukan penilaian kinerja mesin gas.
2. Pengumpulan data dengan parameter yang lebih lengkap agar hasil yang diperoleh dapat dibandingkan dan dianalisis keterkaitannya.

Daftar Pustaka

- [1] S. Ashraff, P. Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi Jurusan Teknik Elektro, and P. Negeri Lhokseumawe, "Studi Pengaruh Perubahan Temperatur Terhadap Kinerja Engine Pada Pltmg Panaran Pt. Bright Batam," *J. Tekro*, vol. 4, no. 2, pp. 149–153, 2020.
- [2] N. Fitria *et al.*, "Optimasi Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (Pltmg) Arun Dengan Sistem Homer Energi," *J. Tekro*, vol. 5, no. 1, p. 82, 2021.
- [3] P. A. Corporation, "Service Manual Service Manual," vol. 7, no. October, pp. 1–40, 2011.
- [4] U. M. A. Mesin, "PROSES-TERMODINAMIKA - rumus otto.pdf." pp. 33–41, 2020. [Online]. Available: <https://mesin.uma.ac.id/wp-content/uploads/2020/07/PROSES-TERMODINAMIKA.pdf>
- [5] U. Pltmg, A. Lhokseumawe Rosdiana, and R. A. Putra, "Evaluasi Low Exhaust Pada Mesin Wartsila 20V34SG Di PT Pjb," *J. Hadron*, vol. 1, pp. 8–12, 2019.
- [6] D. N. Sari, J. T. Mesin, F. Teknik, and U. Andalas, "ANALISIS PERFORMASI AKTUAL MESIN GAS ROLL ROYCE TIPE B35 : 40V20AG UNIT TIGA DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MESIN GAS PANARAN BATAM DAN PERBANDINGAN DENGAN," 2019.
- [7] Galih Agimnastiar Putra, "Identifikasi Tingginya Suhu Gas Buang pada Mesin Diesel Penggerak Utama Di KM. NGGAPULU," *Identifikasi tingginya suhu gas buang pada mesin diesel penggerak utama di KM. NGGAPULU*, 2022.
- [8] F. MUHAMMAD, "Analisis Teknis Dan Ekonomis Efek Rasio Kompresi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (Pltmg) Menggunakan Siklus Energi ...," p. 79, 2021.
- [9] M. K. YUNUS A.CENGEL, MICHAEL A. BOLES, *THERMODYNAMICS: AN ENGINEERING APPROACH*, Ninth edit., vol. 7, no. 2. New York: McGraw-Hill Education, 2020.
- [10] H. B. P. Parapa', "The Impact of Changes in Exhaust Temperature on the Power Output and Heat Rate of a Gas Turbine with a Capacity of 238 MW," *INTEK J. Penelit.*, vol. 8, no. 2, pp. 96–100, 2021.
- [11] IT Helpdesk, "Mengenal Ball Valve, Fungsi, dan Kelebihannya." [Online]. Available: <https://www.contromatic.co.id/valves/apa-itu-ball-valve/>
- [12] Samsul Arifin, "DERATING ADALAH KONDISI TAK NORMAL, MENORMALKAN KEMBALI MEMERLUKAN PENGETAHUAN, BIAYA DAN KEJUJURAN." [Online]. Available: <https://ikmalulhuda.wordpress.com/2012/04/02/derating-adalah-kondisi-tak-normal-menormalkan-kembali-memerlukan-pengetahuan->

- biaya-dan-kejujuran/
- [13] Ahmad Abdul Qodir, "HEAT RATE PEMBANGKIT LISTRIK." [Online]. Available: <https://aabdulqodir.wordpress.com/2015/01/10/heat-rate-power-plant/>
- [14] R. P. Chhabra, *CRC handbook of thermal engineering, Second edition*. 2017.
- [15] Mabruki Pudyas Salim, "Satuan Daya Listrik Adalah Watt, Pahami Rumus Menghitungnya," Jakarta, Aug. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.liputan6.com/hot/read/5370604/satuan-daya-listrik-adalah-watt-pahami-rumus-menghitungnya?page=2>

Biodata



Nama : Wulan N Hutapea
TTL : Batam, 04 Oktober 2002
Agama : Kristen Protestan
Alamat : Baloi Centre, Jl.Teratai 03 blok A no.21
Email : wulanhutapea2002@gmail.com
Riwayat Pendidikan :
SMA/SMK : SMAN 12 BATAM
SMP : SMPS ADVENT BATAM

Lampiran A

934
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-17

Ideal-gas properties of air

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg·K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg·K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.44	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	22.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						