

TUGAS AKHIR

ANALISIS KEGAGALAN *FUEL NOZZLE* TURBIN GAS PLTG GT 12 BELAWAN MENGGUNAKAN METODE *ROOT CAUSE* *ANALYSIS* (RCA)

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Mesin Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:

ARI SETYAWAN
2407230168P



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2026**

HALAMAN PENGESAHAN

Laporan penelitian Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Ari Setyawan
NPM : 2407230168P
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tugas Akhir : Analisis Kegagalan *Fuel Nozzle* Turbin Gas PLTG
GT 12 Belawan menggunakan Metode *Root Cause Analysis* (RCA)
Bidang ilmu : Konversi Energi

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

Medan, 03 Agustus 2026

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Penguji I



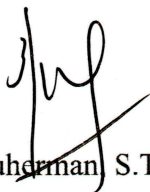
Dr. Munawar Alfansury Siregar, ST., M.T.

Dosen Penguji II



Chandra A Siregar, S.T., M.T.

Dosen Penguji III



Dr. Suherman, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Mesin
Ketua



Chandra A Siregar, S.T., M.T.

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertandatangan dibawah ini:

Nama Lengkap	: Ari Setyawan
NPM	: 2407230168P
Tempat/Tanggal Lahir	: Girimukti, 20 Agustus 1994
Fakultas	: Teknik
Program Studi	: Teknik Mesin

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

“ANALISIS KEGAGALAN *FUEL NOZZLE* TURBIN GAS PLTG GT 12 BELAWAN MENGGUNAKAN METODE *ROOT CAUSE ANALYSIS* (RCA)”

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

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

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

Medan, 03 Agustus 2026



Ari Setyawan

ABSTRAK

Fuel nozzle merupakan komponen kritis pada sistem pembakaran turbin gas yang berfungsi mengatomisasi bahan bakar agar tercampur secara homogen dengan udara di ruang bakar. Kegagalan pada komponen ini dapat menurunkan efisiensi pembakaran dan keandalan operasional unit. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi akar penyebab (*root cause*) kegagalan *fuel nozzle* pada turbin gas GT 12 Unit Pembangkit Belawan menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA). Data diperoleh melalui observasi lapangan, inspeksi visual, *Liquid Penetrant Test* (LPT), *Fuel Nozzle Spray Test*, data DCS, riwayat gangguan operasi, data jam operasi, serta data *performance test*. Hasil inspeksi menunjukkan kegagalan didominasi oleh retak pada ujung dan sambungan las *nozzle*, disertai deposit karbon dan pola semprotan tidak simetris. Perhitungan kinerja menunjukkan penurunan efisiensi termal sebesar 8,64% dan kenaikan konsumsi bahan bakar spesifik sebesar 9,43%. Analisis sebaran temperatur gas buang (*exhaust spread*) sebesar 21–23°C dengan anomali pada titik pengukuran tertentu membuktikan ketidakseragaman distribusi bahan bakar antar ruang bakar. Dari sisi keandalan, tercatat 10 kejadian *forced outage* dengan *availability* unit 72,1–81,7%. Analisis *Fishbone Diagram* dan *5 Why Analysis* mengidentifikasi akar penyebab utama berupa strategi pemeliharaan yang masih bersifat *time-based* dan belum disesuaikan dengan kondisi operasi aktual, sehingga akumulasi deposit karbon memicu konsentrasi tegangan termal dan retak pada *nozzle*. Rekomendasi utama yang diusulkan adalah penerapan *Condition-Based Maintenance* (CBM) dan penjadwalan rutin *fuel nozzle spray test* untuk mencegah kegagalan serupa di masa mendatang.

Kata kunci: *Fuel Nozzle*, Turbin Gas, Kegagalan, *Root Cause Analysis*, Efisiensi Termal, PLTG Belawan

ABSTRACT

The fuel nozzle is a critical component in a gas turbine combustion system, functioning to atomize fuel so that it mixes homogeneously with air inside the combustion chamber. Failure of this component can reduce combustion efficiency and the operational reliability of the unit. This study aims to identify the root cause of fuel nozzle failure in the GT 12 gas turbine at the Belawan Power Generation Unit using the Root Cause Analysis (RCA) method. Data were obtained through field observation, visual inspection, Liquid Penetrant Test (LPT), Fuel Nozzle Spray Test, DCS records, operational disturbance history, operating hours data, and performance test data. Inspection results show that the dominant failure mode is cracking at the nozzle tip and welding joint, accompanied by carbon deposits and asymmetric spray patterns. Performance calculations indicate a thermal efficiency decrease of 8.64% and an increase in specific fuel consumption of 9.43%. Exhaust temperature spread analysis (21–23°C), with anomalies at certain measurement points, confirms uneven fuel distribution among combustion chambers. In terms of reliability, 10 forced outage events were recorded, resulting in a unit availability of 72.1–81.7%. Fishbone Diagram and 5 Why Analysis identified the primary root cause as a time-based maintenance strategy that has not been adjusted to actual operating conditions, causing carbon deposit accumulation that triggers thermal stress concentration and cracking of the nozzle. The main recommendations proposed are the implementation of Condition-Based Maintenance (CBM) and routine scheduling of the Fuel Nozzle Spray Test to prevent similar failures in the future.

Keywords: *Fuel Nozzle, Gas Turbine, Failure, Root Cause Analysis, Thermal Efficiency, PLTG Belawan*

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “Analisis Kegagalan *Fuel Nozzle* Turbin Gas PLTG GT 12 Belawan menggunakan Metode *Root Cause Analysis* (RCA)” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terima kasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Bapak Dr. Suherman, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing I dan Penguji III yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr. Munawar Alfansury Siregar, ST., M.T. selaku Dosen Penguji I yang telah banyak koreksi dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Chandra A Siregar. ST., MT selaku Dosen Penguji II yang telah banyak koreksi dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.. Sekaligus sebagai Ketua Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak Ade Faisal, S.T.,M.Sc.,Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Seluruh Bapak/ Ibu Dosen di Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu keteknikmesinan kepada penulis.
6. Orang tua tercinta, ayahanda Alm Suharto dan ibunda Alfiah yang telah mendukung pendidikan penulis.
7. Manajemen PLN Nusantara Power UP Belawan dan UMRO UPHK Medan atas bantuan sumber penelitian.

8. Bapak/ Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
9. Para sahabat tercinta, keluarga di rumah yang telah banyak membantu dan memberikan semangat kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini

Laporan Tugas Akhir ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan untuk itu penulis berharap kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis di masa depan. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu keteknik-mesinan.

Medan, 03 Agustus 2026



ARI SETYAWAN

2407230168P

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR NOTASI	xiii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Ruang Lingkup	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.5.1 Manfaat Teoritis	4
1.5.2 Manfaat Praktis	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Tinjauan Umum Penelitian	6
2.2 <i>Fuel Nozzle</i> pada Turbin Gas	7
2.2.1 Pengertian <i>Fuel Nozzle</i>	7
2.2.2 Fungsi <i>Fuel Nozzle</i>	8
2.2.3 Prinsip Kerja <i>Fuel Nozzle</i>	9
2.2.4 Jenis-Jenis <i>Fuel Nozzle</i> dan Penggunaannya pada Turbin Gas	9
Pembangkit	9
2.2.5 Material <i>Fuel Nozzle</i>	11
2.3 Gangguan pada <i>Fuel Nozzle</i>	12
2.3.1 <i>Nozzle Clogging</i>	12
2.3.2 <i>Carbon Deposit</i>	13
2.3.3 Erosi	14
2.3.4 Korosi	15
2.3.5 <i>Thermal Fatigue</i> dan <i>Over Temperature</i>	15
2.3.6 Dampak Gangguan <i>Fuel Nozzle</i> terhadap Performa Turbin Gas	16
2.4 Analisis Kegagalan <i>Fuel Nozzle</i> menggunakan Metode <i>Root Cause Analysis (RCA)</i>	16
2.5 <i>Maintenance Fuel Nozzle</i>	18
2.5.1 Pengertian <i>Maintenance Fuel Nozzle</i>	18
2.5.2 <i>Preventive Maintenance</i>	19
2.5.3 <i>Corrective Maintenance</i>	20
2.5.4 <i>Predictive Maintenance</i>	20

2.5.5 Jadwal Inspeksi dan Siklus Penggantian Komponen <i>Fuel Nozzle</i>	21
2.5.6 Inspeksi <i>Fuel Nozzle</i>	23
2.5.7 <i>Cleaning Fuel Nozzle</i>	24
2.5.8 Penggantian Komponen <i>Fuel Nozzle</i>	25
2.5.9 Pengujian <i>Fuel Nozzle</i>	25
2.5.10 Prosedur <i>Maintenance Fuel Nozzle</i> pada PLTG	25
2.6 Penelitian Terdahulu	26
2.7 Kerangka Berpikir	29
2.8 Dasar Perhitungan Efisiensi Termal dan Keandalan Unit Pembangkit	30
BAB 3. METODE PENELITIAN	37
3.1 Tempat dan Waktu	37
3.2 Bahan dan Alat	41
3.3 Bagan Alir Penelitian	45
3.4 Rancangan Alat Penelitian	48
3.5 Prosedur Penelitian	50
3.6 Variabel yang akan Diteliti	53
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1 Hasil Pengumpulan Data	55
4.1.1 Data Kegagalan Tidak Langsung pada <i>Fuel Nozzle</i>	55
4.1.2 Data Penggunaan Bahan Bakar	64
4.1.3 Data Visual Kondisi <i>Fuel Nozzle</i>	67
4.1.4 Data Hasil <i>Liquid Penetrant Test</i> (LPT)	73
4.1.5 Data <i>Inspection Fuel Nozzle Spray Test</i>	78
4.1.6 Data Jam Operasi (<i>Operating Hours</i>)	82
4.1.7 Data <i>Performance Test</i>	85
4.1.8 Data Pengukuran Dimensi <i>Fuel Nozzle</i>	87
4.1.9 Data Diskusi dengan Tim Pemeliharaan UP Belawan dan Tim OH UMRO	88
4.2 Analisis dan Pembahasan Data Kegagalan <i>Fuel Nozzle</i>	90
4.2.1 Perhitungan Efisiensi Termal dan Dampak terhadap Kinerja Unit	90
4.2.2 Analisis Sebaran Temperatur Gas Buang (<i>Exhaust Temperature Spread</i>)	94
4.2.3 Perhitungan Indikator Keandalan (<i>Downtime</i> , MTBF, MTTR, dan <i>Availability</i>)	95
4.2.4 Pembahasan Korelasi Antar Data	98
4.3 Analisis <i>Root Cause Analysis</i> (RCA)	100
4.3.1 Fishbone Diagram (Diagram Ishikawa)	100
4.3.2 <i>5 Why Analysis</i>	101
4.3.3 Ringkasan Hasil Analisis	103
4.4 Rekomendasi Perbaikan	103

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	107
5.1 Kesimpulan	107
5.2 Saran	108
DAFTAR PUSTAKA	111
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Periode Inspeksi <i>Fuel Nozzle</i>	22
Tabel 2. Scope Pekerjaan Masing-Masing <i>Overhaul</i>	23
Tabel 3. Penelitian Terdahulu	26
Tabel 4. Jadwal Pelaksanaan Penelitian	40
Tabel 5. Log Gangguan <i>Operasi Liquid Fuel Pressure Low Saat Proses Start UP</i>	55
Tabel 6. Hasil Pengujian <i>Liquid Penetrant Test</i>	74
Tabel 7. Tabel <i>Performance Test</i> PLTG GT 12	86
Tabel 8. Perhitungan <i>Spread Temperatur Gas Buang (Exhaust Temperature 1–6)</i>	94
Tabel 9. Rekapitulasi Durasi dan Kategori Gangguan GT 12 Belawan (Jan 2024 – Apr 2025)	95
Tabel 10. Identifikasi Penyebab Kegagalan <i>Fuel Nozzle</i> Berdasarkan Kategori Fishbone	101
Tabel 11. <i>5 Why Analysis</i>	102
Tabel 12. Rekomendasi Tindakan Korektif dan Preventif	104

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Fuel Nozzle Assembly</i> (Qty.14)	8
Gambar 2.2 <i>Fuel Nozzle</i> Mengalami <i>Clogging</i>	13
Gambar 2.3 <i>Fuel Nozzle</i> Mengalami <i>Carbon Deposit</i>	14
Gambar 2.4 <i>Fuel Nozzle</i> Mengalami Erosi	14
Gambar 2.5 <i>Fuel Nozzle</i> Mengalami Retakan pada Sambungan Las	15
Gambar 2.6 <i>Scope</i> Pekerjaan Jadwal <i>Overhaul</i>	22
Gambar 2.7 Periode Penggantian <i>Fuel Nozzle</i>	22
Gambar 3.1 Lokasi PT PLN Nusantara Power UP Belawan	39
Gambar 3.2 Bagan Diagram Alir	46
Gambar 4.1 Tampilan DCS <i>Alarm Liquid Pressure Low</i>	57
Gambar 4.2 Grafik Jumlah Alarm Muncul Saat Dilakukan <i>Start Up</i> Unit PLTG	57
Gambar 4.3 Diagram Alur Identifikasi Gangguan dan Perbaikan	58
Gambar 4.4 Tampilan DCS Parameter Operasi	59
Gambar 4.5 Grafik Tekanan Bahan Bakar	59
Gambar 4.6 <i>Pressure Indicator</i> pada <i>Pipe Fuel Oil</i>	60
Gambar 4.7 Grafik Trend Parameter Temperatur	61
Gambar 4.8 Analisis Hubungan <i>Alarm Liquid Fuel Pressure Low</i> dengan Kegagalan <i>Fuel Nozzle</i>	63
Gambar 4.9 Grafik <i>Trend Fuel Consumption</i> vs <i>NPHR</i>	64
Gambar 4.10 <i>Fuel Nozzle Ex Part</i> PLTG GT 12	68
Gambar 4.11 Batang <i>Fuel Nozzle</i> Mengalami Perubahan Warna	68
Gambar 4.12 Perubahan Warna Pada Sambungan <i>Fuel Nozzle</i>	69
Gambar 4.13 Deposit Karbon pada Ujung <i>Fuel Nozzle</i>	69
Gambar 4.14 Perubahan Warna Pada <i>Tip Fuel Nozzle</i>	70
Gambar 4.15 Ulir <i>Fuel Nozzle</i> Mengalami Kerusakan	70
Gambar 4.16 <i>Tip Fuel Nozzle</i> dengan <i>Body Fuel Nozzle</i> Tidak Simetris	71
Gambar 4.17 Hasil <i>Liquid Penetrant Test Fuel Nozzle</i>	73
Gambar 4.18 Inspeksi <i>Fuel Nozzle Spray Test</i>	78
Gambar 4.19 Grafik Durasi Gangguan Pembangkit vs Durasi Operasi	82
Gambar 4.20 Grafik Pemantauan Parameter <i>Temperature Engine</i>	87
Gambar 4.21 Pengukuran Dimensi <i>Fuel Nozzle</i>	88
Gambar 4.22 <i>Flow Mechanism</i> Kegagalan <i>Fuel Nozzle</i> GT 12 Belawan	98
Gambar 4.23 Fishbone Diagram Penyebab Kegagalan <i>Fuel Nozzle</i>	100

DAFTAR NOTASI

$Availability_{total}$ = Total tingkat ketersediaan unit (%)

Fuel Gas = Konsumsi bahan bakar gas (MMBtu)

$Fuel_{aktual}$ = Konsumsi bahan bakar aktual (MMBtu)

$Fuel_{baseline}$ = Konsumsi bahan bakar kondisi baseline ((MMBtu)

GPHR = *Gross Plant Heat Rate Aktual* (kkal/kWh)

$GPHR_{baseline}$ = Laju panas kotor pembangkit *baseline* (kkal/kWh)

$GPHR_{baseline}$ = Laju panas kotor pembangkit aktual (kkal/kWh)

MTBF = *Mean Time Between Failures* (jam atau hari)

MTTR = *Mean Time To Repair* (jam atau hari)

NPHR= *Net Plant Heat Rate* (kkal/kWh)

$NPHR_{aktual}$ = Efisiensi termal pada kondisi riil/operasional aktual (kkal/kWh)

$NPHR_{baseline}$ = Efisiensi termal pada kondisi acuan/komisioning (kkal/kWh)

n_{th} = Persentase penurunan efisiensi termal (%)

T_{aktual} = Jam Operasi / Jam Kerja Aktual (jam)

$T_{standar}$ = Jam Kerja Standar/Target (jam)

BAB 1. **PENDAHULUAN**

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan Energi listrik menjadi salah satu kebutuhan utama dalam mendukung berbagai sektor seperti industri, transportasi, pendidikan, kesehatan, dan infrastruktur. Kondisi tersebut menyebabkan sistem pembangkitan tenaga listrik dituntut mampu menyediakan suplai energi listrik yang andal, efisien, dan berkesinambungan. Untuk menjaga stabilitas sistem tenaga listrik nasional, diperlukan unit pembangkit yang memiliki keandalan dan cepat dalam melakukan *start-up* yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG).

Pada PLTG, energi panas hasil pembakaran bahan bakar dimanfaatkan untuk memutar turbin gas yang kemudian menggerakkan generator listrik. Keandalan turbin gas sangat dipengaruhi oleh kondisi sistem pembakaran (*combustion system*) yang bekerja pada temperatur dan tekanan tinggi secara kontinu. Sistem pembakaran (*combustion system*) pada turbin gas memiliki fungsi penting sebagai tempat terjadinya proses pencampuran udara bertekanan dengan bahan bakar untuk menghasilkan energi panas (Yousefabad et al., 2019).

Salah satu komponen utama dalam *combustion system* adalah *fuel nozzle*. *Fuel nozzle* berfungsi mengatomisasi dan mendistribusikan bahan bakar ke ruang bakar (*combustion chamber*) agar proses pencampuran dengan udara berlangsung secara homogen. Kualitas atomisasi bahan bakar sangat mempengaruhi kestabilan pembakaran, distribusi temperatur, efisiensi turbin gas, serta emisi gas buang yang dihasilkan. *Fuel nozzle* bekerja pada kondisi temperatur tinggi dan mengalami kontak langsung dengan proses pembakaran, sehingga rentan mengalami gangguan maupun kerusakan material. Gangguan yang sering terjadi pada *fuel nozzle* meliputi *carbon deposit*, *nozzle clogging*, erosi, korosi, *over temperature*, dan retakan akibat *thermal fatigue* (Kraftwerk Union AG, 1988).

Pada unit pembangkit PLTG GT 12 Belawan, gangguan pada *fuel nozzle* masih menjadi salah satu permasalahan yang sering ditemukan selama proses

operasi dan *maintenance* turbin gas. Berdasarkan data *maintenance* dan hasil inspeksi lapangan, ditemukan beberapa bentuk kerusakan berupa penumpukan karbon (*carbon deposit*), perubahan bentuk *nozzle tip*, retak pada sambungan las dan perubahan warna material yang secara mekanisme merupakan satu rangkaian sebab-akibat, bukan kerusakan yang berdiri sendiri-sendiri. Rangkaian tersebut bermula dari proses *coking*, yaitu dekomposisi termal bahan bakar yang tidak terbakar sempurna pada permukaan logam bersuhu tinggi, sehingga terbentuk endapan karbon yang mengubah geometri *nozzle tip* dan mengganggu atomisasi bahan bakar. Atomisasi yang tidak merata ini menimbulkan variasi rasio udara-bahan bakar (*Air-Fuel Ratio/AFR*) di dalam ruang bakar yang secara langsung memicu ketidakseimbangan distribusi pembakaran (tercermin dari kenaikan *exhaust temperature spread*) dan menciptakan titik panas lokal (*hot spot*) pada permukaan *nozzle*. Paparan panas siklis dari *hot spot* inilah yang menyebabkan oksidasi permukaan (perubahan warna material) sekaligus menjadi beban termal berulang (*cyclic thermal loading*) bagi material tahan panas (*superalloy*) penyusun *nozzle*, yang pada gilirannya mempercepat inisiasi retak pada titik konsentrasi tegangan seperti sambungan las dan ulir *fuel nozzle*.

Penelitian mengenai kegagalan *fuel nozzle* sebelumnya telah banyak dilakukan, namun sebagian besar penelitian hanya membahas aspek *maintenance* dan gangguan operasional *combustion system* secara umum. Penelitian yang dilakukan oleh Mazur et al. (2005) membahas kegagalan *nozzle* turbin gas akibat temperatur tinggi dan *thermal fatigue* menggunakan pendekatan analisis material. Sementara itu, penelitian Lefebvre dan Ballal (2010) lebih fokus pada karakteristik pembakaran dan atomisasi bahan bakar pada *combustion system* turbin gas. Namun demikian, penelitian yang secara khusus menganalisis kegagalan *fuel nozzle* berdasarkan pendekatan *Root Cause Analysis* (RCA) pada unit ini masih sangat terbatas.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kegagalan *fuel nozzle* turbin gas pada PLTG GT 12 Belawan menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA). Metode RCA digunakan

untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan *fuel nozzle* berdasarkan data operasional dan *maintenance*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai jenis gangguan yang terjadi, faktor penyebab kegagalan *fuel nozzle*, dampak kerusakan terhadap performa *combustion system*, serta rekomendasi *maintenance* yang tepat untuk meningkatkan keandalan operasi turbin gas pada PLTG GT 12 Belawan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Apa jenis gangguan yang terjadi pada *fuel nozzle* turbin gas Siemens KWU di PLTG GT 12 Belawan?
2. Bagaimana pengaruh gangguan *fuel nozzle* terhadap performa *combustion system* turbin gas ditinjau dari parameter operasional seperti *exhaust temperature spread*, kestabilan pembakaran, dan efisiensi turbin gas?
3. Apa faktor penyebab utama kerusakan *fuel nozzle* berdasarkan metode *Root Cause Analysis* (RCA), Fishbone Diagram, dan data operasional turbin gas?
4. Bagaimana metode *maintenance* dan tindakan perbaikan yang tepat untuk meningkatkan keandalan *fuel nozzle* pada turbin gas Siemens KWU di PLTG GT 12 Belawan?

1.3 Ruang Lingkup

Penulis membatasi masalah agar menghindari meluasnya penelitian ini. Adapun batasan masalah pada penelitian ini, antara lain:

1. Fokus Lokasi dan Unit Pembangkit: Studi ini berpusat pada PLTG GT 12 Unit Pembangkit Belawan.
2. Komponen Utama: Objek utama studi adalah *fuel nozzle* sebagai bagian dari sistem pembakaran turbin gas.
3. Jenis Gangguan: Studi mengidentifikasi dan menganalisis jenis-jenis gangguan spesifik pada *fuel nozzle* (penyumbatan, erosi, *coking*, atau keausan).
4. Metode Analisis: Metode analisis mencakup telaah literatur, analisis data operasional, dan wawancara dengan teknisi.

5. Aspek yang Dikaji: Mengkaji penyebab, mekanisme gangguan, dampak terhadap performa PLTG (efisiensi, emisi, ketersediaan unit), serta langkah-langkah penanganan yang telah atau dapat diterapkan.
6. Output Studi: Hasil studi berupa identifikasi masalah, analisis penyebab, evaluasi dampak, dan rekomendasi teknis.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penulisan ini adalah untuk mengetahui dan mempelajari analisis gangguan *fuel nozzle*, antara lain:

1. Mengetahui jenis gangguan yang terjadi pada *fuel nozzle* Siemens KWU di PLTG GT 12 Belawan berdasarkan hasil inspeksi, data operasional dan data *maintenance*.
2. Mengetahui pengaruh gangguan *fuel nozzle* terhadap performa *combustion system* dan operasional turbin gas berdasarkan parameter performa pembakaran.
3. Menganalisis faktor penyebab utama kerusakan *fuel nozzle* menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA).
4. Menentukan metode *maintenance* dan rekomendasi perbaikan yang tepat untuk meningkatkan keandalan dan umur pakai *fuel nozzle* pada turbin gas Siemens KWU di PLTG GT 12 Belawan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian mengenai analisis kegagalan *fuel nozzle* turbin gas Siemens KWU di PLTG GT 12 Belawan menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA) diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis. Adapun manfaat penelitian ini, antara lain:

1.5.1 Manfaat Teoritis

1. Menambah referensi ilmiah mengenai analisis kegagalan (*failure analysis*) *fuel nozzle* pada sistem pembakaran turbin gas, khususnya pada turbin gas Siemens KWU.

2. Memberikan kontribusi akademik dalam pengembangan ilmu teknik mesin dan teknik pembangkit terkait *combustion system* dan *fuel nozzle* pada komponen turbin gas.
3. Menjadi sumber kajian mengenai hubungan antara gangguan *fuel nozzle*, performa pembakaran, dan perubahan struktur material akibat temperatur operasi tinggi pada turbin gas.
4. Menambah referensi penelitian terkait penerapan metode *Root Cause Analysis* (RCA), Fishbone Diagram, dan analisis metalurgi dalam mengidentifikasi penyebab kegagalan komponen turbin gas.
5. Menjadi bahan acuan bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan *maintenance*, analisis kerusakan material, dan peningkatan keandalan *combustion system* pada pembangkit listrik tenaga gas.

1.5.2 Manfaat Praktis

1. Memberikan informasi teknis mengenai jenis gangguan dan penyebab kegagalan *fuel nozzle* berdasarkan hasil inspeksi dan data operasional.
2. Memberikan rekomendasi *maintenance* dan tindakan perbaikan yang dapat digunakan untuk meningkatkan keandalan (*reliability*) *fuel nozzle* dan *combustion system* turbin gas.
3. Membantu mengurangi risiko terjadinya *combustion instability*, *hot spot*, dan peningkatan *exhaust temperature spread* akibat gangguan *fuel nozzle*.
4. Menjadi bahan evaluasi dalam menentukan interval inspeksi, *cleaning*, dan penggantian *fuel nozzle* untuk meningkatkan efektivitas *maintenance* turbin gas.
5. Membantu meningkatkan kontinuitas operasi dan efisiensi pembangkit melalui pengurangan potensi *forced outage* akibat kerusakan *fuel nozzle*.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum Penelitian

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan salah satu jenis pembangkit yang menggunakan turbin gas sebagai penggerak utama generator listrik. Pada turbin gas, energi panas hasil pembakaran bahan bakar diubah menjadi energi mekanik untuk memutar turbin dan menghasilkan energi listrik. PLTG banyak digunakan sebagai pembangkit beban puncak karena memiliki waktu *start-up* yang cepat dan fleksibilitas operasi yang tinggi (Patoding & Sau, 2019).

Turbin gas bekerja berdasarkan prinsip siklus Brayton yang terdiri dari proses kompresi udara, pembakaran bahan bakar, dan ekspansi gas panas pada turbin. Udara atmosfer dikompresi oleh kompresor kemudian dialirkan menuju *combustion chamber* untuk dicampur dengan bahan bakar. Hasil pembakaran menghasilkan gas panas bertekanan tinggi yang digunakan untuk memutar *turbine section* (Syammary et al., 2020).

Pada turbin gas Siemens KWU, sistem pembakaran atau *combustion system* memiliki fungsi penting dalam menjaga kestabilan proses pembakaran dan distribusi temperatur pada *combustion chamber*. *Combustion system* terdiri dari beberapa komponen utama seperti *combustion liner*, *transition piece*, *igniter*, *crossfire tube*, dan *fuel nozzle* (Boyce, 2012).

Fuel nozzle menjadi salah satu komponen penting pada *combustion system* karena berfungsi mengatomisasi dan mendistribusikan bahan bakar ke ruang bakar. Kualitas penyemprotan bahan bakar sangat mempengaruhi kestabilan nyala api, distribusi temperatur pembakaran, efisiensi turbin gas, dan emisi gas buang (Boyce, 2012).

Pada kondisi operasi kontinu dengan temperatur tinggi, *fuel nozzle* rentan mengalami gangguan seperti *carbon deposit*, *nozzle clogging*, erosi, korosi, dan *thermal fatigue*. Gangguan tersebut dapat menyebabkan *combustion instability*, peningkatan *exhaust temperature spread*, serta penurunan performa turbin gas. Oleh karena itu, diperlukan analisis kegagalan *fuel nozzle* untuk mengetahui

penyebab utama kerusakan dan menentukan metode *maintenance* yang tepat guna meningkatkan *reliability combustion system* pada turbin gas Siemens KWU (Saravanamuttoo et al., 2013).

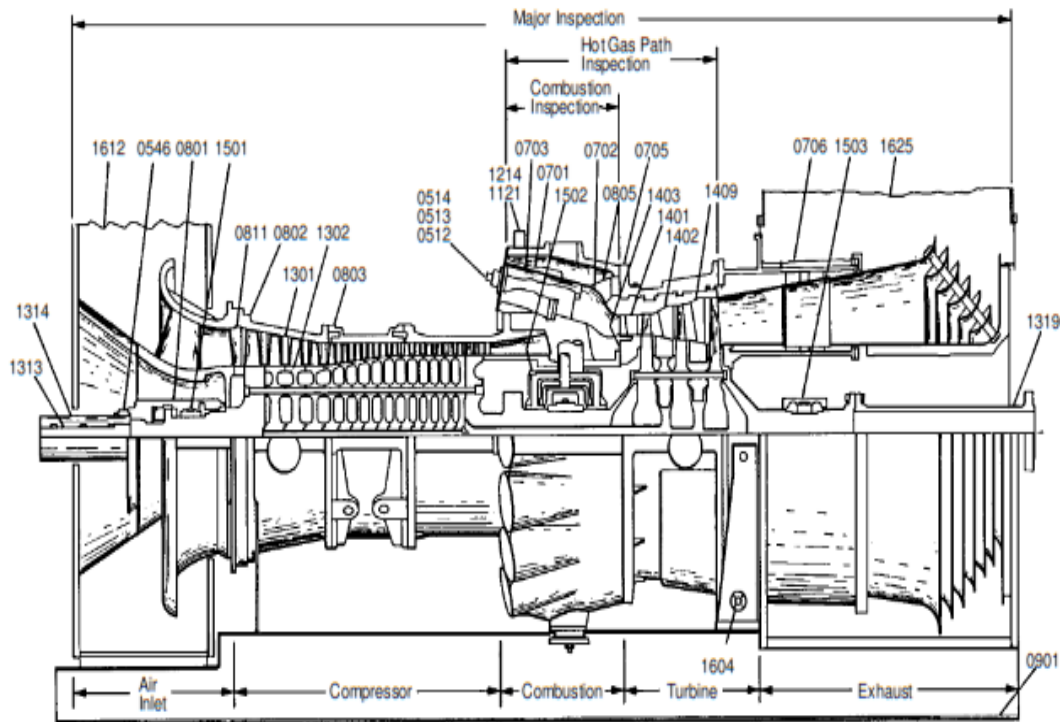
2.2 *Fuel Nozzle* pada Turbin Gas

2.2.1 Pengertian *Fuel Nozzle*

Fuel nozzle merupakan salah satu komponen utama dalam sistem pembakaran turbin gas yang berfungsi untuk mengabutkan (*atomizing*) dan mendistribusikan bahan bakar ke dalam *combustion chamber* agar proses pembakaran berlangsung secara sempurna dan stabil. *Fuel nozzle* bekerja dengan cara mengubah bahan bakar cair maupun gas menjadi partikel-partikel halus, sehingga mudah bercampur dengan udara bertekanan tinggi dari kompresor. Kualitas atomisasi bahan bakar sangat menentukan kestabilan nyala api, efisiensi pembakaran, temperatur ruang bakar, serta emisi gas buang yang dihasilkan oleh turbin gas (Lefebvre & Ballal, 2010; Boyce, 2012).

Pada turbin gas modern seperti Siemens KWU, *fuel nozzle* dirancang untuk mampu bekerja pada kondisi temperatur dan tekanan tinggi secara kontinu. *Fuel nozzle* harus memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi, getaran, tekanan operasi, serta pengaruh korosi dan oksidasi akibat proses pembakaran. Oleh karena itu, desain dan material *fuel nozzle* menjadi faktor penting dalam menjaga performa dan keandalan sistem pembakaran turbin gas (Kraftwerk Union AG, 1988).

Fuel nozzle menjadi komponen yang sangat kritis karena berhubungan langsung dengan proses pembakaran. Gangguan kecil pada *fuel nozzle* dapat menyebabkan ketidakseimbangan pembakaran, peningkatan temperatur lokal, flame instability, hingga kerusakan pada komponen turbin lainnya. Dengan demikian, kondisi *fuel nozzle* harus selalu dipantau melalui inspeksi dan *maintenance* secara berkala agar performa pembangkit tetap optimal (Razak, 2007).



Gambar 2. 1 Fuel Nozzle Assembly (Qty.14)

2.2.2 Fungsi Fuel Nozzle

Fuel nozzle memiliki beberapa fungsi utama dalam sistem pembakaran turbin gas, yaitu:

1. Mengabutkan bahan bakar menjadi partikel halus (atomisasi).
2. Mengatur pola penyemprotan bahan bakar ke ruang bakar.
3. Menjaga distribusi campuran udara dan bahan bakar agar merata.
4. Membantu menghasilkan pembakaran yang stabil dan efisien.
5. Mengontrol laju aliran bahan bakar sesuai kebutuhan beban turbin gas.
6. Mengurangi pembentukan emisi gas buang akibat pembakaran tidak sempurna.

Dalam proses pembakaran, *fuel nozzle* harus mampu menghasilkan pola semprotan bahan bakar yang sesuai dengan desain *combustion chamber*. Ketidaksesuaian pola penyemprotan dapat menyebabkan distribusi temperatur tidak merata, sehingga timbul *hot spot* pada *combustion liner* maupun *turbine blade* (Lefebvre & Ballal, 2010).

2.2.3 Prinsip Kerja *Fuel Nozzle*

Prinsip kerja *fuel nozzle* didasarkan pada proses atomisasi bahan bakar. Bahan bakar yang dialirkan melalui sistem bahan bakar akan memasuki *fuel nozzle* dengan tekanan tertentu. Selanjutnya bahan bakar dipaksa melewati lubang *nozzle* yang berdiameter kecil, sehingga menghasilkan semprotan bahan bakar berbentuk kabut halus.

Proses atomisasi bertujuan untuk memperbesar luas permukaan bahan bakar, sehingga pencampuran dengan udara menjadi lebih cepat dan homogen. Semakin kecil ukuran partikel bahan bakar, maka proses penguapan dan pembakaran akan semakin baik. Hal ini akan meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi pembentukan karbon maupun asap hasil pembakaran (Boyce, 2012).

Pada turbin gas tipe *heavy duty* seperti Frame 9, *fuel nozzle* dapat menggunakan sistem dual fuel yaitu bahan bakar gas dan bahan bakar cair. Saat menggunakan bahan bakar cair, proses atomisasi biasanya dibantu oleh udara atomisasi (*atomizing air*) agar distribusi bahan bakar menjadi lebih merata. Sedangkan, pada bahan bakar gas, *fuel nozzle* berfungsi mengarahkan aliran gas menuju zona pembakaran dengan pola tertentu (Kraftwerk Union AG, 1988).

2.2.4 Jenis-Jenis *Fuel Nozzle* dan Penggunaannya pada Turbin Gas Pembangkit

Fuel nozzle pada turbin gas memiliki beberapa jenis berdasarkan metode atomisasi dan jenis bahan bakar yang digunakan, antara lain:

1. *Pressure Atomizing Nozzle*

Pressure atomizing fuel nozzle merupakan jenis *fuel nozzle* yang menggunakan tekanan bahan bakar untuk menghasilkan proses atomisasi. Pada sistem ini, bahan bakar dialirkan melalui saluran *nozzle* dengan tekanan tinggi, sehingga keluar dalam bentuk partikel halus (*fuel mist*). Proses atomisasi terjadi akibat perbedaan tekanan antara bahan bakar dan udara di dalam *combustion chamber*. Jenis *nozzle* ini banyak digunakan pada turbin gas generasi awal karena memiliki konstruksi yang relatif sederhana dan mudah dalam proses *maintenance*.

Pada turbin gas pembangkit, *pressure atomizing nozzle* umumnya digunakan pada unit turbin gas berbahan bakar *liquid fuel* seperti *High Speed Diesel* (HSD) atau *distillate oil*. Turbin gas tipe lama seperti beberapa unit GE Frame 5 dan GE

Frame 6 masih menggunakan sistem atomisasi berbasis tekanan bahan bakar. Kelebihan *nozzle* jenis ini adalah konstruksi sederhana dan biaya operasi yang relatif rendah, namun kualitas atomisasi sangat bergantung pada tekanan bahan bakar. Apabila tekanan bahan bakar menurun maka ukuran partikel bahan bakar menjadi lebih besar, sehingga pembakaran kurang sempurna dan meningkatkan risiko terbentuknya *carbon deposit* pada *nozzle tip* (Boyce, 2012).

2. *Air Atomizing Nozzle*

Air atomizing fuel nozzle merupakan jenis *nozzle* yang menggunakan udara bertekanan sebagai media bantu atomisasi bahan bakar. Pada sistem ini, udara atomisasi dicampurkan dengan bahan bakar sebelum keluar dari *nozzle*, sehingga menghasilkan partikel bahan bakar yang lebih halus dan merata dibandingkan *pressure atomizing nozzle*. Kualitas atomisasi yang lebih baik membuat proses pembakaran menjadi lebih stabil serta menghasilkan distribusi temperatur yang lebih merata pada *combustion chamber*.

Jenis *nozzle* ini banyak digunakan pada turbin gas modern karena mampu menghasilkan efisiensi pembakaran yang lebih tinggi dan mengurangi pembentukan emisi gas buang. Pada turbin gas GE Frame 9E dan beberapa unit *Siemens* serta *Mitsubishi Heavy Industries* (MHI), *air atomizing nozzle* digunakan pada operasi *dual fuel* maupun *liquid fuel operation*. Sistem ini biasanya didukung oleh *atomizing air compressor* atau *atomizing air system* untuk menjaga kualitas spray pattern selama operasi turbin gas. Meskipun, memiliki performa atomisasi yang lebih baik, namun *nozzle* jenis ini memiliki sistem yang lebih kompleks dan memerlukan *maintenance* lebih intensif dibandingkan *pressure atomizing nozzle* (Kraftwerk Union AG, 1988).

3. *Dual Fuel Nozzle*

Dual fuel nozzle merupakan jenis *fuel nozzle* yang dirancang untuk dapat menggunakan dua jenis bahan bakar, yaitu *gas fuel* dan *liquid fuel*. Sistem ini banyak digunakan pada turbin gas pembangkit modern karena memberikan fleksibilitas operasi yang tinggi sesuai ketersediaan bahan bakar di lapangan. Pada kondisi normal, turbin gas biasanya beroperasi menggunakan natural gas karena lebih bersih dan efisien. Namun, apabila pasokan gas terganggu maka sistem dapat

dialihkan menggunakan *liquid fuel* seperti HSD tanpa menghentikan operasi turbin gas.

Turbin gas Siemens KWU yang digunakan pada PLTG Belawan menggunakan sistem *dual fuel nozzle* untuk mendukung fleksibilitas operasi pembangkit. *Nozzle* jenis ini memiliki konstruksi yang lebih kompleks karena terdiri dari jalur bahan bakar gas dan *liquid fuel* dalam satu *nozzle assembly*. Penggunaan *dual fuel nozzle* membantu meningkatkan *reliability* pembangkit dan menjaga kontinuitas operasi sistem tenaga listrik. Akan tetapi, *nozzle* jenis ini lebih rentan mengalami *carbon deposit* pada jalur *liquid fuel* terutama apabila kualitas atomisasi tidak optimal atau *maintenance* tidak dilakukan secara berkala (Razak, 2007).

4. *Dry Low NOx (DLN)*

Dry Low NOx (DLN) fuel nozzle merupakan jenis *nozzle* yang dirancang untuk mengurangi emisi nitrogen oksida (NO_x) pada proses pembakaran turbin gas. Sistem DLN bekerja dengan prinsip *lean premix combustion*, yaitu mencampurkan udara dan bahan bakar sebelum proses pembakaran, sehingga temperatur nyala api menjadi lebih rendah dan pembentukan NO_x dapat dikurangi.

Fuel nozzle tipe DLN banyak digunakan pada turbin gas generasi modern seperti GE Frame 9E, Siemens SGT series, dan Mitsubishi M701 series. Penggunaan DLN *nozzle* sangat penting pada pembangkit modern karena tuntutan regulasi lingkungan yang semakin ketat terhadap emisi gas buang. Meskipun, mampu menurunkan emisi NO_x secara signifikan, namun *nozzle* tipe DLN memiliki sensitivitas tinggi terhadap gangguan distribusi bahan bakar dan *combustion instability*. Oleh karena itu, *maintenance* dan *monitoring combustion system* pada *nozzle* tipe DLN harus dilakukan secara lebih ketat dibandingkan *nozzle* konvensional (Hwang et al., 2023).

2.2.5 Material Fuel Nozzle

Fuel nozzle dibuat dari material tahan temperatur tinggi karena bekerja secara langsung pada area *combustion chamber*. Material yang umum digunakan berupa *nickel based alloy*, *stainless steel* tahan panas, *cobalt alloy*. Material tersebut dipilih

karena memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi, oksidasi, korosi, *thermal fatigue*.

2.3 Gangguan pada *Fuel Nozzle*

Fuel nozzle merupakan komponen *combustion system* yang bekerja secara langsung pada lingkungan temperatur dan tekanan tinggi, sehingga memiliki risiko mengalami gangguan maupun kerusakan selama operasi turbin gas. Gangguan pada *fuel nozzle* dapat mempengaruhi kualitas atomisasi bahan bakar, distribusi temperatur pembakaran, kestabilan nyala api, serta performa turbin gas secara keseluruhan. Kondisi *fuel nozzle* yang tidak optimal dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna dan meningkatkan risiko kerusakan pada komponen *hot gas path* lainnya (Kraftwerk Union AG, 1988).

Gangguan *fuel nozzle* pada turbin gas umumnya dipengaruhi oleh temperatur operasi tinggi, kualitas bahan bakar, kondisi operasional turbin gas, serta ketidaksesuaian *maintenance combustion system*. Pada turbin gas Siemens KWU, beberapa gangguan yang sering terjadi pada *fuel nozzle* meliputi *carbon deposit*, *nozzle clogging*, erosi, korosi, *thermal fatigue*, dan *over temperature*. Gangguan tersebut dapat terjadi secara bertahap dan menyebabkan perubahan pola penyemprotan bahan bakar (*spray pattern*) (Boyce, 2012).

2.3.1 *Nozzle Clogging*

Nozzle clogging merupakan kondisi tersumbatnya saluran *fuel nozzle* akibat *carbon deposit* atau kontaminasi bahan bakar. Gangguan ini menyebabkan debit bahan bakar yang keluar dari *nozzle* menjadi tidak merata, sehingga pola penyemprotan bahan bakar mengalami perubahan. Ketidakseimbangan distribusi bahan bakar dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna dan menimbulkan *combustion instability* (Razak, 2007).

Indikasi *nozzle clogging* pada turbin gas, antara lain peningkatan *exhaust temperature spread*, *flame instability*, kenaikan *combustion vibration*, penurunan performa turbin gas, dan perubahan warna api pembakaran. Apabila *nozzle clogging* tidak segera ditangani, maka dapat menyebabkan peningkatan temperatur

pada *combustion liner* dan *turbine nozzle*, sehingga mempercepat kerusakan komponen *hot gas path* (Kraftwerk Union AG, 1988).



Gambar 2. 2 *Fuel Nozzle* Mengalami *Clogging*

2.3.2 *Carbon Deposit*

Carbon deposit merupakan penumpukan karbon pada permukaan *fuel nozzle* akibat pembakaran tidak sempurna dan proses atomisasi bahan bakar yang kurang optimal. Deposit karbon biasanya terbentuk pada *nozzle tip* dan saluran bahan bakar akibat temperatur tinggi serta kualitas bahan bakar yang kurang baik. Penumpukan karbon yang terus meningkat dapat menyebabkan penyumbatan saluran bahan bakar dan mengganggu distribusi bahan bakar ke *combustion chamber* (Lefebvre & Ballal, 2010).

Faktor penyebab *carbon deposit*, meliputi kualitas bahan bakar yang rendah, atomisasi bahan bakar tidak sempurna, temperatur operasi tinggi, rasio udara dan bahan bakar tidak seimbang, dan *maintenance fuel nozzle* yang tidak optimal. *Carbon deposit* dapat menyebabkan pembakaran menjadi tidak stabil dan meningkatkan *exhaust temperature spread* pada turbin gas. Selain itu, penumpukan karbon juga dapat mempercepat kerusakan *nozzle tip* akibat peningkatan (Lefebvre & Ballal, 2010).

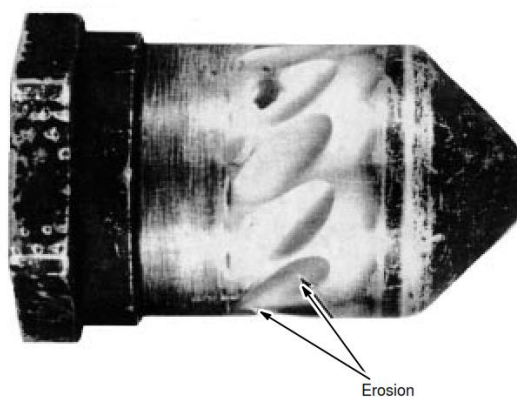


Gambar 2. 3 *Fuel Nozzle Mengalami Carbon Deposit*

2.3.3 Erosi

Erosi pada *fuel nozzle* terjadi akibat gesekan partikel padat atau aliran bahan bakar berkecepatan tinggi yang terus-menerus mengenai permukaan *nozzle*. Erosi biasanya terjadi pada *nozzle tip* dan *spray hole*, sehingga menyebabkan perubahan dimensi saluran bahan bakar dan pola atomisasi (Boyce, 2012).

Kerusakan akibat erosi dapat menyebabkan perubahan *spray pattern*, distribusi bahan bakar tidak merata, peningkatan konsumsi bahan bakar, penurunan efisiensi pembakaran, dan ketidakseimbangan temperatur *combustion chamber*. Laju erosi dipengaruhi oleh kualitas bahan bakar, kandungan partikel asing, tekanan bahan bakar, dan temperatur operasi turbin gas (Razak, 2007).



Outside View of Eroded Inner Tip

Gambar 2. 4 *Fuel Nozzle Mengalami Erosi*

2.3.4 Korosi

Korosi pada *fuel nozzle* terjadi akibat reaksi kimia antara material *nozzle* dengan lingkungan temperatur tinggi pada *combustion chamber*. Selain korosi, temperatur operasi tinggi juga dapat menyebabkan oksidasi permukaan material *fuel nozzle*, sehingga menurunkan kekuatan mekanik material (Mazur et al., 2005).

Korosi dan oksidasi temperatur tinggi dapat menyebabkan perubahan struktur material, penipisan permukaan *nozzle*, retakan material, dan penurunan ketahanan *thermal fatigue*. Kerusakan tersebut dapat mempercepat kegagalan *fuel nozzle*, apabila tidak dilakukan inspeksi dan *maintenance* secara berkala (Kurz et al., 2012).

2.3.5 Thermal Fatigue dan Over Temperature

Thermal fatigue merupakan kerusakan material akibat perubahan temperatur secara berulang selama proses *start-up* dan *shutdown* turbin gas. Perubahan temperatur yang cepat menyebabkan tegangan termal pada material *fuel nozzle*, sehingga memicu terbentuknya retakan mikro pada permukaan material. (Mazur et al., 2005).

Selain *thermal fatigue*, *over temperature* juga menjadi salah satu penyebab utama kerusakan *fuel nozzle* pada *combustion system*. *Over temperature* terjadi akibat distribusi bahan bakar yang tidak merata atau pembakaran yang tidak stabil, sehingga menyebabkan temperatur lokal meningkat secara berlebihan. Kondisi tersebut dapat menyebabkan deformasi *nozzle tip*, material, retakan termal, dan oksidasi temperatur tinggi. Gangguan *thermal fatigue* dan *over temperature* sangat mempengaruhi umur pakai *fuel nozzle* pada turbin gas Siemens KWU (Meherhomji & Bromley, 2004).



Gambar 2. 5 *Fuel Nozzle* Mengalami Retakan pada Sambungan Las

2.3.6 Dampak Gangguan *Fuel Nozzle* terhadap Performa Turbin Gas

Gangguan *fuel nozzle* memberikan pengaruh besar terhadap performa *combustion system* dan operasi turbin gas. Ketidakseimbangan distribusi bahan bakar menyebabkan pembakaran tidak stabil, sehingga meningkatkan *exhaust temperature spread* dan *combustion vibration*. Kondisi tersebut dapat menurunkan efisiensi turbin gas serta mempercepat kerusakan komponen *combustion chamber* dan *turbine section* (Boyce, 2012).

Gangguan *fuel nozzle* juga dapat menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar, penurunan output daya turbin gas, peningkatan emisi gas buang, *combustion instability*, dan *forced outage* pada pembangkit. Oleh karena itu, diperlukan kegiatan inspeksi dan *maintenance fuel nozzle* secara berkala untuk menjaga *reliability combustion system* dan mengurangi risiko kegagalan operasi turbin gas di PLTG GT 12 Belawan (Mobley, 2002).

2.4 Analisis Kegagalan *Fuel Nozzle* menggunakan Metode *Root Cause Analysis* (RCA)

Analisis kegagalan (*failure analysis*) merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui penyebab utama terjadinya kerusakan pada suatu komponen atau sistem. Dalam sistem turbin gas, analisis kegagalan sangat penting dilakukan untuk mengetahui faktor penyebab gangguan pada *fuel nozzle*, sehingga dapat ditentukan tindakan perbaikan dan metode *maintenance* yang tepat. Analisis kegagalan tidak hanya berfokus pada kerusakan yang terlihat secara visual, tetapi juga mengidentifikasi akar penyebab (*root cause*) yang menyebabkan terjadinya kegagalan komponen selama operasi turbin gas ((Kazempour-liacy & Shirpay, 2013).

Pada turbin gas Siemens KWU, *fuel nozzle* bekerja pada kondisi temperatur dan tekanan tinggi secara kontinu, sehingga memiliki risiko tinggi mengalami gangguan seperti *carbon deposit*, *nozzle clogging*, *thermal fatigue*, erosi, dan korosi. Gangguan tersebut dapat menyebabkan pembakaran tidak stabil, peningkatan *exhaust temperature spread*, serta penurunan performa *combustion system*. Oleh karena itu, diperlukan metode analisis yang mampu mengidentifikasi

penyebab utama kerusakan secara sistematis agar kerusakan serupa dapat dicegah pada operasi berikutnya (Kurz & Brun, 2001).

Salah satu metode analisis kegagalan yang banyak digunakan pada sistem industri pembangkit adalah *Root Cause Analysis* (RCA). RCA merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab utama suatu masalah berdasarkan hubungan sebab-akibat dari suatu kegagalan. Metode ini tidak hanya berfokus pada gejala kerusakan, tetapi juga menelusuri faktor-faktor utama yang menyebabkan gangguan pada komponen. Dengan menggunakan RCA, tindakan perbaikan yang dilakukan menjadi lebih efektif karena permasalahan utama dapat diketahui secara jelas (Andersen & Fagerhaug, 2006).

Metode RCA pada penelitian kegagalan *fuel nozzle* dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu:

1. Identifikasi masalah atau jenis gangguan *fuel nozzle*.
2. Pengumpulan data operasional dan histori *maintenance*.
3. Analisis kondisi kerusakan berdasarkan inspeksi visual.
4. Identifikasi faktor penyebab menggunakan hubungan sebab-akibat.
5. Penentuan akar penyebab kerusakan.
6. Penyusunan rekomendasi *corrective action* dan preventive maintenance.

Tahapan tersebut dilakukan untuk mengetahui hubungan antara kondisi operasional turbin gas dengan kerusakan yang terjadi pada *fuel nozzle* (Velásquez & Lara, 2022).

Dalam penerapannya, metode RCA sering dikombinasikan dengan Fishbone Diagram atau diagram sebab-akibat untuk mempermudah proses identifikasi faktor penyebab kerusakan. Fishbone Diagram digunakan untuk mengelompokkan penyebab kegagalan berdasarkan beberapa faktor seperti manusia (*man*), metode (*method*), mesin (*machine*), material (*material*), lingkungan (*environment*), dan operasional (*operation*). Pendekatan ini membantu proses identifikasi akar penyebab gangguan *fuel nozzle* secara lebih sistematis dan terstruktur (Ishikawa, 1985).

Pada kasus gangguan *fuel nozzle* turbin gas, faktor penyebab kegagalan dapat berasal dari kualitas bahan bakar, temperatur operasi tinggi, proses atomisasi yang

tidak sempurna, ketidaksesuaian prosedur maintenance, maupun degradasi material akibat *thermal fatigue*. Sebagai contoh, *carbon deposit* pada *nozzle tip* dapat disebabkan oleh kualitas atomisasi yang buruk dan pembakaran tidak sempurna. Kondisi tersebut menyebabkan saluran bahan bakar mengalami penyumbatan, sehingga distribusi bahan bakar menjadi tidak merata dan memicu *combustion instability* (Lefebvre & Ballal, 2010).

Penerapan metode RCA pada penelitian ini difokuskan untuk mengetahui akar penyebab kegagalan *fuel nozzle* turbin gas Siemens KWU di PLTG GT 12 Belawan berdasarkan data operasional, histori *maintenance*, dan hasil inspeksi visual. Metode ini diharapkan mampu memberikan rekomendasi *maintenance* yang lebih efektif guna meningkatkan *reliability combustion system* dan mengurangi risiko gangguan operasi turbin gas (Kraftwerk Union AG, 1988).

2.5 Maintenance Fuel Nozzle

2.5.1 Pengertian Maintenance Fuel Nozzle

Maintenance fuel nozzle merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan untuk menjaga kondisi *fuel nozzle* agar tetap bekerja sesuai standar operasi turbin gas. *Fuel nozzle* merupakan komponen penting dalam *combustion system* karena berfungsi mengatur proses atomisasi dan distribusi bahan bakar ke ruang bakar. Gangguan kecil pada *fuel nozzle* dapat menyebabkan pembakaran tidak stabil, peningkatan temperatur lokal, penurunan efisiensi turbin gas, hingga kerusakan pada *hot gas path component*. Oleh karena itu, kegiatan *maintenance fuel nozzle* harus dilakukan secara berkala dan sistematis untuk menjaga keandalan operasi PLTG (Kraftwerk Union AG, 1988; Boyce, 2012).

Pada turbin gas Frame 9, *maintenance fuel nozzle* dilakukan berdasarkan *operating hours* maupun hasil inspeksi kondisi aktual komponen. Kegiatan *maintenance* meliputi pemeriksaan visual, *cleaning nozzle*, *flow test*, *dimensional inspection*, hingga penggantian komponen apabila ditemukan kerusakan yang melebihi batas toleransi. Perbaikan yang tepat dapat meningkatkan umur pakai *fuel nozzle*, menjaga kestabilan pembakaran, dan mengurangi risiko *forced outage* pada pembangkit (Kraftwerk Union AG, 1988).

2.5.2 Preventive Maintenance

1. Pengertian Preventive Maintenance

Preventive maintenance merupakan metode pemeliharaan yang dilakukan secara terjadwal untuk mencegah terjadinya kerusakan pada *fuel nozzle* sebelum terjadi gangguan serius. *Preventive maintenance* bertujuan menjaga performa sistem pembakaran agar tetap optimal dan mengurangi kemungkinan terjadinya trip turbin gas akibat kerusakan *fuel nozzle* (Mobley, 2002).

Preventive maintenance pada *fuel nozzle* dilakukan berdasarkan berbagai faktor, antara lain jam operasi turbin gas (*operating hours*), jumlah *start-up* dan *shutdown*, jadwal *inspection interval* dari manual pabrikan, hasil *monitoring performa combustion system* (Kraftwerk Union AG, 1988).

2. Kegiatan Preventive Maintenance

Beberapa kegiatan yang dilakukan dalam *preventive maintenance fuel nozzle* antara lain:

a. Visual Inspection

Pemeriksaan visual dilakukan untuk mengetahui adanya *carbon deposit*, retakan material, korosi, erosi, dan deformasi *nozzle*. *Visual inspection* biasanya dilakukan saat *combustion inspection* maupun *outage maintenance* (Kraftwerk Union AG, 1988).

b. Cleaning Fuel Nozzle

Cleaning dilakukan untuk membersihkan endapan karbon dan kotoran pada *nozzle tip* agar pola atomisasi kembali normal. Metode *cleaning* dapat berupa *chemical cleaning*, *ultrasonic cleaning*, *mechanical cleaning*. *Cleaning nozzle* harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak merusak diameter *spray hole nozzle* (Lefebvre & Ballal, 2010).

c. Fuel Flow Inspection

Fuel flow inspection dilakukan untuk memastikan distribusi aliran bahan bakar pada setiap *nozzle* tetap seimbang. Ketidakseimbangan *fuel flow* dapat menyebabkan exhaust temperature spread meningkat (Kraftwerk Union AG, 1988).

d. Spray Pattern Test

Spray pattern test bertujuan memeriksa pola penyemprotan bahan bakar apakah masih sesuai standar desain combustion chamber (Boyce, 2012).

2.5.3 *Corrective Maintenance*

1. Pengertian *Corrective Maintenance*

Corrective maintenance merupakan tindakan perbaikan yang dilakukan setelah terjadi gangguan atau kerusakan pada *fuel nozzle*. *Maintenance* jenis ini bertujuan mengembalikan kondisi *fuel nozzle* agar dapat beroperasi normal kembali (Mobley, 2002).

Corrective maintenance biasanya dilakukan apabila ditemukan persoalan seperti *nozzle clogging*, retak *nozzle*, *spray pattern* abnormal, kerusakan akibat *over temperature*, serta erosi dan korosi berat.

2. Tindakan *Corrective Maintenance*

Beberapa tindakan *corrective maintenance*, antara lain penggantian *nozzle tip* yang rusak, *reconditioning fuel nozzle*, penggantian seal dan gasket, perbaikan saluran bahan bakar, penggantian *fuel nozzle assembly*. Pada kondisi tertentu, *fuel nozzle* yang mengalami kerusakan berat harus diganti dengan komponen baru untuk menjaga keselamatan operasi turbin gas (Kraftwerk Union AG, 1988).

2.5.4 *Predictive Maintenance*

1. Pengertian *Predictive Maintenance*

Predictive maintenance merupakan metode pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan hasil *monitoring* kondisi aktual komponen. Metode ini bertujuan mendeteksi potensi kerusakan sejak dini sebelum terjadi kegagalan system. Pada *fuel nozzle*, *predictive maintenance* dilakukan dengan memonitor parameter operasi *combustion system* secara kontinu (Mobley, 2002).

2. Parameter *Monitoring*

Parameter yang dipantau, meliputi *exhaust gas temperature*, *exhaust temperature spread*, *combustion vibration*, *fuel flow deviation*, *emission level* (NO_x dan CO). Kenaikan temperatur atau vibrasi combustion dapat menjadi indikasi awal adanya gangguan pada *fuel nozzle* (Kraftwerk Union AG, 1988).

3. Keuntungan *Predictive Maintenance*

Keuntungan *predictive maintenance*, antara lain mengurangi *downtime* pembangkit, mengurangi biaya perbaikan besar, memperpanjang umur komponen, meningkatkan keandalan turbin gas.

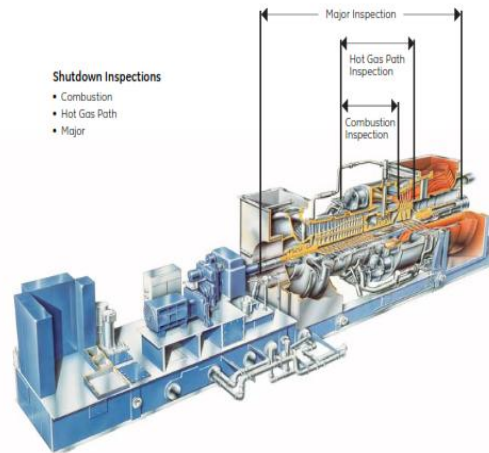
2.5.5 Jadwal Inspeksi dan Siklus Penggantian Komponen *Fuel Nozzle*

Dalam manajemen pemeliharaan Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), pelaksanaan inspeksi dan penggantian komponen ruang bakar (*combustion inspection*) diatur secara ketat berdasarkan akumulasi jam operasi aktual yang dikonversikan ke dalam satuan *Equivalent Operating Hours* (EOH) atau *Equivalent Start* (ES). Penjadwalan ini bertujuan untuk mencegah terjadinya kegagalan katastropik akibat degradasi material yang tidak terdeteksi.

2.5.5.1 Klasifikasi Tingkat Inspeksi Turbin Gas

Secara umum, standar pemeliharaan turbin gas berdasarkan acuan *Original Equipment Manufacturer* (OEM) membagi tahapan inspeksi komponen seksi panas menjadi tiga tingkatan utama, antara lain:

1. *Combustion Inspection* (CI) merupakan inspeksi jangka pendek yang berfokus pada komponen seksi pembakaran, termasuk *fuel nozzle assembly*, *combustor liner*, *transition piece*, dan *crossfire tube*. Pada tahap inilah prosedur pembongkaran, pembersihan deposit, dan kalibrasi pola semprotan *fuel nozzle* dilakukan (Mulyono & Suwarti, 2016).
2. *Hot Path Inspection* (HPI) merupakan inspeksi tingkat menengah yang mencakup seluruh komponen seksi pembakaran ditambah dengan evaluasi visual serta pengujian non-destruktif (*Non-Destructive Test* / NDT) pada sudu-sudu turbin tetap (*stator blade/nozzle*) dan sudu gerak (*rotor blade stage I*) (Mulyono & Suwarti, 2016).
3. *Major Overhaul* (MO) merupakan inspeksi menyeluruh berskala besar yang melibatkan pembongkaran total *casing* turbin, kompresor, dan rotor untuk dilakukan pemeriksaan, perbaikan besar, atau penggantian komponen secara masif demi mengembalikan performa awal pembangkit (*re-powering*) (Mulyono & Suwarti, 2016).



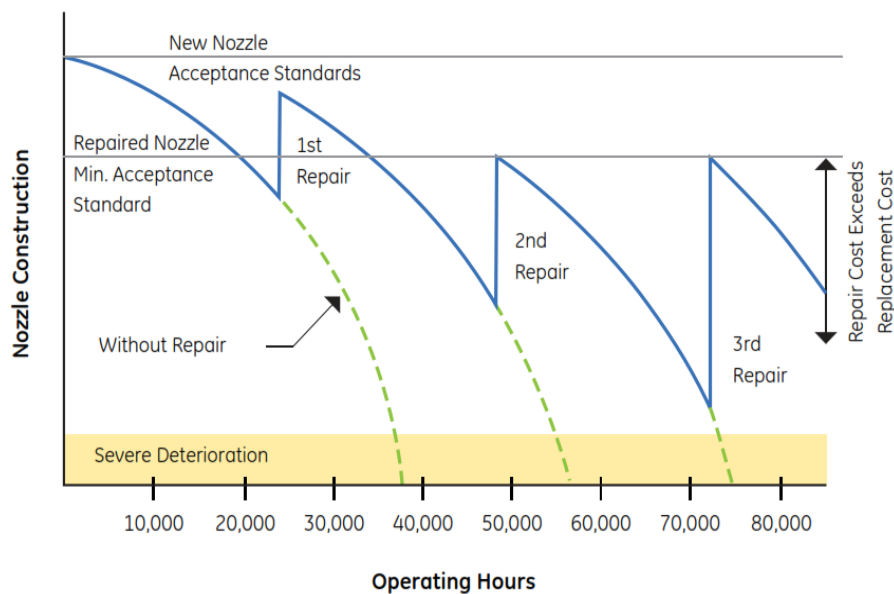
Gambar 2. 6 Scope Pekerjaan Jadwal Overhaul

2.5.5.2 Interval Manajemen Pemeliharaan *Fuel Nozzle*

Komponen *fuel nozzle* menerima beban termomekanis paling dinamis, sehingga memerlukan perhatian khusus pada setiap siklus *Combustion Inspection* (CI). Interval standar yang umumnya diterapkan di industri pembangkit adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Periode Inspeksi *Fuel Nozzle*

<i>Fuel</i>	<i>Transition Pieces</i>		<i>Combustion Liners</i>	
	<i>Fired Hours</i>	<i>Fired Starts</i>	<i>Fired Hours</i>	<i>Fired Starts</i>
<i>Gas</i>	8.000	600	8.000	300
<i>Distillate</i>	8.000	600	6.500	300



Gambar 2. 7 Periode Penggantian *Fuel Nozzle*

Tabel 2. Scope Pekerjaan Masing-Masing *Overhaul*

Jenis Inspeksi / Tindakan	Batas Interval Operasional (EOH)	Aktivitas Utama pada <i>Fuel Nozzle</i>
<i>Combustion Inspection</i> (CI)	8.000 - 12.000 Jam	Pembongkaran komponen, pemeriksaan kelonggaran <i>transition piece</i> , pembersihan deposit karbon (<i>coking</i>), dan pengujian <i>water flow test / air flow test</i> .
<i>Hot Path Inspection</i> (HPI)	24.000 - 32.000 Jam	Evaluasi keretakan menggunakan <i>Dye Penetrant Test</i> pada <i>swirl tip</i> dan penggantian komponen-komponen kritis seksi <i>nozzle</i> yang mengalami erosi parah.
Siklus Penggantian Total	48.000 - 64.000 Jam	Batas umur pakai (<i>lifetime limit</i>) material <i>nozzle body</i> . Seluruh rangkaian <i>fuel nozzle assembly</i> wajib diganti dengan unit baru untuk menghindari kegagalan fatik material.

2.5.5.3 Kebijakan Penggantian Komponen Habis Pakai (*Consumable Parts*)

Di samping jadwal penggantian total berdasarkan batasan umur material *nozzle body*, terdapat kebijakan baku mengenai komponen sekali pakai (*consumable parts*) yang wajib diganti setiap kali prosedur pembongkaran dilakukan.

Sebagai contoh, komponen penahan seperti *lock-plate* yang berfungsi menjaga posisi *outer swirl tip* pada korpus utama tidak boleh dipasang kembali setelah dilepas. Hal ini disebabkan oleh terjadinya deformasi plastis pada metal penahan saat proses pembukaan, sehingga kemampuan mekanisnya dalam mengunci (*locking stability*) akan menurun drastis dan berisiko memicu kelonggaran akibat getaran tinggi operasional turbin jika dipaksakan untuk digunakan kembali.

2.5.6 Inspeksi *Fuel Nozzle*

1. Pengertian *Predictive Maintenance*

Predictive maintenance merupakan metode pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan hasil *monitoring* kondisi aktual komponen. Metode ini bertujuan mendeteksi potensi kerusakan sejak dini sebelum terjadi kegagalan system. Pada *fuel nozzle*, *predictive maintenance* dilakukan dengan memonitor parameter operasi *combustion system* secara kontinu (Mobley, 2002).

2. Parameter *Monitoring*

Parameter yang dipantau, meliputi *exhaust gas temperature*, *exhaust temperature spread*, *combustion vibration*, *fuel flow deviation*, *emission level* (NOx dan CO). Kenaikan temperatur atau vibrasi combustion dapat menjadi indikasi awal adanya gangguan pada *fuel nozzle* (Kraftwerk Union AG, 1988).

3. Keuntungan *Predictive Maintenance*

Keuntungan *predictive maintenance*, antara lain mengurangi *downtime* pembangkit, mengurangi biaya perbaikan besar, memperpanjang umur komponen, meningkatkan keandalan turbin gas.

2.5.7 *Cleaning Fuel Nozzle*

Cleaning fuel nozzle merupakan proses pembersihan *nozzle* dari endapan karbon dan kotoran hasil pembakaran. Tujuan *cleaning fuel nozzle* yaitu mengembalikan pola atomisasi bahan bakar, menghilangkan *carbon deposit*, menjaga kestabilan pembakaran, dan mengurangi risiko *nozzle clogging* (Kraftwerk Union AG, 1988). Berikut ini metode-metode yang digunakan dalam kegiatan *cleaning fuel nozzle*, antara lain:

1. *Chemical Cleaning* menggunakan cairan kimia untuk melarutkan endapan karbon.
2. *Ultrasonic Cleaning* menggunakan gelombang ultrasonik untuk membersihkan bagian *nozzle* yang sulit dijangkau.
3. *Manual Cleaning* dilakukan secara manual menggunakan alat khusus sesuai prosedur perbaikan.
4. *Chemical Cleaning* menggunakan cairan kimia untuk melarutkan endapan karbon.
5. *Ultrasonic Cleaning* menggunakan gelombang ultrasonik untuk membersihkan bagian *nozzle* yang sulit dijangkau.
6. *Manual Cleaning* dilakukan secara manual menggunakan alat khusus sesuai prosedur perbaikan.

2.5.8 Penggantian Komponen *Fuel Nozzle*

Fuel nozzle yang mengalami kerusakan berat harus dilakukan penggantian komponen untuk mencegah kegagalan sistem pembakaran. Komponen yang sering diganti, meliputi *nozzle tip*, *seal*, *gasket*, *fuel swirler*, dan *fuel tube*. Penggantian komponen dilakukan berdasarkan hasil inspeksi, *operating hours*, dan standar OEM (*Original Equipment Manufacturer*) (Kraftwerk Union AG, 1988).

2.5.9 Pengujian *Fuel Nozzle*

Setelah proses *maintenance* selesai, *fuel nozzle* harus dilakukan pengujian untuk memastikan kondisi *nozzle* masih sesuai standar operasi (Boyce, 2012).

1. *Flow Test* adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kapasitas aliran bahan bakar pada *nozzle*.
2. *Spray Pattern Test* Adalah pengujian untuk memeriksa pola semprotan bahan bakar.
3. *Leakage Test* adalah pengujian untuk memastikan tidak terdapat kebocoran pada *nozzle* dan *fuel line*.
4. *Pressure Test* adalah pengujian yang bertujuan memastikan *fuel nozzle* mampu bekerja pada tekanan operasi tertentu

2.5.10 Prosedur *Maintenance Fuel Nozzle* pada PLTG

Pada turbin gas PLTG Siemens KWU, prosedur *maintenance fuel nozzle* dilakukan berdasarkan *manual maintenance* dari Kraftwerk Union AG dan standar operasional perusahaan (Moblely et al., 2008). Tahapan *maintenance*, antara lain:

1. *Shutdown turbin gas* adalah kegiatan menghentikan turbin gas dan dilakukan proses pendinginan sebelum *maintenance* dimulai.
2. Pembongkaran *fuel nozzle* adalah *fuel nozzle* dilepas dari *combustion chamber* menggunakan *special tools* sesuai prosedur OEM.
3. Inspeksi Visual adalah kegiatan yang dilakukan pemeriksaan terhadap carbon deposit, retakan, korosi, dan erosi.
4. *Cleaning* dan *Reconditioning* adalah *fuel nozzle* dibersihkan dan dilakukan perbaikan ringan apabila memungkinkan.
5. *Dimensional Inspection* dan NDT adalah pemeriksaan dimensi dan pengujian retak dilakukan untuk memastikan kondisi *nozzle* masih layak digunakan.

6. *Flow Test* dan *Spray Test* adalah kegiatan dilakukan pengujian pola spray dan kapasitas aliran bahan bakar.
7. *Reinstallation* adalah *fuel nozzle* dipasang kembali sesuai *torque specification* dan *alignment standard*.
8. *Commissioning* dan *Monitoring* adalah kegiatan setelah unit beroperasi kembali dilakukan *monitoring* terhadap *Exhaust gas temperature*, *combustion vibration*, *emission monitoring*, dan *flame stability*.

2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan bagian penting dalam penelitian ilmiah yang digunakan untuk mengetahui perkembangan penelitian sebelumnya serta menentukan posisi dan kebaruan (*novelty*) penelitian yang dilakukan. Pada penelitian mengenai *fuel nozzle* turbin gas, studi terdahulu umumnya membahas gangguan combustion system, analisis kegagalan material, *carbon deposit*, *thermal fatigue*, *combustion instability*, dan metode *maintenance* pada turbin gas pembangkit.

Penelitian terdahulu digunakan sebagai dasar dalam menentukan metode analisis yang sesuai untuk menganalisis kegagalan *fuel nozzle* pada turbin gas Siemens KWU di PLTG GT 12 Belawan. Selain itu, kajian penelitian terdahulu juga membantu dalam menentukan parameter penelitian, metode pengujian material, serta pendekatan analisis kegagalan menggunakan *Root Cause Analysis* (RCA).

Tabel 3. Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Tahun	Metode	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
1	Mazur et al.	2005	<i>Metallografi + SEM</i>	Kegagalan <i>nozzle</i> turbin gas disebabkan <i>thermal fatigue</i> dan <i>creep</i> pada material <i>superalloy</i> akibat paparan temperatur tinggi melebihi batas desain.	Tidak menggunakan metode RCA secara sistematis dan tidak berbasis data <i>maintenance</i> lapangan PLTG di Indonesia.
2	Lefebvre & Ballal	2010	<i>Eksperimental + CFD</i>	Kualitas atomisasi bahan bakar sangat mempengaruhi stabilitas pembakaran dan distribusi	Fokus pada aerodinamika pembakaran dan tidak membahas degradasi material

				temperatur pada <i>combustion chamber</i> turbin gas.	serta kegagalan operasional aktual.
3	Kurz & Brun	2012	<i>Performance Analysis</i>	Degradasi komponen turbin gas menyebabkan penurunan efisiensi termal sekitar 1,5–2% per tahun akibat <i>fouling</i> dan erosi komponen.	Tidak spesifik membahas <i>fuel nozzle</i> sebagai analisis akar penyebab dan tidak berbasis unit PLTG spesifik.
4	Meher-Homji & Bromley	2004	<i>Thermodynamic Analysis</i>	<i>Fouling</i> pada <i>combustion system</i> menyebabkan peningkatan <i>exhaust temperature spread</i> dan penurunan <i>output</i> daya turbin gas.	Tidak menggunakan RCA sebagai analisis akar penyebab dan tidak berbasis unit PLTG spesifik.
5	Shirpay & Kazempour-Liacy	2013	<i>SEM + EDX + Visual Inspection</i>	Kegagalan <i>nozzle</i> turbin gas disebabkan oleh <i>overheating</i> akibat penurunan efektivitas sistem pendingin <i>impingement cooling</i> .	Tidak menggunakan metode RCA sebagai analisis akar penyebab dan tidak berbasis unit PLTG spesifik.
6	Hwang et al.	2023	<i>Axial Fuel Staging (AFS)</i>	Pengujian dilakukan pada 1/4-scale <i>combustion test rig</i> . Data yang diukur meliputi emisi NO _x , temperatur keluar <i>combustor</i> , struktur nyala api dengan OH-PLIF dan foto langsung.	Tidak menggunakan metode RCA secara sistematis dan tidak berbasis data <i>maintenance</i> lapangan PLTG di Indonesia.
7	Kurz, Brun, Meher-Homji, et al.	2012	<i>Technical Review</i>	Kontaminan dapat menyebabkan penyumbatan saluran internal <i>fuel nozzle (injector blockage)</i> , ketidakstabilan pembakaran, terbentuknya <i>hot streaks</i> , peningkatan temperatur lokal, oksidasi, korosi temperatur tinggi, serta kerusakan komponen turbin.	Tidak menggunakan metode RCA dan tidak menganalisis mekanisme kegagalan material pada <i>fuel nozzle</i> .

8	Syammar y, Hendri, & Lukfianto	2020	<i>Siklus Brayton</i>	Setelah dilakukan <i>Minor Inspection</i> terjadi peningkatan efisiensi termal, efisiensi kompresor, efisiensi ruang bakar, dan efisiensi turbin. Selain itu, <i>heat rate</i> menurun yang menunjukkan peningkatan performa turbin gas	Tidak menginvestigasi kerusakan <i>fuel nozzle</i> , tidak menggunakan metode (RCA) untuk mengidentifikasi mekanisme degradasi material.
9	Suwarti & Agung Mulyono	2016	<i>Maintenance Analysis</i>	Kerusakan <i>fuel nozzle</i> terutama disebabkan oleh penumpukan residu bahan bakar yang tidak terbakar sempurna dan perubahan <i>setting</i> komponen <i>fuel nozzle</i> .	Tidak menggunakan metode (RCA) untuk menentukan akar penyebab kegagalan.
10	Mokh Suf et al.	2022	<i>RCA + FMEA</i>	Distribusi bahan bakar yang tidak merata akibat <i>fuel nozzle</i> kotor, erosi, deposit cokelat/abu, cacat manufaktur, kesalahan perakitan, retak akibat <i>fatigue</i> , dan kerusakan <i>check valve</i> menyebabkan ketidakseimbangan temperatur pembakaran	berfokus pada peningkatan performa operasional melalui <i>refurbishment</i> dan kalibrasi <i>fuel nozzle</i> , bukan pada analisis kegagalan material dan tidak menggunakan metode RCA

Berdasarkan penelitian terdahulu, diketahui bahwa kegagalan *fuel nozzle* pada turbin gas umumnya dipengaruhi oleh temperatur operasi tinggi, *thermal fatigue*, korosi temperatur tinggi, *carbon deposit*, dan degradasi material akibat siklus termal berulang. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada analisis material menggunakan metode metalografi, SEM, *thermodynamic analysis*, maupun simulasi numerik untuk mengetahui mekanisme kerusakan *nozzle* turbin gas.

Namun demikian, penelitian terdahulu masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama dalam penggunaan metode *Root Cause Analysis* (RCA) secara sistematis berbasis data operasional dan histori *maintenance* lapangan.

Selain itu, sebagian penelitian belum mengintegrasikan analisis kegagalan material dengan parameter operasional *combustion system* seperti *exhaust temperature spread* dan *combustion instability* pada unit PLTG aktual.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk melengkapi penelitian sebelumnya dengan menggabungkan metode RCA, Fishbone Diagram, dan analisis *maintenance fuel nozzle* pada turbin gas Siemens KWU di PLTG GT 12 Belawan. Pendekatan tersebut diharapkan mampu memberikan analisis kegagalan yang lebih komprehensif serta rekomendasi *maintenance* yang lebih efektif untuk meningkatkan *reliability combustion system* turbin gas.

2.7 Kerangka Berpikir

Fuel nozzle merupakan komponen utama pada *combustion system* turbin gas yang berfungsi mengatomisasi dan mendistribusikan bahan bakar ke dalam *combustion chamber*. Kondisi *fuel nozzle* sangat mempengaruhi kualitas pembakaran, kestabilan nyala api, distribusi temperatur, dan performa turbin gas secara keseluruhan. Pada turbin gas Siemens KWU di PLTG GT 12 Belawan, *fuel nozzle* bekerja pada kondisi temperatur dan tekanan tinggi secara kontinu, sehingga rentan mengalami gangguan seperti *carbon deposit*, *nozzle clogging*, *thermal fatigue*, erosi, dan korosi temperatur tinggi. Gangguan tersebut menyebabkan perubahan *spray pattern* dan ketidakseimbangan distribusi bahan bakar pada *combustion chamber*.

Gangguan *fuel nozzle* yang terjadi secara terus-menerus dapat menyebabkan *combustion instability*, peningkatan *exhaust temperature spread*, penurunan efisiensi pembakaran, dan meningkatnya risiko kerusakan komponen *hot gas path* lainnya. Selain itu, gangguan pada *fuel nozzle* juga dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar dan menyebabkan penurunan *output* daya turbin gas. Oleh karena itu, diperlukan analisis kegagalan untuk mengetahui akar penyebab gangguan *fuel nozzle*, sehingga dapat ditentukan tindakan *maintenance* yang tepat guna meningkatkan *reliability combustion system* (Suef et al., 2024).

Penelitian ini dilakukan berdasarkan adanya indikasi gangguan *fuel nozzle* pada turbin gas Siemens KWU di PLTG GT 12 Belawan yang ditunjukkan melalui

data operasional dan histori *maintenance*. Analisis dilakukan menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA) untuk mengidentifikasi akar penyebab kerusakan berdasarkan hubungan sebab-akibat dari gangguan yang terjadi. Dalam proses analisis, metode RCA didukung dengan Fishbone Diagram untuk mengelompokkan faktor penyebab kerusakan berdasarkan faktor manusia, metode, material, mesin, dan operasional.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, penelitian ini diharapkan mampu memberikan rekomendasi *maintenance* yang tepat untuk mengurangi risiko gangguan *fuel nozzle* pada turbin gas Siemens KWU. Rekomendasi *maintenance* meliputi peningkatan inspeksi *combustion system*, *cleaning fuel nozzle* secara berkala, *monitoring exhaust temperature spread*, serta penggantian komponen berdasarkan kondisi aktual material *nozzle*. Dengan demikian, *reliability combustion system* dan performa operasi turbin gas dapat ditingkatkan secara optimal.

2.8 Dasar Perhitungan Efisiensi Termal dan Keandalan Unit Pembangkit

Berikut disajikan seluruh persamaan matematis yang digunakan dalam penelitian ini sebagai dasar perhitungan pada Bab 4, meliputi persamaan efisiensi termal, efisiensi kompresor, sebaran temperatur gas buang, serta indikator keandalan unit (*Availability*, MTBF, MTTR, dan EFOR), lengkap dengan dasar ilmiah masing-masing persamaan. Penomoran persamaan mengikuti format bab-urutan sesuai pedoman penulisan skripsi.

Efisiensi termal unit dihitung berdasarkan hubungan antara *Gross Plant Heat Rate* (GPHR) dengan konversi satuan energi listrik ke energi kalor menggunakan persamaan berikut, di mana η_{th} adalah efisiensi termal (%), 860 adalah konstanta konversi 1 kWh = 860 kkal, dan GPHR adalah Gross Plant Heat Rate (kkal/kWh):

$$\eta_{th} = \frac{860}{GPHR} \times 100\% \quad (2.1)$$

Secara termodinamika, persamaan ini merupakan penerapan Hukum Termodinamika I (kekekalan energi) pada sistem pembangkit termal, yaitu perbandingan antara energi berguna yang dihasilkan (energi listrik) terhadap energi total yang dimasukkan ke dalam sistem (energi kalor bahan bakar). Karena *Heat*

Rate (GPHR) secara definisi merupakan kebalikan dari efisiensi (kebutuhan kalor per satuan energi listrik), maka semakin tinggi nilai GPHR, semakin rendah efisiensi termal unit. Hubungan berbanding terbalik inilah yang mendasari bentuk praktis persamaan di atas. Parameter ini menjadi indikator fundamental dalam mengevaluasi kinerja termal pembangkit karena secara langsung mencerminkan seberapa efektif proses konversi energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik berlangsung di dalam siklus Brayton pada turbin gas.

Persentase penurunan efisiensi termal terhadap kondisi *baseline* dihitung dengan persamaan berikut, di mana $\Delta\eta_{th}$ adalah persentase penurunan efisiensi termal (%), $\eta_{th,baseline}$ adalah efisiensi termal kondisi desain, dan $\eta_{th,aktual}$ adalah efisiensi termal kondisi aktual:

$$\Delta\eta_{th} = \frac{(\eta_{th,baseline} - \eta_{th,aktual})}{\eta_{th,baseline}} \times 100\% \quad (2.2)$$

Persamaan ini merupakan bentuk umum analisis deviasi persentase (*percentage deviation analysis*) yang lazim digunakan dalam evaluasi kinerja pembangkit (*performance monitoring*) untuk membandingkan kondisi operasi aktual terhadap kondisi acuan/desain pabrikan. Pendekatan normalisasi terhadap nilai *baseline* ini penting karena memungkinkan perbandingan yang objektif dan tidak bergantung pada skala absolut parameter. Sehingga, tingkat degradasi kinerja dapat diinterpretasikan secara konsisten, meskipun kondisi operasi (beban, temperatur ambien, dan sebagainya) berbeda-beda antar waktu pengukuran.

Selisih *Net Plant Heat Rate* (NPHR) antara kondisi aktual dan *baseline* dihitung dengan persamaan berikut, di mana $\Delta NPHR$ adalah selisih *heat rate* (kkal/kWh):

$$\Delta NPHR = NPHR_{aktual} - NPHR_{baseline} \quad (2.3)$$

NPHR (*Net Plant Heat Rate*) berbeda dari GPHR karena telah memperhitungkan konsumsi daya untuk kebutuhan sendiri (*auxiliary power consumption*), sehingga NPHR merepresentasikan efisiensi unit dari sudut pandang daya yang benar-benar dapat disalurkan ke jaringan (*net output*). Selisih NPHR terhadap *baseline* menjadi indikator langsung derajat pemborosan energi (*thermal energy wastage*) akibat penurunan kinerja komponen sistem pembakaran maupun

sistem pendukung lainnya, dan secara praktik industri kerap dijadikan dasar perhitungan kerugian finansial akibat penurunan efisiensi.

Persentase kenaikan NPHR terhadap kondisi baseline dihitung dengan persamaan berikut:

$$\% \Delta NPHR = \left(\frac{\Delta NPHR}{NPHR_{baseline}} \right) \times 100\% \quad (2.4)$$

Normalisasi selisih NPHR ke dalam bentuk persentase memungkinkan hasil perhitungan dibandingkan secara langsung dengan parameter efisiensi termal ($\Delta \eta_{th}$), meskipun keduanya memiliki satuan dasar yang berbeda (kkal/kWh vs %). Sehingga, konsistensi hubungan berbanding terbalik antara kenaikan *heat rate* dan penurunan efisiensi dapat diverifikasi secara kuantitatif sebagai bentuk validasi silang (*cross-check*) antar indikator kinerja termal.

Selisih konsumsi bahan bakar gas antara kondisi aktual dan *baseline* dihitung dengan persamaan berikut, di mana *Fuel Gas* adalah laju alir bahan bakar gas (mmbtu):

$$\Delta \text{Fuel Gas} = \text{Fuel Gas}_{\text{aktual}} - \text{Fuel Gas}_{\text{baseline}} \quad (2.5)$$

Konsumsi bahan bakar merupakan indikator operasional yang paling mudah diamati secara langsung karena berkaitan erat dengan biaya operasi pembangkit. Pada kondisi daya keluaran yang relatif setara, kenaikan konsumsi bahan bakar mengindikasikan bahwa proses konversi energi berlangsung kurang efisien, sehingga parameter ini berfungsi sebagai bukti kuantitatif tingkat lanjut (*downstream evidence*) dari penurunan efisiensi termal yang telah dihitung melalui parameter *heat rate*.

Persentase kenaikan konsumsi bahan bakar terhadap kondisi *baseline* dihitung dengan persamaan berikut:

$$\% \Delta \text{Fuel Gas} = \left(\frac{\Delta \text{Fuel Gas}}{\text{Fuel Gas}_{\text{baseline}}} \right) \times 100\% \quad (2.6)$$

Sama seperti prinsip normalisasi pada parameter *heat rate*, persentase kenaikan konsumsi bahan bakar memungkinkan hasil perhitungan dibandingkan lintas periode maupun lintas unit pembangkit dengan kapasitas berbeda, serta

menjadi dasar kuantitatif untuk estimasi dampak ekonomi (potensi kerugian biaya bahan bakar) akibat penurunan kinerja komponen sistem pembakaran.

Temperatur udara keluar kompresor pada proses kompresi ideal (isentropik) dihitung dengan persamaan berikut, di mana T_1 adalah temperatur udara masuk kompresor (K), T_{2s} adalah temperatur keluar kompresor ideal (K), P_1 dan P_2 adalah tekanan masuk dan keluar kompresor (bar), dan γ adalah rasio kalor spesifik udara (1,4):

$$T_{2s} = T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2.7)$$

Persamaan ini diturunkan dari relasi proses isentropik pada gas ideal ($P \cdot v^\gamma = \text{konstan}$) yang dikombinasikan dengan persamaan gas ideal ($Pv = RT$), dan merupakan bagian mendasar dari analisis siklus Brayton yang menjadi basis kerja turbin gas. Proses isentropik merepresentasikan kondisi kompresi ideal tanpa kerugian (reversibel dan adiabatik, tanpa perpindahan panas ke lingkungan maupun peningkatan entropi akibat gesekan/turbulensi), sehingga T_{2s} berfungsi sebagai nilai acuan teoretis untuk mengevaluasi seberapa jauh proses kompresi aktual menyimpang dari kondisi ideal tersebut.

Efisiensi isentropik kompresor dihitung dengan persamaan berikut, di mana η_c adalah efisiensi isentropik kompresor (%) dan T_2 , aktual adalah temperatur keluar kompresor hasil pengukuran aktual (K):

$$\eta_c = \frac{(T_{2s} - T_1)}{(T_{2, \text{aktual}} - T_1)} \times 100\% \quad (2.8)$$

Efisiensi isentropik merupakan penerapan Hukum Termodinamika II yang menyatakan bahwa proses nyata (aktual) senantiasa menghasilkan entropi tambahan akibat ireversibilitas seperti gesekan fluida, turbulensi, dan kebocoran celah sudu, sehingga kenaikan temperatur aktual (T_2 , aktual – T_1) akan selalu lebih besar daripada kenaikan temperatur ideal ($T_{2s} - T_1$) untuk mencapai tekanan keluaran yang sama. Rasio antara kedua kenaikan temperatur inilah yang mengukur seberapa dekat kinerja kompresor aktual terhadap batas ideal termodinamikanya,

dan lazim digunakan sebagai indikator kondisi mekanis komponen kompresor (misalnya, akibat fouling atau keausan sudu).

Sebaran temperatur gas buang (*exhaust temperature spread*) dihitung dengan persamaan berikut, di mana T_{max} dan T_{min} adalah temperatur tertinggi dan terendah antar termokopel exhaust pada satu waktu pengamatan ($^{\circ}\text{C}$):

$$Spread = T_{max} - T_{min} \quad (2.9)$$

Parameter ini merupakan alat diagnostik standar dalam pemantauan kondisi (*condition monitoring*) turbin gas industrial untuk menilai keseragaman proses pembakaran antar ruang bakar (*combustor can*) yang tersusun secara annular di sekeliling turbin. Prinsip dasarnya adalah bahwa distribusi bahan bakar dan udara yang homogen ke seluruh *combustor can* akan menghasilkan profil temperatur gas buang yang relatif seragam pada seluruh titik pengukuran termokopel. Sebaliknya, nilai *spread* yang membesar dari kondisi normal mengindikasikan adanya ketidakseragaman pembakaran, yang secara umum berasosiasi dengan gangguan pada sistem injeksi bahan bakar (*fuel nozzle*) di salah satu atau beberapa titik.

Ketersediaan unit (*Availability / Equivalent Availability Factor*) dihitung dengan persamaan berikut, di mana periode pengamatan adalah total jam observasi dan total *downtime* adalah akumulasi jam unit tidak beroperasi akibat seluruh kategori gangguan:

$$Availability = \frac{(Periode\ Pengamatan - Total\ Downtime)}{Periode\ Pengamatan} \times 100\% \quad (2.10)$$

Availability merupakan salah satu indikator utama dalam disiplin *reliability engineering* yang mengukur proporsi waktu suatu unit pembangkit berada dalam kondisi siap dan mampu beroperasi terhadap total waktu periode pengamatan, tanpa membedakan apakah unit tersebut sedang membangkitkan daya penuh atau tidak. Definisi dan metode perhitungannya mengacu pada standar internasional seperti IEEE Std 762 dan basis data NERC GADS (*Generating Availability Data System*) yang menjadi acuan umum industri pembangkitan dalam melaporkan dan membandingkan kinerja keandalan unit pembangkit termal secara global.

Mean Time Between Failures (MTBF) dihitung dengan persamaan berikut, di mana waktu operasi adalah total periode pengamatan dikurangi total *downtime*, dan jumlah kejadian FO1 adalah jumlah kejadian *forced outage* pada periode tersebut:

$$MTBF = \frac{\text{Waktu Operasi}}{\text{Jumlah Kejadian FO1}} \quad (2.11)$$

MTBF merupakan metrik keandalan (*reliability metric*) yang secara statistik mengasumsikan laju kegagalan konstan (*constant failure rate*) pada fase *useful life* dari kurva bak mandi (*bathtub curve*), sehingga interval waktu antar kegagalan dapat didekati mengikuti distribusi eksponensial. Semakin besar nilai MTBF, semakin jarang frekuensi kegagalan tak terjadwal yang dialami unit, sehingga parameter ini banyak digunakan sebagai dasar perencanaan strategi pemeliharaan preventif maupun sebagai tolok ukur pembandingan keandalan antar unit pembangkit sejenis.

Mean Time To Repair (MTTR) dihitung dengan persamaan berikut, di mana total durasi FO1 adalah akumulasi jam *downtime* akibat kejadian *forced outage*:

$$MTTR = \frac{\text{Total Durasi FO1}}{\text{Jumlah Kejadian FO1}} \quad (2.12)$$

MTTR merupakan metrik *maintainability* yang mengukur rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memulihkan unit ke kondisi operasional setelah mengalami kegagalan, mencakup waktu diagnosis, perbaikan/penggantian komponen, hingga pengujian ulang sebelum unit kembali beroperasi. Nilai MTTR yang besar umumnya mengindikasikan kompleksitas pekerjaan perbaikan yang tinggi (misalnya memerlukan pembongkaran komponen internal) atau keterbatasan ketersediaan suku cadang, sehingga parameter ini sering dianalisis berdampingan dengan MTBF untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai keandalan (*reliability*) sekaligus kemudahan pemeliharaan (*maintainability*) suatu sistem.

Equivalent Forced Outage Rate (EFOR) dihitung dengan persamaan berikut, di mana FOH (*Forced Outage Hours*) adalah total jam *forced outage* dan SH (*Service Hours*) adalah total jam unit beroperasi menghasilkan daya:

$$EFOR = \frac{FOH}{(FOH + SH)} \times 100\% \quad (2.13)$$

EFOR merupakan indikator keandalan standar industri pembangkitan yang secara khusus berfokus pada gangguan tak terjadwal (*forced outage*), berbeda dengan *Availability* yang turut memperhitungkan pemeliharaan terjadwal. Karena hanya mempertimbangkan waktu unit sedang beroperasi sebagai pembagi bersama jam gangguan paksa, EFOR secara spesifik merepresentasikan probabilitas suatu unit mengalami kegagalan mendadak ketika sedang dibutuhkan untuk beroperasi, sehingga parameter ini banyak dijadikan acuan utama dalam evaluasi risiko keandalan pembangkit oleh operator sistem tenaga listrik.

BAB 3.

METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu

Penelitian dengan judul “Analisis Kegagalan *Fuel Nozzle* Turbin Gas PLTG GT 12 Belawan menggunakan Metode *Root Cause Analysis* (RCA)” dilaksanakan di lingkungan unit pembangkit listrik tenaga gas yang berada pada area operasional PLTG GT 12 Unit Pembangkit Belawan. Penelitian ini difokuskan pada analisis gangguan yang terjadi pada *fuel nozzle* turbin gas serta dampaknya terhadap sistem pembakaran dan performa operasional turbin gas.

Pemilihan lokasi penelitian dilakukan berdasarkan pertimbangan teknis dan akademis, di mana PLTG GT 12 Unit Pembangkit Belawan merupakan salah satu unit pembangkit yang memiliki sistem turbin gas dengan tingkat operasi tinggi serta memiliki data *maintenance* dan operasional yang relevan dengan objek penelitian. Selain itu, *fuel nozzle* pada *combustion system* turbin gas merupakan komponen yang sangat penting dalam menjaga kestabilan pembakaran dan efisiensi turbin gas. Sehingga, layak dijadikan objek penelitian untuk mengetahui jenis gangguan, penyebab kerusakan, serta metode penanganannya.

Penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan data operasional, data *maintenance*, hasil inspeksi, serta dokumentasi gangguan *fuel nozzle* yang terjadi selama pengoperasian unit pembangkit. Data tersebut digunakan untuk mendukung proses analisis gangguan dan evaluasi *maintenance fuel nozzle* pada turbin gas PLTG GT 12 Belawan.

Pelaksanaan penelitian dilakukan secara bertahap mulai dari observasi lapangan, pengumpulan data operasional dan *maintenance*, dokumentasi kondisi *fuel nozzle*, wawancara dengan operator dan teknisi *maintenance*, hingga proses analisis data dan penyusunan laporan penelitian. Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis agar data yang diperoleh sesuai dengan kondisi aktual di lapangan dan dapat digunakan sebagai dasar analisis gangguan *fuel nozzle* secara teknis dan ilmiah.

3.1.1 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PLTG GT 12 Unit Pembangkit Belawan yang merupakan salah satu unit pembangkit tenaga listrik berbasis turbin gas yang berada di kawasan pembangkit Belawan, Sumatera Utara. Unit pembangkit ini memiliki peran penting dalam mendukung sistem kelistrikan wilayah Sumatera bagian utara, khususnya dalam menjaga kestabilan suplai daya pada sistem interkoneksi.

PLTG Belawan berfungsi sebagai pembangkit tenaga listrik yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban puncak (*peak load*) dan menjaga kontinuitas sistem tenaga listrik. Karakteristik utama PLTG adalah kemampuan *start-up* yang cepat dan fleksibilitas operasi yang tinggi, sehingga sangat penting dalam menjaga stabilitas sistem pembangkitan tenaga listrik.

Objek penelitian difokuskan pada sistem pembakaran (*combustion system*) turbin gas, khususnya pada komponen *fuel nozzle* yang digunakan pada unit turbin gas PLTG GT 12. *Fuel nozzle* merupakan komponen utama pada *combustion chamber* yang berfungsi mengatomisasi dan mendistribusikan bahan bakar ke ruang bakar agar proses pembakaran berlangsung secara stabil dan efisien.

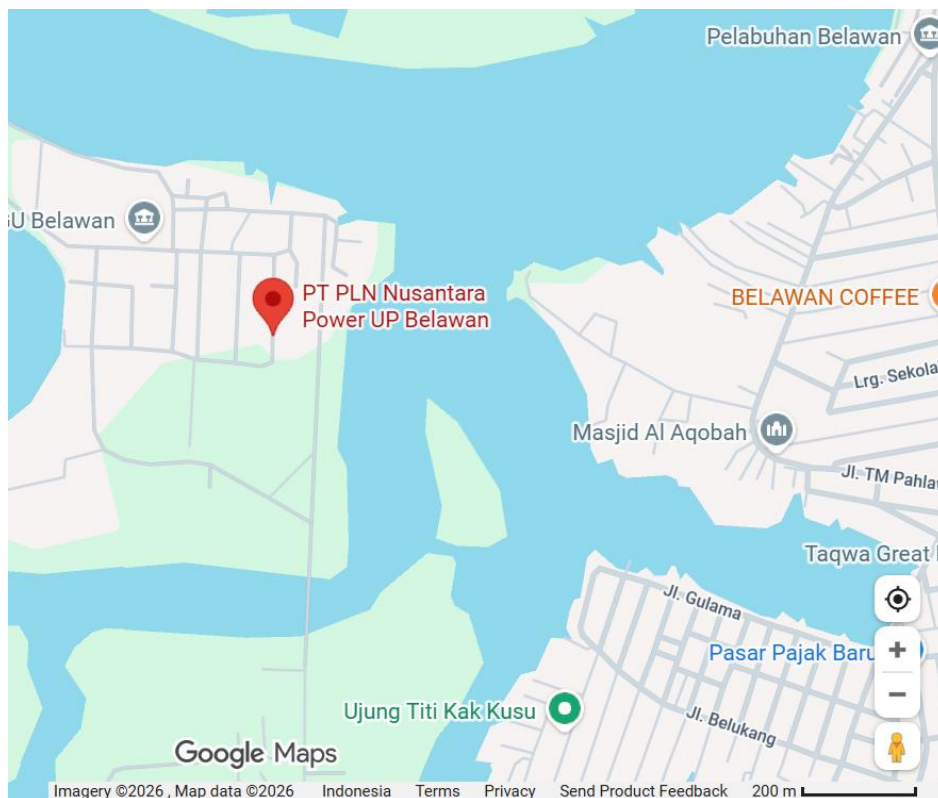
Sistem turbin gas yang digunakan pada PLTG GT 12 Belawan merupakan turbin gas tipe *heavy duty* yang beroperasi pada temperatur dan tekanan tinggi secara kontinu. Kondisi operasi tersebut menyebabkan *fuel nozzle* rentan mengalami gangguan, antara lain:

1. *Nozzle clogging,*
2. *Carbon deposit,*
3. *Erosi,*
4. *Over temperature,*
5. *Flame instability.*

Gangguan pada *fuel nozzle* dapat mempengaruhi kualitas atomisasi bahan bakar dan distribusi pembakaran, sehingga berdampak langsung terhadap performa turbin gas. Oleh karena itu, penelitian pada lokasi ini dianggap sesuai dengan tujuan penelitian karena menyediakan data aktual terkait gangguan operasional dan *maintenance fuel nozzle*.

Selain itu, lingkungan operasional turbin gas pada PLTG Belawan memiliki karakteristik temperatur tinggi, tekanan operasi tinggi, serta jam operasi yang cukup besar, sehingga sangat relevan untuk dilakukan analisis terhadap kondisi *fuel nozzle* dan *combustion system*. Data *maintenance* dan inspeksi yang tersedia pada unit pembangkit juga mendukung proses identifikasi gangguan serta evaluasi metode *maintenance* yang diterapkan pada *fuel nozzle* turbin gas.

Dengan kondisi tersebut, PLTG GT 12 Unit Pembangkit Belawan dinilai memiliki kesesuaian yang tinggi sebagai lokasi penelitian untuk menganalisis gangguan *fuel nozzle* pada sistem pembakaran turbin gas.



Gambar 3. 1 Lokasi PT PLN Nusantara Power UP Belawan

3.1.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam beberapa tahapan kegiatan yang dimulai dari observasi lapangan hingga penyusunan laporan skripsi. Pelaksanaan penelitian dilakukan secara bertahap agar proses pengumpulan data dan analisis gangguan *fuel nozzle* dapat dilakukan secara sistematis dan sesuai dengan kondisi aktual operasional pembangkit.

Tahapan awal penelitian dimulai dengan observasi lapangan untuk memahami sistem kerja turbin gas dan *combustion system* pada PLTG GT 12 Belawan. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data operasional dan *maintenance fuel nozzle* yang meliputi data gangguan, histori maintenance, hasil inspeksi, dan dokumentasi komponen *fuel nozzle*.

Selain pengumpulan data teknis, penelitian juga dilakukan melalui wawancara dengan operator dan teknisi *maintenance* guna memperoleh informasi mengenai kondisi operasional turbin gas, jenis gangguan yang sering terjadi, serta prosedur *maintenance fuel nozzle* yang diterapkan pada unit pembangkit.

Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan metode analisis gangguan untuk mengetahui penyebab kerusakan *fuel nozzle* dan dampaknya terhadap performa turbin gas. Tahapan terakhir yaitu penyusunan laporan penelitian dalam bentuk skripsi.

Adapun waktu pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1, antara lain:

Tabel 4. Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No.	Uraian Kegiatan	Waktu (Bulan)			
		1	2	3	4
1	Pengajuan Judul	■			
2	Studi Literatur dan Penyusunan Bab 1 & 2	■			
3	Pengumpulan Data Lapangan (Observasi, Wawancara, Dokumentasi)		■		
4	Analisis Data dan Identifikasi Akar Masalah (RCA)		■	■	
5	Seminar Proposal			■	
6	Penyusunan Bab 4, 5, dan Laporan Akhir			■	■
7	Seminar Hasil dan Revisi				■
8	Sidang Tugas Akhir				■

Berdasarkan tabel jadwal penelitian tersebut, dapat diketahui bahwa proses penelitian dilakukan secara berurutan mulai dari tahap observasi, pengumpulan data, analisis gangguan, hingga penyusunan laporan penelitian. Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis agar hasil analisis yang diperoleh dapat

menggambarkan kondisi aktual gangguan *fuel nozzle* pada PLTG GT 12 Unit Pembangkit Belawan secara teknis dan ilmiah.

3.2 Bahan dan Alat

Dalam pelaksanaan penelitian mengenai “Analisis Kegagalan *Fuel Nozzle* Turbin Gas PLTG GT 12 Belawan menggunakan Metode *Root Cause Analysis* (RCA)”, diperlukan bahan dan alat penelitian untuk mendukung proses observasi, pengumpulan data, inspeksi, dokumentasi, dan analisis gangguan *fuel nozzle* pada turbin gas. Bahan dan alat penelitian digunakan untuk memperoleh data teknis yang berkaitan dengan kondisi operasional *fuel nozzle*, *combustion system*, dan *maintenance* turbin gas.

Penggunaan bahan dan alat penelitian disesuaikan dengan kebutuhan analisis gangguan *fuel nozzle* agar data yang diperoleh memiliki tingkat akurasi dan validitas yang baik. Selain itu, alat penelitian juga digunakan untuk mendukung proses inspeksi visual, pengukuran, dokumentasi, dan pengumpulan data operasional turbin gas pada PLTG GT 12 Belawan.

3.2.1 Bahan Penelitian

Bahan penelitian merupakan data, dokumen, maupun objek teknis yang digunakan dalam proses analisis gangguan *fuel nozzle* pada turbin gas PLTG GT 12 Belawan. Bahan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data operasional, data *maintenance*, serta komponen *fuel nozzle* yang menjadi objek analisis. Adapun bahan penelitian yang digunakan, antara lain:

3.2.1.1. *Fuel Nozzle* Turbin Gas

Fuel nozzle merupakan objek utama penelitian yang dianalisis untuk mengetahui jenis gangguan, kondisi kerusakan, serta pengaruhnya terhadap sistem pembakaran turbin gas. *Fuel nozzle* yang diteliti merupakan *fuel nozzle* yang digunakan pada combustion chamber turbin gas PLTG GT 12 Belawan. Analisis *fuel nozzle* dilakukan terhadap kondisi fisik *nozzle*, *carbon deposit*, *nozzle clogging*, erosi, korosi, *spray tip nozzle*, dan perubahan warna akibat *over temperature*.

3.2.1.2. Data Operasional Turbin Gas

Data operasional digunakan untuk mengetahui kondisi kerja turbin gas selama unit beroperasi. Data tersebut digunakan sebagai dasar analisis gangguan *fuel nozzle* dan pengaruhnya terhadap performa turbin gas. Data operasional diperoleh dari sistem *monitoring* dan *control room* PLTG GT 12 Belawan. Data operasional yang digunakan, antara lain *exhaust gas temperature*, *exhaust temperature spread*, *load* turbin gas, *fuel flow*, *combustion vibration*, *operating hours*, dan *start-up* dan *shutdown record*.

3.2.1.3. Data Maintenance Fuel Nozzle

Data *maintenance* digunakan untuk mengetahui histori pemeliharaan *fuel nozzle* serta jenis gangguan yang pernah terjadi selama operasi turbin gas. Data *maintenance* juga digunakan untuk mendukung proses identifikasi penyebab gangguan *fuel nozzle*. Data *maintenance*, antara lain laporan inspeksi *fuel nozzle*, *combustion inspection report*, *hot gas path inspection report*, *major overhaul report*, *cleaning* dan *replacement record*, dan dokumentasi *maintenance fuel nozzle*.

3.2.1.4. Manual Book dan Dokumen Teknis

Dokumen teknis digunakan sebagai referensi dalam memahami sistem kerja turbin gas dan prosedur *maintenance fuel nozzle*. Dokumen tersebut digunakan sebagai acuan dalam proses analisis gangguan dan evaluasi *maintenance fuel nozzle*. Dokumen yang digunakan, antara lain Siemens KWU gas turbine *maintenance manual*, *combustion inspection manual*, *Standard Operating Procedure* (SOP), *maintenance procedure fuel nozzle*, dan *technical drawing fuel nozzle*.

3.2.1.5. Literatur dan Jurnal Penelitian

Literatur dan jurnal digunakan sebagai sumber teori pendukung dalam penelitian. Literatur tersebut digunakan untuk mendukung pembahasan teoritis dan analisis hasil penelitian. Literatur yang digunakan, antara lain buku turbin gas, jurnal *combustion system*, jurnal *fuel nozzle*, jurnal *maintenance* turbin gas, dan penelitian terdahulu terkait analisis gangguan *fuel nozzle*.

3.2.2 Alat Penelitian

Inspeksi, dokumentasi, dan pengumpulan data penelitian. Penggunaan alat penelitian bertujuan untuk memperoleh data yang akurat terkait kondisi *fuel nozzle* dan *combustion system* pada turbin gas. Adapun alat penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.2.2.1. Kamera / Smartphone

Kamera digunakan untuk mendokumentasikan kondisi *fuel nozzle*, proses *maintenance*, *carbon deposit*, kerusakan *nozzle*, *combustion chamber*. Dokumentasi dilakukan sebagai data pendukung dalam proses analisis gangguan *fuel nozzle*.

3.2.2.2. Laptop / Komputer

Laptop digunakan untuk pengolahan data, penyusunan laporan penelitian, analisis data operasional, pengolahan tabel dan grafik, penyimpanan dokumentasi penelitian. *Software* yang digunakan, antara lain *Microsoft Word*, *Microsoft Excel*, *software* pengolahan data operasional.

3.2.2.3. Liquid Penetrant Test (LPT)

Metode ini bekerja dengan memanfaatkan kemampuan cairan penetran untuk meresap ke dalam retakan, porositas, atau cacat permukaan yang sangat kecil melalui aksi kapiler. Setelah cairan penetran diaplikasikan dan didiamkan selama waktu tertentu, kelebihan penetran dibersihkan dari permukaan, kemudian developer disemprotkan untuk menarik penetran yang terperangkap di dalam cacat, sehingga membentuk indikasi yang dapat diamati secara visual.

3.2.2.4. Thermogun / Infrared Thermometer

Thermogun digunakan untuk mengukur temperatur permukaan komponen saat proses inspeksi dan *maintenance*. Pengukuran temperatur dilakukan untuk mengetahui indikasi *over temperature*, distribusi panas, *abnormal temperature* pada *combustion system*.

3.2.2.5. Flow Test Equipment

Flow test equipment digunakan untuk melakukan pengujian aliran bahan bakar pada *fuel nozzle*. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kapasitas aliran

bahan bakar, keseimbangan *flow nozzle*, kondisi *spray pattern*, indikasi *nozzle clogging*.

3.2.2.6. Alat Tulis dan *Form Inspection*

Alat tulis digunakan untuk mencatat hasil observasi, data inspeksi, dan hasil wawancara selama penelitian berlangsung. *Form inspection* digunakan untuk mendokumentasikan kondisi *fuel nozzle*, hasil inspeksi, parameter operasional, hasil *maintenance*.

3.2.2.7. Alat Pelindung Diri (APD)

Alat pelindung diri digunakan selama penelitian di area pembangkit untuk menjaga keselamatan kerja. APD yang digunakan meliputi *safety helmet*, *safety shoes*, *wearpack*, sarung tangan, *ear plug*, dan *safety glasses*. Penggunaan APD wajib dilakukan karena area turbin gas memiliki tingkat kebisingan dan temperatur operasi yang tinggi.

3.2.2.8. *Software Monitoring Operasional*

Software monitoring digunakan untuk melihat data performa turbin gas secara *real time* maupun histori operasional. Data yang dipantau meliputi *exhaust gas temperature*, *fuel flow*, *combustion dynamics*, *turbine load*, dan *operating hours*. Data tersebut digunakan dalam proses analisis gangguan *fuel nozzle*.

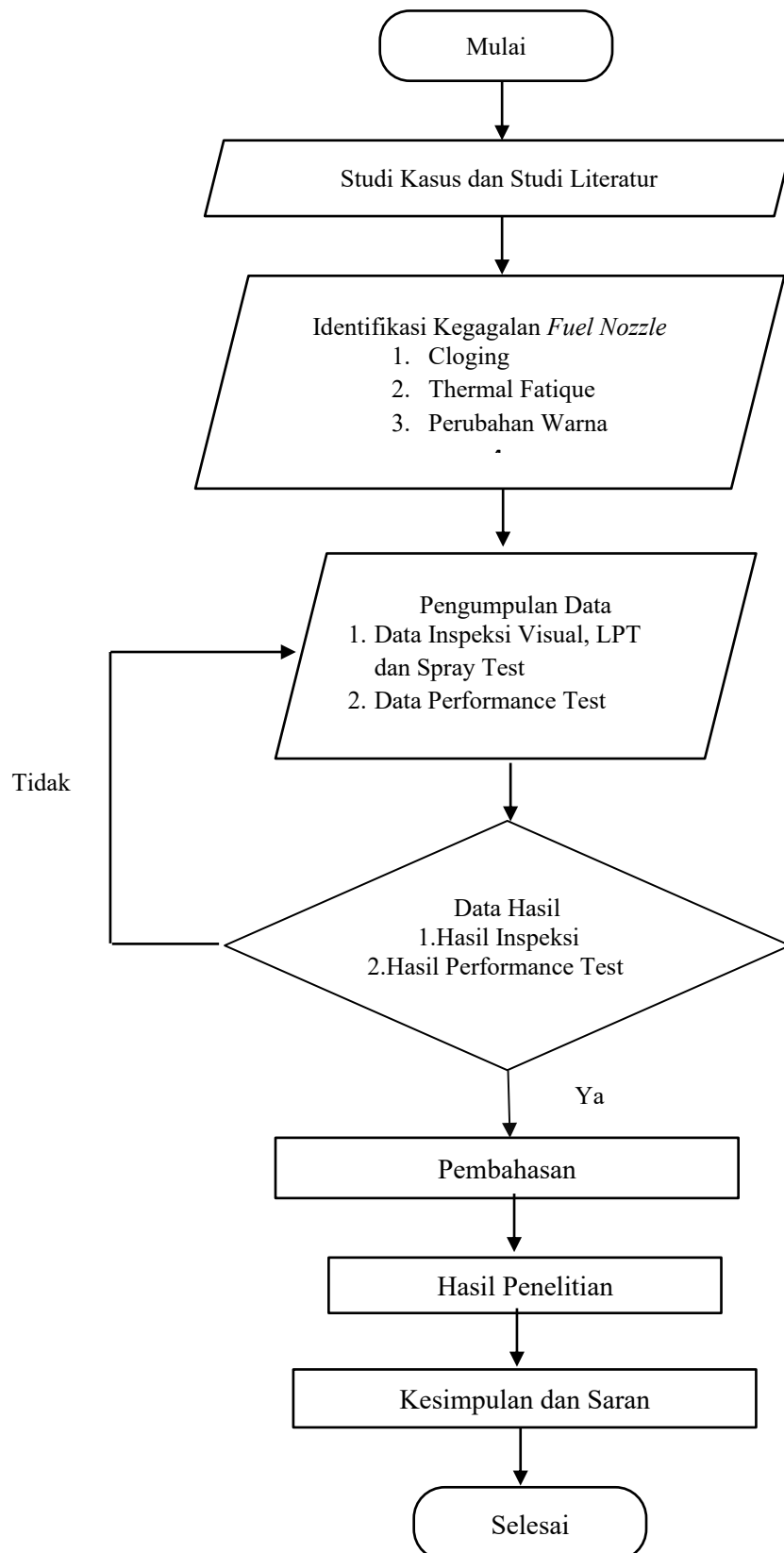
Bahan dan alat penelitian yang digunakan pada penelitian ini diharapkan mampu mendukung proses pengumpulan data dan analisis gangguan *fuel nozzle* secara optimal. Sehingga, hasil penelitian yang diperoleh dapat menggambarkan kondisi aktual *combustion system* turbin gas PLTG GT 12 Belawan secara teknis dan ilmiah.

3.3 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian (*flowchart research*) merupakan tahapan sistematis yang digunakan sebagai pedoman pelaksanaan penelitian mulai dari tahap awal hingga diperoleh hasil analisis dan kesimpulan penelitian. Pada penelitian mengenai gangguan *fuel nozzle* di PLTG GT 12 Unit Pembangkit Belawan, bagan alir penelitian disusun untuk mempermudah proses identifikasi masalah, pengumpulan data, analisis gangguan, serta penyusunan rekomendasi *maintenance fuel nozzle*. Bagan alir penelitian dibuat secara terstruktur agar proses penelitian dapat berjalan sesuai tujuan penelitian dan menghasilkan data yang relevan dengan kondisi aktual operasional turbin gas. Selain itu, bagan alir penelitian juga digunakan untuk menggambarkan hubungan antar tahapan penelitian, sehingga proses analisis dapat dilakukan secara sistematis dan ilmiah.

Tahapan penelitian dimulai dari identifikasi masalah yang terjadi pada *fuel nozzle* turbin gas, kemudian dilanjutkan dengan studi literatur mengenai *combustion system*, *fuel nozzle*, gangguan operasional, dan *maintenance* turbin gas. Setelah itu dilakukan observasi lapangan dan pengumpulan data operasional serta data *maintenance* yang berkaitan dengan gangguan *fuel nozzle*.

Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan metode analisis gangguan seperti analisis deskriptif, Fishbone Diagram, dan *Root Cause Analysis* (RCA). Hasil analisis digunakan untuk mengetahui jenis gangguan *fuel nozzle*, penyebab gangguan, dampak terhadap performa turbin gas, serta metode *maintenance* yang tepat untuk mencegah kerusakan berulang. Tahapan akhir penelitian yaitu penarikan kesimpulan dan pemberian saran berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan.



Gambar 3. 2 Bagan Diagram Alir

Adapun, tahapan pada bagan alir penelitian yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi gangguan yang terjadi pada *fuel nozzle* turbin gas di PLTG GT 12 Belawan. Identifikasi dilakukan berdasarkan, antara lain laporan gangguan, data operasional, histori *maintenance*, dan hasil inspeksi *fuel nozzle*. Gangguan yang dianalisis, antara lain *nozzle clogging*, *carbon deposit*, *over temperature*, *flame instability*, erosi, dan korosi *nozzle*.

2. Studi Literatur

Tahap studi literatur dilakukan untuk memperoleh teori pendukung terkait, antara lain PLTG, turbin gas, *combustion system*, *fuel nozzle*, *maintenance* turbin gas, dan analisis gangguan. Literatur diperoleh bersumber dari buku teknik, jurnal nasional, jurnal internasional, *manual book* Siemens KWU, dan penelitian terdahulu.

3. Observasi Lapangan

Observasi dilakukan secara langsung pada area *combustion system* dan *fuel nozzle* turbin gas di PLTG GT 12 Belawan. Kegiatan observasi yang dilakukan, antara lain pengamatan kondisi *fuel nozzle*, pengamatan proses *maintenance*, dokumentasi kerusakan *nozzle*, dan pengamatan sistem pembakaran turbin gas.

4. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan beberapa metode meliputi observasi, wawancara, dokumentasi, pengambilan data operasional, pengambilan data *maintenance*. Data yang dikumpulkan berupa *exhaust gas temperature*, *fuel flow*, *combustion vibration*, *operating hours*, *inspection report*, dan *maintenance report*.

5. Analisis Gangguan

Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan metode analisis deskriptif, Fishbone Diagram, FMEA, *Root Cause Analysis*. Analisis dilakukan untuk menentukan jenis gangguan *fuel nozzle*, penyebab gangguan, dampak terhadap turbin gas, dan prioritas *maintenance*.

6. Evaluasi dan Pembahasan

Tahap evaluasi dilakukan dengan membandingkan kondisi aktual *fuel nozzle*, standar *maintenance* OEM, teori *combustion system*, hasil penelitian terdahulu. Evaluasi bertujuan mengetahui efektivitas *maintenance fuel nozzle* pada PLTG GT 12 Belawan.

7. Kesimpulan dan Saran

Tahap akhir penelitian berupa penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis gangguan *fuel nozzle* dan pemberian saran untuk meningkatkan keandalan *combustion system* turbin gas.

3.4 Rancangan Alat Penelitian

Rancangan alat penelitian merupakan perencanaan penggunaan alat dan sistem pengambilan data yang digunakan untuk mendukung proses penelitian. Pada penelitian ini, rancangan alat penelitian disusun untuk membantu proses observasi, inspeksi, dokumentasi, pengukuran, dan analisis gangguan *fuel nozzle* pada turbin gas PLTG GT 12 Belawan.

Rancangan alat penelitian dilakukan agar proses pengumpulan data dapat berjalan secara sistematis dan menghasilkan data yang sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Selain itu, penggunaan alat penelitian juga bertujuan untuk meningkatkan akurasi hasil analisis gangguan *fuel nozzle* dan *combustion system*.

Penelitian ini tidak melakukan perancangan alat baru, melainkan menggunakan alat inspeksi dan *monitoring* yang tersedia pada sistem *maintenance* turbin gas PLTG Belawan.

3.4.1 Rancangan Sistem Pengambilan Data

Sistem pengambilan data pada penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, antara lain:

1. Pengamatan langsung di lapangan.
2. Pengambilan data operasional turbin gas.
3. Pengumpulan data *maintenance fuel nozzle*.
4. Dokumentasi hasil inspeksi.
5. Wawancara dengan operator dan teknisi maintenance.

Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengetahui hubungan gangguan *fuel nozzle* terhadap performa turbin gas.

3.4.2 Rancangan Pengamatan *Fuel Nozzle*

Pengamatan *fuel nozzle* dilakukan pada bagian *combustion system* turbin gas yang meliputi *fuel nozzle assembly*, *nozzle tip*, *combustion liner*, *transition piece*, dan *fuel flow system*. Pengamatan dilakukan untuk mengetahui terkait *carbon deposit*, *nozzle clogging*, erosi, korosi, perubahan warna akibat *over temperature*, kondisi *spray nozzle*.

3.4.3 Rancangan Pengukuran Parameter Operasional

Parameter operasional yang digunakan dalam penelitian ini, meliputi *exhaust gas temperature*, *exhaust temperature spread*, *combustion vibration*, *fuel flow*, *turbine load*, dan *operating hours*. Pengukuran parameter dilakukan menggunakan *control monitoring system*, *thermogun*, dan *software monitoring* turbin gas. Data parameter operasional digunakan untuk mengetahui pengaruh gangguan *fuel nozzle* terhadap performa turbin gas.

3.4.4 Rancangan Dokumentasi Penelitian

Dokumentasi dilakukan menggunakan kamera atau smartphone untuk merekam kondisi *fuel nozzle*, proses *maintenance*, *carbon deposit*, kerusakan *combustion system*, kegiatan inspeksi *fuel nozzle*. Dokumentasi digunakan sebagai data pendukung hasil analisis penelitian.

3.4.5 Rancangan Analisis Data

Data hasil penelitian akan dianalisis menggunakan beberapa metode, antara lain:

1. Analisis deskriptif.
2. Fishbone Diagram.
3. FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*).
4. *Root Cause Analysis* (RCA).

Analisis dilakukan untuk mengetahui jenis gangguan *fuel nozzle*, penyebab gangguan, dampak terhadap turbin gas, dan metode *maintenance* yang tepat.

3.4.6 Diagram Rancangan Penelitian

Rancangan alat penelitian yang digunakan pada penelitian ini diharapkan mampu mendukung proses analisis gangguan *fuel nozzle* secara optimal, sehingga hasil penelitian dapat memberikan gambaran teknis mengenai kondisi *combustion system* turbin gas pada PLTG GT 12 Unit Pembangkit Belawan.

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian merupakan tahapan kerja yang dilakukan secara sistematis untuk memperoleh data penelitian yang sesuai dengan tujuan penelitian. Pada penelitian mengenai “Analisis Kegagalan *Fuel Nozzle* Turbin Gas PLTG GT 12 Belawan menggunakan Metode *Root Cause Analysis* (RCA)”, prosedur penelitian disusun untuk mempermudah proses pengumpulan data, inspeksi *fuel nozzle*, analisis gangguan, serta evaluasi *maintenance* pada *combustion system* turbin gas.

Prosedur penelitian dilakukan secara bertahap mulai dari persiapan penelitian, observasi lapangan, pengumpulan data operasional dan *maintenance*, analisis gangguan *fuel nozzle*, hingga penarikan kesimpulan penelitian. Dengan adanya prosedur penelitian yang sistematis, proses penelitian diharapkan dapat berjalan secara efektif dan menghasilkan data yang valid serta sesuai kondisi aktual di lapangan. Adapun prosedur penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini, sebagai berikut:

3.5.1 Tahap Persiapan

Tahap persiapan merupakan tahap awal penelitian yang dilakukan sebelum pengambilan data di lapangan. Pada tahap ini dilakukan beberapa kegiatan, seperti menentukan topik penelitian, identifikasi masalah, pengajuan judul skripsi, pengumpulan referensi, studi literatur, persiapan administrasi penelitian.

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari teori mengenai PLTG, turbin gas, *combustion system*, *fuel nozzle*, *maintenance* turbin gas, metode analisis gangguan. Referensi pada penelitian diperoleh bersumber dari buku teknik, jurnal nasional, jurnal internasional, *manual book* Siemens KWU, dan penelitian terdahulu.

Tahap persiapan bertujuan untuk memahami sistem kerja *fuel nozzle* dan menentukan metode analisis yang digunakan pada penelitian.

3.5.2 Tahap Observasi Lapangan

Tahap observasi dilakukan secara langsung di area PLTG GT 12 Unit Pembangkit Belawan. Observasi dilakukan untuk mengetahui kondisi aktual sistem pembakaran turbin gas dan *fuel nozzle* yang menjadi objek penelitian. Kegiatan observasi, meliputi pengamatan *combustion system*, pengamatan *fuel nozzle*, pengamatan proses *maintenance*, pengamatan kondisi operasional turbin gas, dan dokumentasi kondisi *fuel nozzle*.

Pada tahap ini juga dilakukan pengenalan terhadap sistem operasi turbin gas, area *combustion chamber*, prosedur *maintenance fuel nozzle*, dan sistem *monitoring* operasional. Observasi lapangan dilakukan agar peneliti memperoleh gambaran teknis mengenai kondisi operasional *fuel nozzle* dan gangguan yang terjadi pada unit pembangkit.

3.5.3 Tahap Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh data yang berkaitan dengan gangguan *fuel nozzle* dan performa turbin gas. Data diperoleh melalui:

1. Observasi langsung.
2. Wawancara dengan operator dan teknisi *maintenance*.
3. Dokumentasi lapangan.
4. Pengambilan data operasional turbin gas.
5. Pengumpulan data *maintenance fuel nozzle*.

Data yang dikumpulkan meliputi *exhaust gas temperature*, *exhaust temperature spread*, *combustion vibration*, *fuel flow*, *operating hours*, *inspection report*, *maintenance report*, *combustion inspection record*, dan dokumentasi kerusakan *fuel nozzle*. Pengumpulan data dilakukan untuk mendukung proses identifikasi jenis gangguan *fuel nozzle* dan analisis penyebab kerusakan.

3.5.4 Tahap Inspeksi *Fuel Nozzle*

Tahap inspeksi dilakukan untuk mengetahui kondisi aktual *fuel nozzle* yang digunakan pada turbin gas PLTG GT 12 Belawan. Inspeksi dilakukan terhadap *nozzle tip*, *spray hole*, *carbon deposit*, *erosi nozzle*, korosi, retakan, dan perubahan

warna akibat temperatur tinggi. Metode inspeksi yang digunakan meliputi visual inspection, boroscope inspection, dokumentasi visual, dan pemeriksaan histori maintenance. Hasil inspeksi digunakan sebagai dasar analisis gangguan *fuel nozzle* dan evaluasi *maintenance combustion system*.

3.5.5 Tahap Analisis Data

Data hasil observasi dan inspeksi kemudian dianalisis menggunakan metode analisis gangguan untuk mengetahui penyebab kerusakan *fuel nozzle* dan dampaknya terhadap performa turbin gas. Metode analisis yang digunakan, meliputi analisis deskriptif, Fishbone Diagram, FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), *Root Cause Analysis* (RCA).

Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi jenis gangguan *fuel nozzle*, menentukan penyebab gangguan, mengetahui dampak gangguan terhadap sistem pembakaran, menentukan prioritas maintenance, dan memberikan rekomendasi perbaikan. Hasil analisis dibandingkan dengan teori turbin gas, manual *maintenance* Siemens KWU, dan penelitian terdahulu.

3.5.6 Tahap Evaluasi dan Pembahasan

Tahap evaluasi dilakukan dengan membandingkan kondisi aktual *fuel nozzle* terhadap standar operasional, standar *maintenance* OEM, teori *combustion system*, dan hasil penelitian terdahulu.

Evaluasi bertujuan untuk mengetahui efektivitas *maintenance fuel nozzle* serta menentukan tindakan yang dapat dilakukan untuk mengurangi gangguan pada *combustion system* turbin gas. Pembahasan dilakukan secara sistematis berdasarkan hasil analisis gangguan dan data operasional turbin gas.

3.5.7 Tahap Penarikan Kesimpulan

Tahap akhir penelitian dilakukan dengan menyusun kesimpulan berdasarkan hasil analisis gangguan *fuel nozzle* pada PLTG GT 12 Belawan. Kesimpulan yang diperoleh memuat jenis gangguan *fuel nozzle*, penyebab gangguan, dampak gangguan terhadap performa turbin gas, metode *maintenance* yang diterapkan, dan rekomendasi perbaikan dan pencegahan gangguan. Selain itu, diberikan saran yang dapat digunakan sebagai bahan evaluasi *maintenance fuel nozzle* pada unit pembangkit.

3.6 Variabel yang akan Diteliti

Variabel penelitian merupakan parameter atau faktor yang digunakan dalam proses pengamatan dan analisis penelitian. Pada penelitian mengenai gangguan *fuel nozzle* turbin gas di PLTG GT 12 Belawan, variabel penelitian digunakan untuk mengetahui hubungan antara kondisi *fuel nozzle* dengan performa *combustion system* dan operasional turbin gas. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari variabel bebas (*independent variable*) dan variabel terikat (*dependent variable*).

3.6.1 Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas merupakan variabel yang mempengaruhi perubahan kondisi pada sistem pembakaran turbin gas. Adapun variabel bebas dalam penelitian ini, antara lain:

1. Kondisi *Fuel Nozzle*

Kondisi *fuel nozzle* menjadi variabel utama yang dianalisis dalam penelitian. Parameter yang diamati, antara lain *nozzle clogging*, *carbon deposit*, erosi *nozzle*, korosi *nozzle*, *flame instability*, *over temperature*, dan kerusakan *nozzle tip*.

2. Sistem Pembakaran Turbin Gas

Variabel ini berkaitan dengan kondisi *combustion system* yang mempengaruhi performa pembakaran. Parameter yang diamati, antara lain distribusi bahan bakar, kualitas atomisasi, kestabilan nyala api, dan temperatur pembakaran.

3. *Maintenance Fuel Nozzle*

Variabel *maintenance* digunakan untuk mengetahui pengaruh kegiatan *maintenance* terhadap kondisi *fuel nozzle*. Parameter yang diamati, antara lain jadwal *maintenance*, *cleaning nozzle*, *inspection interval*, penggantian komponen, dan metode *maintenance*.

3.6.2 Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

Variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi oleh kondisi *fuel nozzle* dan *combustion system*. Adapun variabel terikat dalam penelitian ini meliputi:

1. Performansi Turbin Gas

Performansi turbin gas digunakan untuk mengetahui dampak gangguan *fuel nozzle* terhadap operasi turbin gas. Parameter yang diamati, antara lain efisiensi pembakaran, *exhaust gas temperature*, *exhaust temperature spread*, *combustion vibration*, *turbine load*, dan *fuel consumption*.

2. Keandalan Operasional Unit

Variabel ini digunakan untuk mengetahui pengaruh gangguan *fuel nozzle* terhadap keandalan pembangkit. Parameter yang diamati, antara lain gangguan operasional, *forced outage*, penurunan performa, dan kestabilan operasi turbin gas.

3.6.3 Hubungan Variabel Penelitian

Hubungan antar variabel pada penelitian ini dapat dijelaskan bahwa gangguan pada *fuel nozzle* akan mempengaruhi kualitas pembakaran pada *combustion chamber*. Kondisi tersebut menyebabkan perubahan temperatur pembakaran, peningkatan *exhaust temperature spread*, dan penurunan efisiensi turbin gas (Phillips & Simas, 2004).

Selain itu, metode *maintenance* yang diterapkan pada *fuel nozzle* juga mempengaruhi tingkat keandalan *combustion system* dan umur pakai komponen turbin gas. Oleh karena itu, analisis variabel penelitian dilakukan untuk mengetahui hubungan antara kondisi *fuel nozzle* dengan performa operasional turbin gas secara teknis dan sistematis.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai kondisi aktual *fuel nozzle* yang mengalami kegagalan pada turbin gas GT 12 Unit Pembangkit Belawan. Data diperoleh melalui observasi lapangan, inspeksi visual terhadap *fuel nozzle* bekas operasi (*material return*), hasil pengujian *liquid penetrant test* (LPT), riwayat pemeliharaan (*maintenance history*), data jam operasi (*operating hours*), serta dokumen gangguan operasi yang tersedia. Seluruh data tersebut digunakan sebagai dasar dalam melakukan analisis akar penyebab kegagalan menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA).

4.1.1 Data Kegagalan Tidak Langsung pada *Fuel Nozzle*

Data kegagalan tidak langsung pada *fuel nozzle* yaitu berdasarkan tampilan DCS munculnya *alarm fuel low pressure*. *Alarm fuel low pressure* yaitu indikator kritis adanya masalah pada jalur suplai bahan bakar sebelum mencapai *fuel nozzle*. Investigasi lebih lanjut terhadap riwayat alarm dan data operasional menunjukkan beberapa penyebab potensial. Berikut detail kronologi muncul alarm pada Tabel 5:

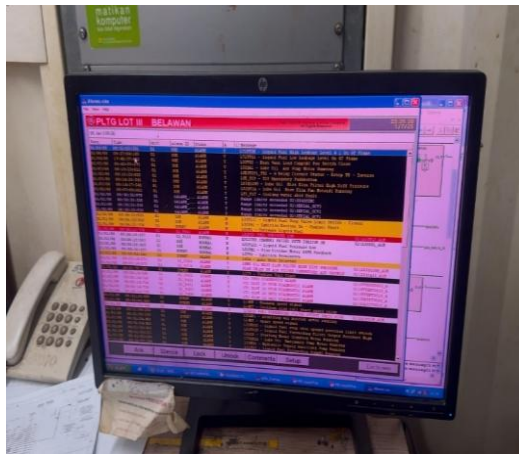
Tabel 5. Log Gangguan Operasi *Liquid Fuel Pressure Low Saat Proses Start UP*

Waktu Kejadian	Kronologi & Alarm DCS	Tindakan Perbaikan / Keterangan Teknis
05 Januari 2026	1. Stop Unit (Gagal Mode Firing)	1. Dilakukan 4 kali percobaan <i>Unit Start</i> dengan kemunculan alarm yang sama secara konsisten.
09.10 WIB	2. Status Alarm: <i>Liquid Fuel Pressure Low</i> (Terjadi 4 kali berulang)	2. Pemeriksaan pada komponen <i>pressure regulator</i> .
09.25 WIB		3. Pemeriksaan kondisi fisik membran <i>fuel valve</i> (terindikasi mengalami <i>material fatigue</i>).
18.03 WIB		
19.25 WIB		4. Pengujian <i>air pressure</i> pada <i>valve</i> beserta tindakan perbaikan dan pemeriksaan menyeluruh.

06 Januari 2026	1. Stop Unit (Gagal Mode <i>Firing</i>)	1. Dilakukan 8 kali percobaan <i>Unit Start</i> dengan kemunculan alarm yang sama secara masif.
09.42 WIB 10.47 WIB 15.14 WIB 15.45 WIB 16.50 WIB 18.11 WIB 18.27 WIB	2. Status Alarm: <i>Liquid Fuel Pressure Low</i> (Terjadi 8 kali berulang)	2. Pelaksanaan penggantian komponen membran <i>valve</i> baru. 3. Pemeriksaan kondisi <i>valve</i> dan pengujian kembali tekanan udara (<i>air pressure</i>) pada <i>valve</i> . 4. Tindakan perbaikan dan pemeriksaan ulang <i>pressure air</i> serta pengecekan <i>pressure regulator</i> . 5. Pengecekan visual pada <i>line</i> pipa distribusi dan <i>pressure Fuel Oil</i> (FO). 6. Pembongkaran (<i>disassembly</i>) <i>Regulating Valve</i> PCV 355 dan dilakukan tindakan <i>Bypass</i> PCV 355. 7. Simulasi proses <i>Venting</i> pada sisi <i>Outlet Forwarding Skirt</i> yang berdampak pada penurunan tekanan sistem dari 8 bar ke 3 bar.
07 Januari 2026 15.42 WIB	1. Stop Unit (Gagal Mode <i>Firing</i>) 2. Status Alarm: <i>Liquid Fuel Pressure Low</i>	1. Pemeriksaan parameter tegangan listrik (<i>voltage</i>), tekanan kerja (<i>pressure</i>), serta analisis fungsi kerja mekanis pada komponen <i>Main Stop Valve</i> .

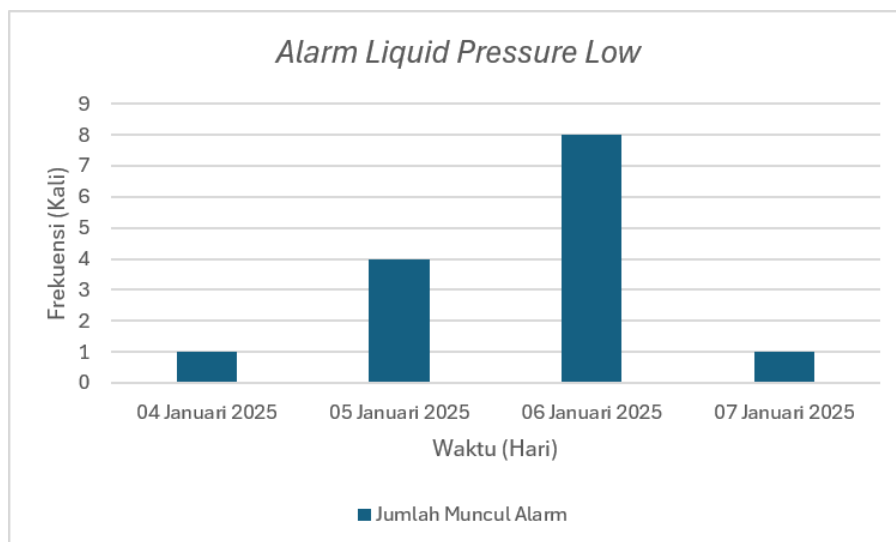
Mengacu pada Tabel 5, alarm *Liquid Fuel Pressure Low* terjadi berulang selama proses *start up* pada tanggal 5–7 Januari 2026 hingga menyebabkan unit mengalami *stop unit (gagal mode firing)*. Berbagai tindakan perbaikan telah dilakukan, meliputi pemeriksaan *pressure regulator*, *fuel valve*, jalur distribusi *fuel oil*, penggantian membran *valve*, serta pengujian tekanan sistem. Namun, alarm masih terus muncul sehingga diperlukan investigasi lebih lanjut untuk mengidentifikasi akar penyebab gangguan pada sistem suplai bahan bakar.

Indikasi gangguan tekanan pada sistem dapat dipantau melalui monitor DCS seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1, Tampilan DCS *Alarm Liquid Pressure Low*



Gambar 4.1 Tampilan DCS *Alarm Liquid Pressure Low*

Mengacu pada gambar 4.1, indikasi gangguan tekanan pada sistem dapat dipantau melalui monitor DCS yang menampilkan kondisi operasi turbin gas secara *real-time*. Melalui tampilan DCS, operator dapat memonitor berbagai parameter penting, seperti tekanan bahan bakar (*fuel pressure*), laju aliran bahan bakar (*fuel flow*), temperatur, kecepatan putaran turbin (*speed*), serta status alarm yang aktif. Munculnya alarm yaitu ketika unit akan melakukan proses *start up*. Karena saat dilakukan *start up* terdapat gangguan maka bahan bakar tidak masuk ke ruang bakar akan. Frekuensi munculnya alarm ditunjukkan pada di bawah ini:

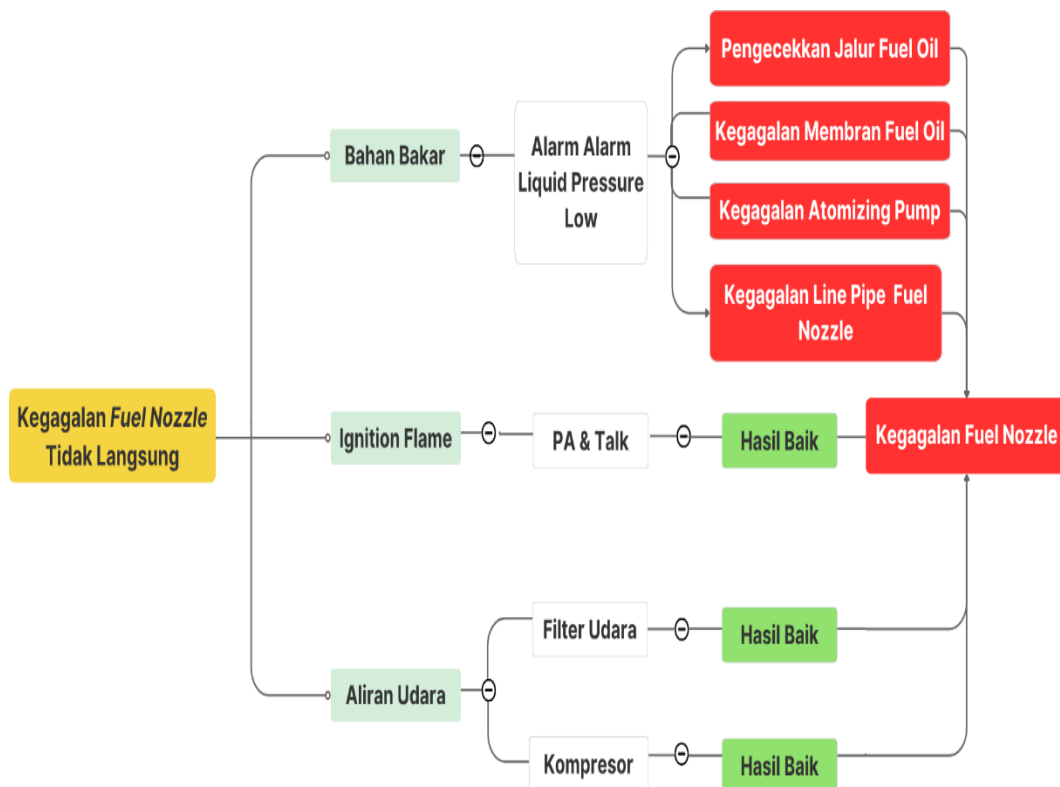


Gambar 4.2 Grafik Jumlah Alarm Muncul Saat Dilakukan *Start Up* Unit PLTG

Jumlah frekuensi kejadian terhadap waktu kejadian ditunjukkan pada Gambar 4.2. Pada grafik tersebut, sumbu horizontal mewakili frekuensi (kali), sedangkan

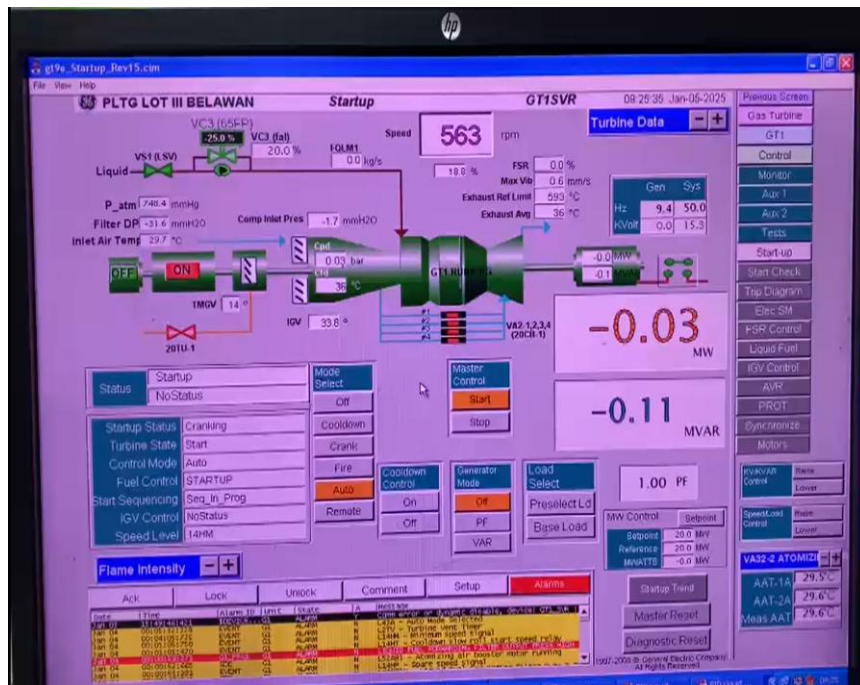
sumbu vertikal menunjukkan waktu (hari) dilakukannya *start-up* unit pembangkit dan muncul alarm. Hubungan antara jumlah kejadian alarm dan waktu yaitu setiap kali unit dilakukan *start-up* maka muncul alarm dikarenakan permasalahan suplai bahan bakar sampai ke *fuel nozzle* belum terselesaikan (sumber data Lampiran 1).

Untuk mengidentifikasi permasalahan gangguan tersebut, maka di gunakan metode *Root Cause Analysis* pada sistem pembakaran yang dijelaskan pada Gambar 4.3. Berikut ini diagram alur untuk mengidentifikasi gangguan dan perbaikan:



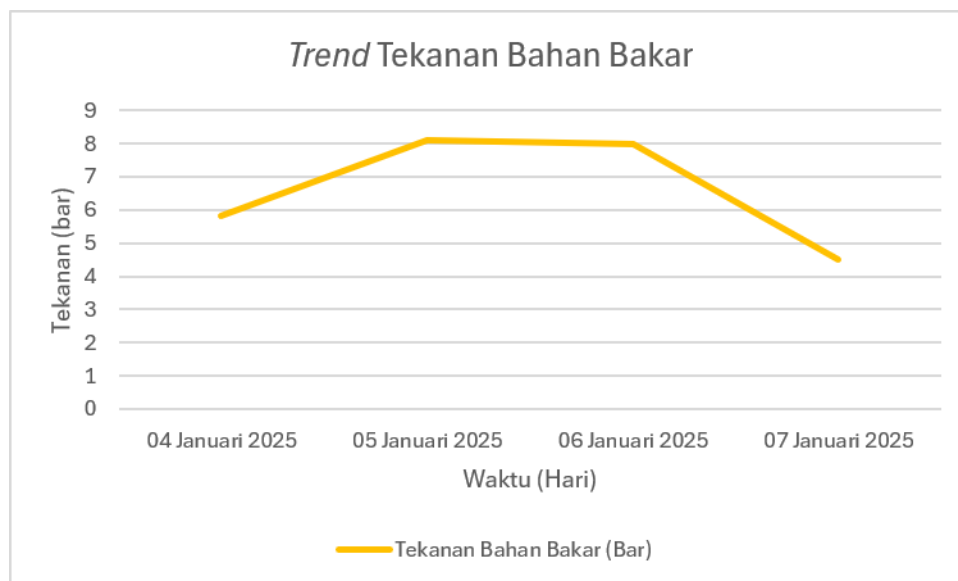
Gambar 4.3 Diagram Alur Indentifikasi Gangguan dan Perbaikan

Pada Gambar 4.3 menunjukkan alur pengecekan secara bertahap, mulai dari pengecekan aliran udara, *ignition flame* hingga ke saluran bahan bakar. Dari hasil penelusuran ditemukan gangguan pada kegagalan membran *fuel oil* dan *atomizing pump*. Tampilan DCS terus dilakukan pemantauan parameter untuk mengetahui perubahan setelah perbaikan ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Tampilan DCS Parameter Operasi

Pada tampilan DCS Gambar 4.4 *fuel oil* belum masuk ke ruang bakar, sedangkan pada saluran *fuel oil* terdapat tekanan setiap percobaan *start up*. Berikut ini tren tekanan pada setiap percobaan *start up* unit pada Gambar 4.5:



Gambar 4.5 Grafik Tekanan Bahan Bakar

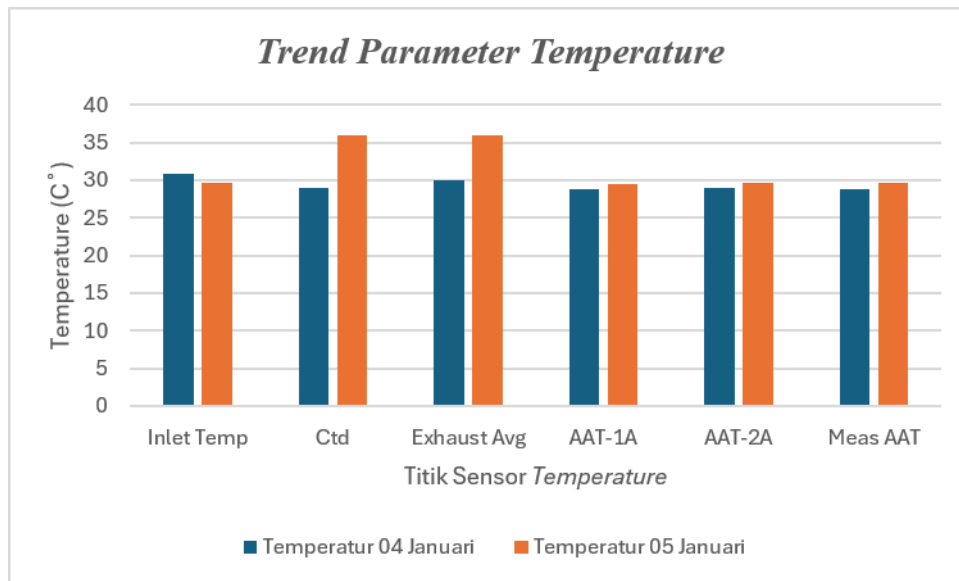
Pada Gambar 4.5 sumbu x menunjukkan tekanan (bar) sedangkan sumbu y waktu beroperasi unit. Pada grafik di tunjukan masih terdapat tekanan pada *pipe oil* yang menandakan masih terdapat aliran bahan bakar. Tekanan masih sesuai standar

pengoperasian antara 5 sampai 9 bar, akan tetapi pada tanggal 07 Januari 2025 dilakukan percobaan venting udara tekanan mengalami penurunan menjadi 4,5 bar. Tujuan dilakukan venting untuk mengeluarkan udara yang masih terdapat dalam pipa (sumber data Lampiran 2). Pemantauan tekanan dilakukan seperti pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 *Pressure Indicator* pada *Pipe Fuel Oil*

Mengacu pada Gambar 4.6, *pressure indicator* dipasang pada jalur *fuel oil* untuk memantau tekanan bahan bakar sebelum dialirkan ke sistem pembakaran. Pembacaan tekanan pada instrumen ini digunakan untuk memastikan tekanan bahan bakar berada dalam rentang operasi yang ditentukan. Apabila tekanan yang terbaca berada di bawah nilai normal, kondisi tersebut dapat mengindikasikan adanya gangguan pada sistem suplai bahan bakar, seperti penyumbatan, kebocoran, atau kerusakan komponen, yang berpotensi memicu alarm *Liquid Fuel Pressure Low* dan menyebabkan kegagalan proses *start up*. Pemantauan juga dilakukan pada temperatur pada Gambar 4.7 dimana sumbu x menunjukkan Tingkat temperatur ($^{\circ}\text{C}$), sedangkan sumbu y bagian pada masing-masing titik sensor temperatur.



Gambar 4.7 Grafik Trend Parameter Temperatur

Berdasarkan data grafik Gambar 4.7, pada tanggal 04 Januari dan 05 Januari 2025, tercatat alarm aktif *Fuel Low Pressure* (tekanan bahan bakar rendah) yang berulang. Meskipun, pada fase *cooldown* (98 rpm) dan *cranking* awal 563 rpm aliran bahan bakar normalnya belum diinjeksikan secara masif $FQLM1 = 0,0 \text{ kg/s}$) indikasi tekanan pada manifold bahan bakar berada jauh di bawah nilai batas minimum (*trip setpoint*), menghalangi proses *permissive start* untuk masuk ke fase *firing* (sumber data Lampiran 3).

Melalui investigasi fisik dan pembongkaran instrumen pasca-kejadian, diidentifikasi dua penyebab utama kegagalan (*double-fault*) yaitu pada membran *fuel valve* di dalam *actuator valve fuel oil* mengalami getas atau kehilangan kelenturan yang terbuat dari bahan karet (baik pada *Liquid Fuel Stop Valve VS1* maupun *Control Valve VC3*). Penurunan performa (*malfunction*) pada *atomizing air pump* (pompa udara atomisasi) yang tidak mampu menyuplai tekanan udara pengabutan konstan ke *fuel nozzle*.

Mekanisme kegagalan ini dapat dijelaskan melalui analisis mekanika fluida dan kontrol aktuator pneumatik/hidrolik:

1. Kegagalan membran *valve* yaitu katup kontrol aliran bahan bakar minyak (*fuel oil*) mengandalkan membran *fuel valve* yang fleksibel untuk mengubah tekanan udara instrumen penengah (*control air*) menjadi gerakan mekanis

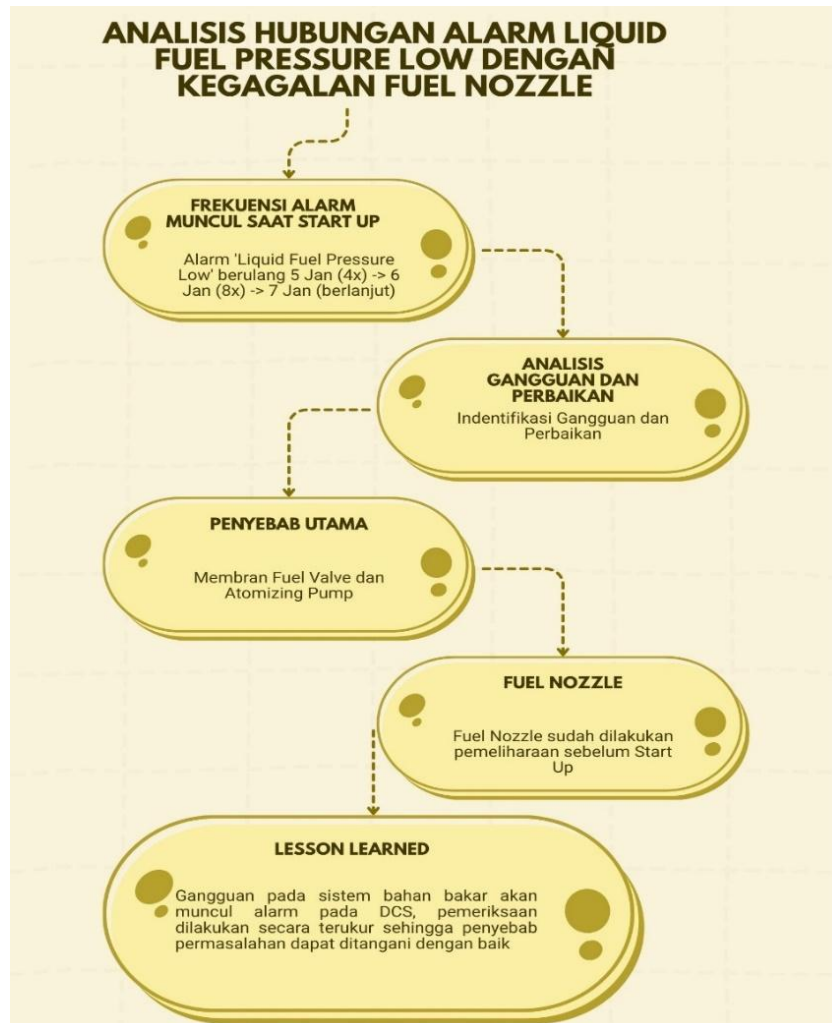
translasi untuk membuka plunger katup. Adanya pengerasan material (*aging/fatigue*) pada membran ini menyebabkan terjadinya kebocoran udara kontrol (*control air leakage*). Akibatnya, gaya pegas pengembali (*return spring*) mengalahkan gaya dorong diafragma. Hal ini mencekik aliran (*throttling effect*) dan menyebabkan tekanan jatuh (*pressure drop*) drastis pada sisi setelah katup (*downstream*) yang langsung terbaca oleh sensor sebagai *Fuel Low Pressure*.

2. Ketika *atomizing air pump* mengalami gangguan, maka tekanan udara atomisasi yang masuk ke *fuel nozzle* menurun tajam. Penurunan tekanan udara atomisasi ini mengakibatkan hilangnya efek ejektor pada *fuel nozzle*, sehingga bahan bakar cair tertahan (*backpressure*) di dalam jalur pipa distribusi utama dan menurunkan tekanan statis pengaliran pada manifold bahan bakar minyak.

Menurut standarisasi *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) untuk sistem turbin gas pembakaran cair untuk sistem turbin gas pembakaran cair oleh Heinz P. Bloch (2008) dalam buku *Steam Turbines: Design, Application, and Re-Rating*, kerusakan pada elemen elastomer fleksibel seperti membran katup merupakan salah satu *common-cause failure* yang paling sering memicu kegagalan start (*fail to start*). Bloch menjelaskan bahwa kebocoran pada membran aktuator akan mendistorsi sinyal masukan instrument 3-15 psi atau elektro-hidrolik. Selain itu, korelasi antara kualitas pengabutan udara-bahan bakar oleh pompa atomisasi dijelaskan oleh Lefebvre (2010) dalam *Atomization and Sprays*, di mana penurunan tekanan udara pengabut berbanding lurus dengan peningkatan ukuran rata-rata tetesan (*Sauter Mean Diameter / SMD*) yang secara termodinamika meningkatkan hambatan hidrolik lokal pada *fuel nozzle* bahan bakar.

Implikasi dari kegagalan ganda ini sangat kritis, dikarenakan pasokan solar yang masuk terlalu sedikit akibat katup yang terhambat, ditambah kualitas pengabutan yang buruk (menetes, bukan mengabut). Tetesan solar mentah yang tidak terbakar akan mengendap di dasar ruang bakar dan berisiko memicu ledakan susulan (*delayed ignition / hot start*) yang dapat merusak sudu-sudu turbin gas (*turbine blades*) secara permanen. Oleh karena itu, tindakan perbaikan berupa penggantian membran katup dan kalibrasi ulang pompa udara atomisasi wajib

diselesaikan sebelum unit diizinkan melakukan *start* kembali. Penjelasan hubungan *alarm liquid pressure low* dengan kegagalan *fuel nozzle* dijelaskan melalui diagram alur pada Gambar 4.8

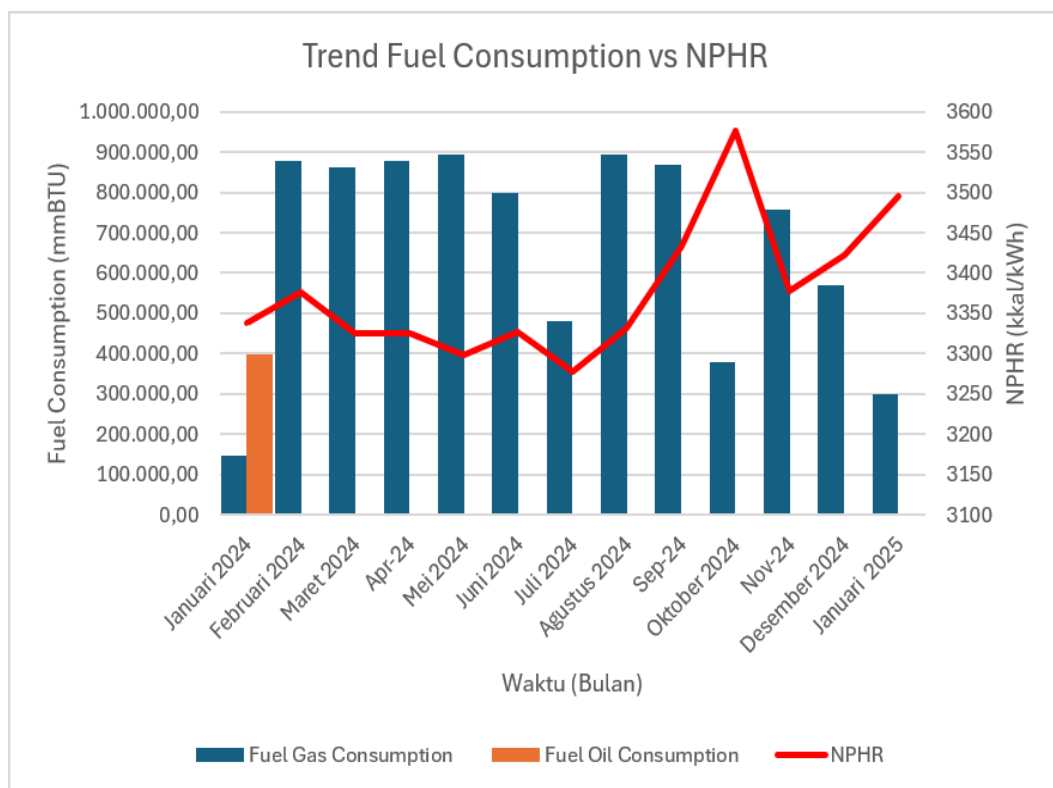


Gambar 4.8 Analisis Hubungan *Alarm Liquid Fuel Pressure Low* dengan Kegagalan *Fuel Nozzle*

Berdasarkan analisis Gambar 4.8 kegagalan *fuel nozzle* bukan menjadi penyebab utama langsung melainkan dampak dari gangguan sistem bahan bakar. Pembahasan ini penting disampaikan agar jika terjadi alarm penyebabnya dapat dari berbagai komponen sehingga tidak langsung melakukan pemeliharaan di *fuel nozzle* karena akan masuk ke kategori *overhaul*. Dimana kategori *overhaul* mempunyai durasi yang panjang dan biaya yang besar.

4.1.2 Data Penggunaan Bahan Bakar

Turbin gas GT 12 Unit Pembangkit Belawan menggunakan gas alam (*natural gas*) sebagai bahan bakar utama dalam proses pembangkitan listrik. Gas alam dipilih karena memiliki nilai kalor yang tinggi, pembakaran yang lebih bersih, serta menghasilkan emisi yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar cair. Bahan bakar dialirkan melalui sistem *fuel gas system* menuju *fuel nozzle* yang berfungsi mengatomisasi bahan bakar agar tercampur secara homogen dengan udara di dalam ruang bakar. Berikut ini data perbandingan *fuel consumption* dibandingkan dengan NPHR pada Gambar 4.9 sumbu x sebelah kiri adalah jumlah pemakaian bahan bakar gas (mmBTU) dan bahan bakar minyak (liter) sedangkan sumbu x sebelah kanan menunjukkan nilai NPHR (kcal/kWh) serta sumbu y adalah waktu (bulan):



Gambar 4.9 Grafik *Trend Fuel Consumption vs NPHR*

Grafik bar Gambar 4.9 merupakan pemakaian bahan bakar *fuel gas* pada Januari – Juni 2024 menunjukkan penggunaan *fuel gas* secara stabil pada kisaran 800.000-900.000 MMBtu dapat dilihat pada *bar fuel gas consumption* kecuali Januari yang menggunakan kombinasi *fuel oil* 400.000 Liter dan *fuel gas* rendah. Pada fase ini, nilai NPHR terjaga fluktuatif namun stabil di kisaran rendah, dengan

titik optimum pada Juli 2024 di mana NPHR menyentuh nilai terendah sekitar 3.280 kkal/kWh dapat dilihat pada garis merah. Periode Anomali Kritis (Agustus – Oktober 2024), mulai Agustus 2024 grafik merekam lonjakan garis merah (NPHR) yang sangat tajam dan linear hingga mencapai puncak tertinggi pada Oktober 2024 di angka 3.580 kkal/kWh. Dari data grafik perbandingan setelah menggunakan *fuel oil* mengalami lonjakan dari 3350 kkal/kWh menjadi 3400 kkal/kWh. Sedangkan, kenaikan ekstrem NPHR ini terjadi justru saat volume konsumsi *Fuel Gas* menurun drastis dari 870.000 MMBtu (September) menjadi hanya 380.000 MMBtu (Oktober). Periode pasca-gangguan (November 2024 – Januari 2025) yaitu setelah sempat turun pada November 2024, tren NPHR kembali merangkak naik secara linear menuju Januari 2025 menyentuh angka 3.500 kkal/kWh, berbanding terbalik dengan konsumsi *Fuel Gas* yang terus merosot hingga ke titik terendah 300.000 MMBtu (sumber data Lampiran 4).

Penurunan konsumsi bahan bakar gas pada Oktober 2024 dan Januari 2025 karena penurunan MW yang dihasilkan PLTG. Kondisi NPHR naik tinggi mengindikasikan terjadinya inefisiensi termal yang sangat parah. Akar penyebab dari fenomena ini adalah Unit terpaksa dioperasikan pada beban rendah (*Part-Load /Low Load Operation*) akibat pembatasan operasi (*Forced Derating*) yang dipicu oleh risiko kerusakan termal akibat *fuel nozzle* yang terdegradasi parah.

Korelasi hidrodinamika *fuel nozzle* terhadap bentuk grafik ini dapat dijelaskan melalui rantai mekanistik sebagai berikut:

1. Akumulasi kerak karbon di Bulan Agustus yaitu menjelang Agustus 2024 (setelah beroperasi ribuan jam sejak *overhaul*), penumpukan *carbon coking* pada *nozzle tip* telah mencapai ketebalan kritis. Hal ini menyebabkan distorsi sudut semprotan (*spray angle*) dan pembentukan droplet makro yang kasar.
2. Pemicuan *exhaust temperature spread* yaitu pembakaran yang tidak merata akibat atomisasi kasar menghasilkan profil temperatur gas buang yang timpang (*high temperature spread*). Agar sudu turbin tidak meleleh akibat jilatan api lokal (*hot spot*), operator terpaksa menurunkan beban daya pembangkit (*forced derating*). Penurunan beban inilah yang menyebabkan volume total konsumsi

Fuel Gas di bulan Oktober turun tajam (karena megawatt yang dihasilkan kecil).

3. Hukum penurunan efisiensi beban rendah (*Part-Load Penalty*) yaitu secara termodinamika, turbin gas kelas *heavy-duty* didesain untuk beroperasi optimum pada beban penuh (*Base Load*, 100%). Ketika unit dipaksa *derating* (beban rendah) akibat gangguan *fuel nozzle*, efisiensi termal siklus Brayton akan anjlok drastis. Konsumsi bahan bakar per kWh listrik yang dihasilkan justru membengkak secara eksponensial (Walsh & Fletcher, 2004).

Pada kondisi pembakaran yang rusak dan beban rendah di Oktober 2024, fraksi panas yang terbuang (*heat loss*) melalui gas buang dan pembakaran tidak sempurna meningkat tajam. Akibatnya, pembagi (kWh neto) mengecil jauh lebih cepat daripada penurunan input kalor yang secara matematis melambungkan grafik NPHR ke titik tertinggi (3.580 kkal/kWh).

Korelasi riwayat inspeksi yaitu anomali lonjakan NPHR ini berkorelasi presisi secara pola waktu dengan penemuan indikasi kerusakan *fuel nozzle* pada riwayat inspeksi pemeliharaan (tercatat pada data gangguan sebelumnya bahwa indikasi kerusakan *fuel nozzle* kerap muncul berdekatan pada periode Juli 2024, Oktober–November 2024, dan awal 2025).

Karakteristik grafik yang menunjukkan pembengkakan NPHR pada kondisi *part-load* akibat gangguan komponen ini sangat sesuai dengan diagram performa turbin gas yang dipaparkan oleh Walsh dan Fletcher (2004) dalam *Gas Turbine Performance*. Mereka menyatakan bahwa pengoperasian turbin gas di bawah 50% beban desain akan menaikkan *Specific Fuel Consumption* (SFC) atau Heat Rate hingga 15 – 25% akibat penurunan efisiensi kompresor dan temperatur inlet turbin (*Turbine Inlet Temperature* / TIT).

Matt Oakes et al. (2023) menyatakan bahwa kerusakan fisik pada *fuel nozzle* dapat menyebabkan perubahan pola distribusi bahan bakar, sehingga proses atomisasi dan pencampuran udara–bahan bakar menjadi kurang homogen. Kondisi ini menurunkan efisiensi pembakaran dan meningkatkan konsumsi bahan bakar spesifik. Akibatnya, nilai aktual *Net Plant Heat Rate* (NPHR) mengalami

peningkatan dibandingkan *baseline* performa desain yang menunjukkan terjadinya degradasi kinerja pembangkit.

Fluktuasi liar dan tren kenaikan linear NPHR dari November 2024 hingga Januari 2025 memberikan implikasi nyata yang harus segera dimitigasi, antara lain:

1. Kerugian finansial tersembunyi (*hidden cost of derating*) yaitu meskipun konsumsi bahan bakar di bulan Oktober 2024 terlihat "sedikit" secara volume grafik, biaya produksi per kWh listrik yang dihasilkan pada bulan tersebut adalah yang termahal sepanjang tahun karena nilai NPHR yang menyentuh 3.580 kkal/kWh (boros energi).
2. Indikator prediktif untuk pemeliharaan menunjukkan bahwa dalam grafik tren NPHR ini membuktikan bahwa parameter NPHR dapat digunakan sebagai instrumen *Condition-Based Monitoring* (CBM) (Oakes et al., 2023). Ketika garis NPHR mengalami kenaikan kemiringan (*slope*) yang tajam selama dua bulan berturut-turut (seperti Agustus ke September), hal tersebut harus dibaca sebagai sinyal peringatan dini (*early warning sign*) bahwa *fuel nozzle* sedang mengalami pembentukan kerak karbon aktif, sebelum akhirnya unit mengalami *forced outage* atau *forced derating* total seperti yang terjadi pada bulan Oktober.

4.1.3 Data Visual Kondisi *Fuel Nozzle*

Pemeriksaan visual dilakukan untuk mengetahui kondisi aktual *fuel nozzle* secara langsung tanpa menggunakan metode pengujian tidak merusak. Pemeriksaan ini difokuskan pada perubahan bentuk, perubahan warna, adanya deposit, indikasi retak, maupun kerusakan mekanis lainnya.

Berdasarkan hasil observasi yang dilakukan, diperoleh beberapa temuan sebagai berikut:

1. Permukaan *nozzle* mengalami perubahan warna menjadi cokelat kehitaman yang mengindikasikan paparan temperatur tinggi secara terus-menerus.
2. Terdapat penumpukan deposit karbon pada lubang keluaran bahan bakar yang berpotensi mengganggu proses atomisasi.

3. Pada bagian ujung *nozzle* ditemukan indikasi retak halus, sehingga diperlukan pengujian lebih lanjut menggunakan metode *Liquid Penetrant Test*.
4. Tidak ditemukan deformasi ataupun patahan pada badan *fuel nozzle*.

Tampilan bentuk *fuel nozzle* yang mengalami deposit dan perubahan warna ditunjukkan pada Gambar 4.10 sampai 4.15.



Gambar 4.10 *Fuel Nozzle Ex Part* PLTG GT 12

Tampilan keseluruhan *fuel nozzle* ditunjukkan pada Gambar 4.10 *Fuel Nozzle Ex Part* PLTG GT 12. Hasil pemeriksaan visual menunjukkan bahwa kerusakan yang terjadi lebih dominan berupa degradasi akibat temperatur tinggi dibandingkan kerusakan akibat benturan mekanis.



Gambar 4.11 Batang *Fuel Nozzle* Mengalami Perubahan Warna

Pada gambar 4.11 batang *fuel nozzle* mengalami perubahan warna menjadi kehitaman dan bagian dalam terjadi *carbon deposit* seperti yang dijelaskan pada sub bab 4.1.3.



Gambar 4.12 Perubahan Warna Pada Sambungan *Fuel Nozzle*

Pada gambar 4.12 terjadi perubahan warna menjadi kehitaman pada sambungan *fuel nozzle* yang menghubungkan antara *body fuel nozzle* dan *tip fuel nozzle*. Perubahan terjadi pada sisi bagian dalam dan luar.



Gambar 4.13 Deposit Karbon pada Ujung *Fuel Nozzle*

Pada gambar 4.13 terjadi penurunan pada inti *tip fuel nozzle* terhadap *casing tip fuel nozzle* ditunjukkan pada anak panah dan deposit karbon yang ditunjukkan pada lingkaran merah.



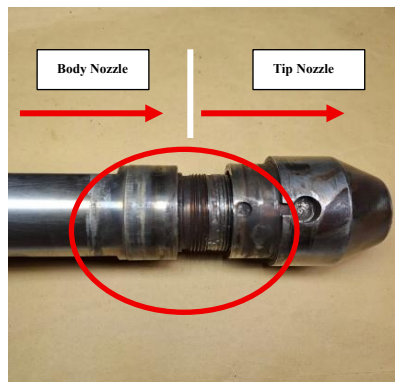
Gambar 4.14 Perubahan Warna Pada *Tip Fuel Nozzle*

Pada gambar 4.14 perubahan warna pada *tip fuel nozzle* mengalami perubahan warna menjadi kehitaman pada bagian luar yang ditunjukkan pada lingkaran dan anak panah pada bagian dalam yang tempat dudukan *sleeve fuel nozzle*.



Gambar 4.15 Ulir *Fuel Nozzle* Mengalami Kerusakan

Pada gambar 4.15 ulir *fuel nozzle* mengalami kerusakan akibat pembakaran *fuel nozzle* yang berulang ketika dilakukan pembersihan maupun penggantian *tip nozzle* dan ulir mengalami peregangan, sehingga antar ulir *tip nozzle* dengan *body fuel nozzle* saling menekan.



Gambar 4.16 *Tip Fuel Nozzle* dengan *Body Fuel Nozzle* Tidak Simetris

Pada gambar 4.16 *tip fuel nozzle* dengan *body fuel nozzle* tidak simetris, sehingga terdapat celah yang mengakibatkan bocornya aliran bahan bakar.

Berdasarkan observasi visual pada Gambar 4.11, Gambar 4.12, dan Gambar 4.14, terlihat perubahan warna (*discoloration*) yang sangat jelas pada permukaan luar logam *fuel nozzle*. Permukaan batang (*shaft*) yang semula berwarna perak metalik terang (*bright metallic silver*) mengalami degradasi warna menjadi abu-abu gelap, kecokelatan, hingga kebiruan (*blue-bronze oxide film*), terutama pada area sambungan (*sleeve*) dan mendekati bagian *tip fuel nozzle*. Perubahan warna ini mengindikasikan terjadinya reaksi termal abnormal pada permukaan material selama masa operasi unit.

Pemicu utama perubahan warna ini adalah paparan temperatur tinggi yang ekstrem (*high-temperature exposure*) secara konduktif dan radiatif dari ruang bakar (*combustor liner*) yang diperparah oleh kegagalan sistem udara pendingin atau udara atomisasi (*atomizing air system cooling failure*). Kondisi ini memicu reaksi oksidasi termal pada permukaan logam dasar yang bersentuhan dengan gas panas sisa pembakaran.

Secara metalurgi fisik, *fuel nozzle* turbin gas umumnya terbuat dari paduan super berbasis nikel (*nickel-base superalloy*, seperti Hastelloy X atau Inconel 617) atau baja tahan karat austenit (*austenitic stainless steel* AISI 310/316). Pembentukan lapisan film tipis berwarna kecokelatan hingga kebiruan ini terjadi melalui mekanisme oksidasi termal selektif (*selective thermal oxidation*).

1. Pada temperatur tinggi (300°C hingga 600°C), unsur penstabil seperti Kromium (Cr) di dalam matriks logam bereaksi dengan oksigen bebas di

lingkungan sekitar membentuk lapisan pelindung Kromium Oksida (Cr_2O_3) super tipis.

2. Peningkatan laju difusi ini mempertebal lapisan oksida (Cr_2O_3 dan Fe_2O_3). Ketebalan lapisan oksida yang bervariasi pada skala nanometer menyebabkan fenomena interferensi cahaya tipis (*thin-film interference*). Cahaya yang memantul dari permukaan luar oksida berinterferensi dengan cahaya yang memantul dari batas logam-oksida di bawahnya.
3. Spektrum warna kebiruan hingga abu-abu gelap ini secara empiris mengindikasikan bahwa permukaan logam telah terpapar temperatur kerja abnormal berkisar antara 450°C hingga 650°C di area luar *fuel nozzle*, jauh melampaui batas temperatur rancangan dinding luar batang *fuel nozzle* yang seharusnya terjaga di bawah 250°C oleh aliran udara pendingin.

Fenomena oksidasi termal dan interferensi warna pada *superalloy* ini sesuai dengan penelitian yang dilaporkan oleh Reed (2008) dalam buku *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Reed menjelaskan bahwa transisi warna permukaan logam dari kuning jerami (*straw yellow*), cokelat, ungu, hingga biru tua pada baja paduan tinggi adalah fungsi langsung dari ketebalan lapisan oksida yang tumbuh akibat paparan termal berlebih (*overheating*). Selain itu, Fathyunes dan Mohtadi-Bonab (2023) dalam penelitian kegagalan komponen turbin gas menyatakan bahwa perubahan warna permukaan *fuel nozzle* menjadi abu-abu kusam/gelap merupakan indikasi awal terjadinya fenomena *high-temperature oxidation* yang menyebabkan penipisan dinding struktural aktif akibat hilangnya unsur Cr di dekat permukaan (*chromium depletion*).

Secara struktural, perubahan warna yang mengindikasikan *overheating* ini memiliki implikasi merusak yang fatal bagi integritas mekanis *fuel nozzle*, antara lain:

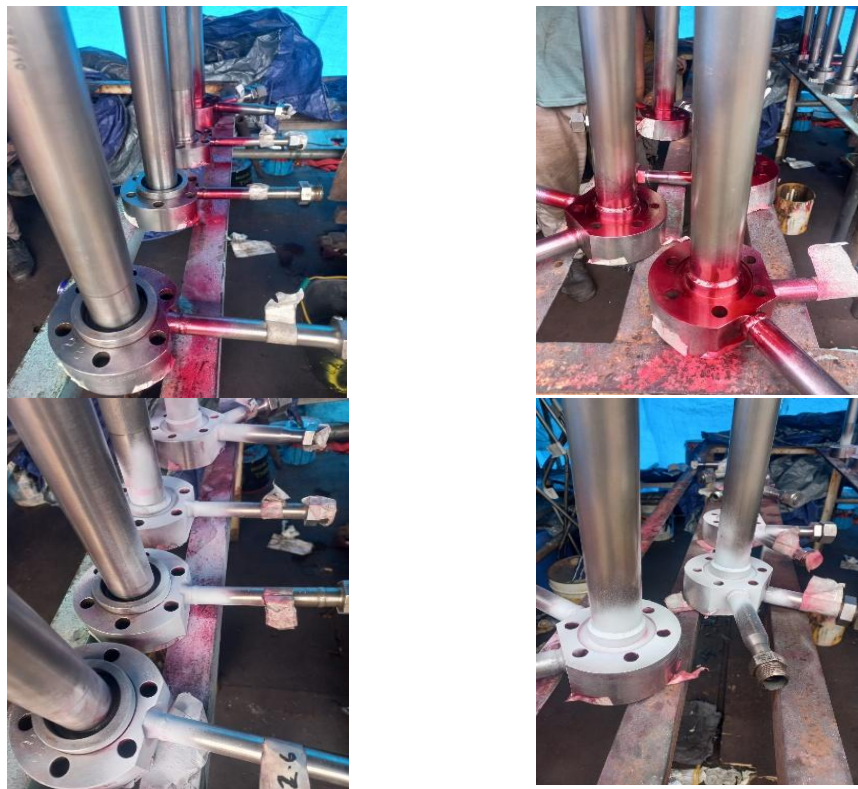
1. Paparan suhu di atas 500°C secara terus-menerus akan menurunkan kekuatan luluh (*yield strength*) dan ketahanan fatika (*fatigue life*) material secara drastis.
2. Jika terus dibiarkan tanpa perbaikan sistem pendinginan, material akan rentan mengalami perayapan termal (*thermal creep*) dan retak lelah termal (*thermal fatigue cracking*) akibat siklus *start-stop* turbin yang berulang (*thermal*

cycling). Retakan mikro ini pada akhirnya dapat menyebabkan patahnya batang *fuel nozzle* secara katastropik di dalam ruang bakar (Fathyunes & Mohtadi-Bonab, 2023).

4.1.4 Data Hasil *Liquid Penetrant Test* (LPT)

Pengujian *Liquid Penetrant Test* (LPT) dilakukan untuk mendeteksi cacat permukaan yang tidak dapat diamati secara langsung melalui inspeksi visual. Pengujian dilakukan mengikuti prosedur standar inspeksi *Non Destructive Testing* (NDT) yang berlaku. Tahapan pengujian meliputi proses pembersihan permukaan (*cleaning*), aplikasi penetrant, waktu penetrasi (*dwell time*), pembersihan penetrant berlebih, aplikasi developer, dan inspeksi visual terhadap indikasi cacat.

Hasil pengujian menunjukkan adanya indikasi retak permukaan pada area ujung *fuel nozzle*. Retak yang teridentifikasi berupa retak terbuka (*surface crack*) yang ditandai dengan munculnya garis merah setelah proses aplikasi developer.



Gambar 4.17 Hasil *Liquid Penetrant Test* Fuel Nozzle

Mengacu pada Gambar 4.17, hasil *Liquid Penetrant Test* (LPT) menunjukkan adanya indikasi retak permukaan (*surface crack*) pada bagian ujung *fuel nozzle*.

Retak yang teridentifikasi berupa retak terbuka (*surface crack*) yang ditandai dengan munculnya garis merah setelah proses aplikasi developer. Temuan ini mengonfirmasi bahwa *fuel nozzle* mengalami kerusakan sehingga berpotensi menyebabkan penurunan performa sistem suplai bahan bakar dan memicu munculnya alarm *Liquid Fuel Pressure Low* selama proses *start up*.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, maka ringkasan hasil pengujian LPT disajikan pada Tabel 6, sebagai berikut:

Tabel 6. Hasil Pengujian *Liquid Penetrant Test*

No	Area Pemeriksaan	Hasil
1	<i>Tip Fuel Nozzle</i>	Tidak ditemukan indikasi retak
2	<i>Body Fuel Nozzle</i>	Tidak ditemukan indikasi retak
3	Jalur aliran bahan bakar	Tidak terdapat kebocoran
4	Sambungan komponen	Terdapat retakan pada sambungan las

Retak yang terdeteksi secara spesifik pada sambungan las (*weld joint*) dan tidak ditemukan pada *tip* maupun *body nozzle* yang homogen mengindikasikan bahwa lokasi tersebut bukan kebetulan, melainkan hasil dari kombinasi empat faktor yang saling memperkuat, antara lain:

1. Konsentrasi Tegangan (*Stress Concentration*)

Pada faktor geometri, sambungan las secara inheren menghadirkan perubahan penampang dan profil geometri yang tidak mulus (misalnya: *toe of weld*, transisi ketebalan, atau sedikit ketidaksejajaran hasil pengelasan). Perubahan geometri mendadak ini bertindak sebagai *stress raiser* yang melipatgandakan tegangan lokal jauh di atas tegangan nominal pada material di sekitarnya, sehingga secara mekanika retak jauh lebih mudah berinisiasi di titik ini dibandingkan pada *body nozzle* yang penampangnya seragam.

2. Degradasi Material pada Zona Terpengaruh Panas

Proses pengelasan menghasilkan tiga zona metalurgi yang berbeda sifat mekanisnya dalam jarak yang sangat berdekatan, yaitu logam las (*weld metal*), zona terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*), dan logam induk (*base metal*). Pada HAZ, siklus pemanasan cepat saat pengelasan mengubah struktur mikro asli material (misalnya, pengasaran butir atau pembentukan fasa getas pada *superalloy*),

sehingga ketangguhan dan ketahanan fatik material di HAZ umumnya lebih rendah dibanding logam induk yang belum terpapar panas pengelasan.

3. Tegangan Sisa (*Residual Stress*)

Pada proses pengelasan, pendinginan yang tidak seragam setelah pengelasan meninggalkan tegangan sisa (tarik) yang terkunci di dalam dan di sekitar sambungan las. Tegangan sisa ini bersifat aditif terhadap tegangan operasional (termal maupun mekanis), sehingga tegangan total yang dialami sambungan las selama operasi jauh lebih tinggi daripada yang terukur dari beban operasional saja dimana akan mempercepat pencapaian ambang inisiasi retak.

4. *Thermal Fatigue*

Pada mekanisme pemicu selama operasi, ketiga kondisi struktural di atas (konsentrasi tegangan, HAZ yang lebih rentan, dan tegangan sisa) menjadikan sambungan las sebagai titik yang siap untuk retak, namun yang benar-benar memicu pertumbuhannya adalah beban siklik dari operasi unit itu sendiri. Siklus *start-stop* berulang (32 kali sejak *overhaul* 2022) menghasilkan ekspansi-kontraksi termal berulang pada *nozzle*, sehingga tegangan pada sambungan las berfluktuasi naik-turun mengikuti setiap siklus operasi. Fluktuasi tegangan siklik pada titik yang sudah lemah secara struktural inilah yang secara mekanisme fatik menyebabkan retak tumbuh bertahap (*progressive crack growth*) dan bukan retak akibat beban statis Tunggal. Hal ini didukung oleh tidak ditemukannya deformasi plastis atau patahan getas pada pemeriksaan visual.

Berdasarkan pengamatan metalurgi visual pasca-aplikasi zat developer pada Gambar 4.17, cacat diskontinuitas yang muncul diklasifikasikan ke dalam dua kategori indikasi utama yaitu indikasi linier (*linear indication*) dan karakteristik fisik.

Hasil Temuan LPT yang ditemukan beberapa titik bercak merah bulat kecil yang tersebar di sekitar daerah terpengaruh panas atau *Heat Affected Zone* (HAZ) dan logam lasan (*weld metal*). Diameter indikasi bulat berkisar antara 1 mm hingga 2,5 mm. Indikasi ini menunjukkan adanya cacat porositas permukaan (*surface porosity*) atau lubang jarum (*pinholes*) akibat jebakan gas saat proses fabrikasi atau perbaikan pengelasan sebelumnya. Pengujian LPT pada Gambar 4.17 membuktikan

adanya retak fatika termal (*thermal fatigue crack*) yang ditunjukkan oleh *linear indication* yang memanjang secara sirkumferensial pada area sambungan las antara batang (*shaft*) dan *flange fuel nozzle* GT 12 Belawan. Lokasi ini merupakan daerah kritis yang menerima beban termal dan mekanis paling tinggi selama unit beroperasi.

Kemunculan retakan linier pada sambungan lasan ini disebabkan oleh kombinasi tiga faktor utama yaitu tegangan sisa, siklus termal eksterm dan konsentrasi tegangan. Tegangan sisa (*residual stress*) yang tinggi dari proses pengelasan fabrikasi yang tidak diredam secara optimal melalui perlakuan panas pasca-las (*Post-Weld Heat Treatment / PWHT*). Siklus termal ekstrem (*severe thermal cycling*) akibat proses start-stop turbin gas yang berulang. Konsentrasi tegangan (*stress concentration*) geometris pada sudut tajam (*fillet*) sambungan lasan antara batang *fuel nozzle* yang tipis dan badan *flange* yang tebal.

Secara metalurgi las dan mekanika patahan, mekanisme perambatan retak (*crack propagation*) ini terjadi melalui tahapan berikut, antara lain:

1. Inisiasi retak (*crack initiation*) yaitu area sambungan las secara alami bertindak sebagai takik geometris (*geometric notch*). Ketika turbin dioperasikan, terjadi perbedaan laju ekspansi termal (*differential thermal expansion*) antara batang *fuel nozzle* yang langsung terpapar gas panas (panas berlebih seperti dianalisis pada sub-bab 4.1.3) dengan bagian *flange* yang lebih dingin. Perbedaan laju pemuatan ini menciptakan regangan termal lokal (*local thermal strain*) yang sangat besar
2. Akumulasi tegangan siklik (*cyclic stress accumulation*) yaitu setiap kali turbin gas mengalami siklus start, pembebanan, penurunan beban, dan stop, material di sekitar batas lasan mengalami tegangan tarik (*tensile*) dan tekan (*compressive*) secara bergantian.
3. Perambatan retak (*crack propagation*) yaitu temperatur kerja operasional yang tinggi melampaui batas deformasi elastis material ($> 500^{\circ}\text{C}$) terjadi akumulasi dislokasi mikro pada batas butir (*grain boundaries*) logam lasan. Kerusakan lelah termal (*thermal fatigue damage*) ini memicu retakan mikro (*micro-crack*) yang berkoalisi dan merambat di sepanjang batas butir (*intergranular*

cracking) mengikuti garis tegangan sisa lasan (*weld toe*) hingga akhirnya menjadi retakan makro yang terdeteksi dengan jelas oleh cairan penetran merah pada Gambar 4.17.

Analisis mekanisme kegagalan las akibat lelah termal (*thermal fatigue*) pada komponen turbin gas ini sangat sejalan dengan studi kegagalan yang dilaporkan oleh Yousefabad et al. (2019) menunjukkan bahwa distribusi temperatur pembakaran yang tidak seragam merupakan penyebab utama timbulnya tegangan termal berulang (*thermal cyclic stress*) yang mengakibatkan *thermal fatigue cracking* pada komponen turbin gas. Hasil analisis metalografi, SEM, serta simulasi CFD dan FEM pada penelitian tersebut menunjukkan bahwa gradien temperatur yang tinggi menghasilkan deformasi plastis lokal yang mempercepat inisiasi dan propagasi retak akibat kelelahan termal.

Keberadaan indikasi linier (retakan) sirkumferensial sepanjang hingga 42 mm pada sambungan las ini memiliki implikasi bahaya yang sangat kritis bagi PLTG GT 12 Belawan, antara lain:

1. Kebocoran bahan bakar (*fuel leakage*) yaitu retakan yang menembus dinding (*through-wall crack*) akan menyebabkan bahan bakar solar (Bio HSD) bertekanan tinggi bocor keluar dari batang *fuel nozzle* sebelum mencapai ujung pembakar (*nozzle tip*).
2. Kebakaran ruang bakar (*combustor fire*) yaitu kebocoran bahan bakar di luar area bakar yang semestinya akan memicu kebakaran tidak terkendali di dalam rumah kompresor/ruang bakar (*housing/wrapper fire*).
3. Kerusakan katastropik (*catastrophic failure*) yaitu tekanan mekanis dari aliran bahan bakar dan getaran turbin (*vibration*) sewaktu-waktu dapat mematahkan batang *fuel nozzle* secara instan pada sambungan lasan yang retak tersebut. Batang *fuel nozzle* yang patah akan terlempar masuk ke dalam sudu-sudu turbin yang sedang berputar cepat, menyebabkan kehancuran total seluruh sudu turbin (*foreign object damage* / FOD) berbiaya miliaran rupiah.

4.1.5 Data Inspection Fuel Nozzle Spray Test

Fuel nozzle spray test merupakan salah satu metode inspeksi yang dilakukan untuk mengevaluasi kondisi dan kinerja *fuel nozzle* sebelum komponen dipasang kembali pada turbin gas. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa *fuel nozzle* mampu mengatomisasikan bahan bakar secara merata sesuai dengan karakteristik penyemprotan yang dipersyaratkan. Hasil pengujian ini menjadi salah satu dasar dalam menentukan kelayakan komponen untuk digunakan kembali atau memerlukan tindakan perawatan maupun penggantian.

Pelaksanaan *fuel nozzle spray test* dilakukan menggunakan peralatan uji yang mampu mensimulasikan aliran bahan bakar pada tekanan tertentu. Selama pengujian, dilakukan pengamatan terhadap pola penyemprotan (*spray pattern*), keseragaman distribusi bahan bakar, sudut penyemprotan (*spray angle*), serta ada atau tidaknya indikasi penyumbatan pada lubang *fuel nozzle*. Hasil pengamatan dicatat dan didokumentasikan sebagai data penelitian.

Berdasarkan hasil *fuel nozzle spray test*, kondisi setiap *fuel nozzle* menunjukkan karakteristik penyemprotan yang berbeda-beda. Beberapa *fuel nozzle* menghasilkan pola penyemprotan yang seragam dengan distribusi bahan bakar yang merata, sehingga dinyatakan memenuhi kriteria pengujian. Namun, pada beberapa *fuel nozzle* lainnya ditemukan ketidakteraturan pola semprotan, seperti penyemprotan yang tidak simetris, penurunan kualitas atomisasi, atau adanya aliran yang tidak merata. Kondisi tersebut mengindikasikan adanya penurunan performa *fuel nozzle* yang memerlukan evaluasi lebih lanjut. Proses pengujian disajikan pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Inspeksi *Fuel Nozzle Spray Test*

Pengujian fungsional aliran fluida (*spray test*) dilakukan pada *fuel nozzle ex-part* GT 12 Belawan menggunakan fluida uji ekuivalen pada tekanan kerja tertentu (seperti ditunjukkan pada manometer tekanan Gambar 4.18 yang mengindikasikan tekanan injeksi uji berkisar pada skala bar/psi tertentu) guna memverifikasi kualitas hidrodinamika semprotan. Hasil pengujian fungsional ini menunjukkan deviasi parameter semprotan yang sangat signifikan akibat kerusakan fisik yang telah dianalisis pada sub-bab sebelumnya.

Berdasarkan observasi dinamis selama *spray test* berlangsung, didapatkan bahwa sudut semprotan (*spray angle*) pada *fuel nozzle* GT 12 mengalami penyempitan (*narrowing*) dan distorsi arah yang asimetris. Pola kerucut semprotan (*cone pattern*) yang terbentuk tidak lagi menyerupai kerucut berongga (*hollow cone*) yang sempurna dan seragam, melainkan pecah menjadi pola semi-padat (*solid cone*) yang compang-camping dan cenderung miring ke satu sisi arah aliran.

Akar penyebab dari rusaknya geometris *spray angle* dan *cone pattern* ini adalah perubahan dimensi lubang keluar (*orifice discharge*) akibat akumulasi kerak *carbon coking* keras (seperti yang dianalisis pada Gambar 4.13) serta adanya erosi mikro pada dinding dalam *swirl chamber* (ruang pusar) *fuel nozzle*. Kerak karbon ini bertindak sebagai penghalang fisik (*physical barrier*) tidak beraturan tepat pada bibir keluar fluida.

Secara mekanika fluida, pembentukan sudut semprotan dan pola kerucut sangat bergantung pada gaya sentrifugal yang dihasilkan di dalam *swirl chamber* sebelum fluida keluar melalui *orifice*.

1. Di dalam *fuel nozzle* tipe *pressure-swirl*, bahan bakar cair dipaksa berputar cepat untuk membentuk lapisan film tipis melingkar (*liquid sheet*) dengan inti udara (*gas core*) di tengahnya.
2. Ketika *liquid sheet* ini keluar melewati lubang *orifice*, gaya sentrifugal akan mendorong fluida melebar ke arah radial, menciptakan sudut semprotan desain (θ sekitar $60^\circ - 80^\circ$ pada kondisi normal) berbentuk *hollow cone*.
3. Keberadaan kerak *carbon coking* di satu sisi *orifice* merusak simetri keliling (*circumferential symmetry*) lubang keluar. Aliran fluida lokal yang menabrak

deposit karbon mengalami penurunan momentum sudut (*angular momentum*) secara mendadak.

4. Akibat hilangnya gaya sentrifugal lokal ini, lapisan film cairan tidak mampu melebar secara radial dan justru luruh merapat ke sumbu aksial *fuel nozzle*. Akibatnya, sudut semprotan menyempit secara drastis di area yang tersumbat, dan pola kerucut berongga pecah menjadi semburan acak yang asimetris.

Selama pengujian semprot, proses pengabutan (*atomization*) yang dihasilkan oleh *fuel nozzle* GT 12 terlihat sangat kasar. Distribusi ukuran butiran cairan (droplet) tidak homogen, di mana terlihat jelas adanya segregasi fisik berupa rona semprotan yang tebal bercampur dengan tetesan-tetesan cairan berukuran makro (*streaking*) yang jatuh bebas tanpa teratomisasi dengan baik.

Kualitas atomisasi yang buruk ini disebabkan oleh kegagalan pembentukan lembaran cairan tipis (*liquid sheet disintegration failure*) akibat penurunan tekanan efektif (*effective pressure drop*) melintasi *fuel nozzle* dan terganggunya fungsi udara atomisasi (*atomizing air*) akibat deformasi fisik ujung *fuel nozzle*.

Fisika atomisasi bahan bakar cair di dalam turbin gas diatur oleh pecahnya lapisan cairan akibat ketidakstabilan hidrodinamika (*aerodynamic instability*).

1. Secara teoritis, cairan yang keluar dari *fuel nozzle* harus membentuk lembaran tipis yang kemudian pecah menjadi filamen/ligamen, dan akhirnya terdisintegrasi menjadi droplet halus dengan ukuran *Sauter Mean Diameter* (SMD) yang sangat kecil ($< 50 \mu\text{m}$).
2. Penurunan kecepatan ini secara eksponensial menghalangi terjadinya ketidakstabilan gelombang permukaan cairan (*surface wave instability*). Lembaran cairan keluar terlalu tebal dan tidak pecah menjadi ligamen halus, melainkan langsung terpecah paksa menjadi droplet berukuran raksasa ($> 250 \mu\text{m}$).
3. Distribusi droplet menjadi sangat tidak homogen (*polydisperse distribution*), menciptakan zona kaya bahan bakar (*rich zone*) lokal berupa tetesan kasar yang tidak mampu menguap dengan cepat di udara pembakaran.

Pembahasan deviasi parameter fisik semprotan akibat kerusakan geometri *fuel nozzle* ini sangat selaras dengan teori klasifikasi pengabutan yang dikemukakan

oleh Lefebvre (1989) dalam bukunya *Atomization and Sprays*. Lefebvre menyatakan bahwa variasi sekecil apa pun pada geometri lubang *orifice* (termasuk kekasaran permukaan akibat deposit kerak) akan langsung mendistorsi koefisien limpahan (*discharge coefficient*, C_d) dan memicu ketidakstabilan pola semprotan (*spray asymmetry*).

Selain itu, penelitian oleh Qiu, C. et al (2022) menyatakan bahwa endapan karbon pada *fuel nozzle* mengubah geometri internal saluran bahan bakar, sehingga mengganggu proses atomisasi, meningkatkan ketidakstabilan spray angle, dan menghasilkan distribusi droplet yang kurang seragam. Perubahan tersebut menurunkan kualitas pencampuran udara pada bahan bakar, sehingga efisiensi pembakaran berkurang dan distribusi temperatur di dalam ruang bakar menjadi tidak merata.

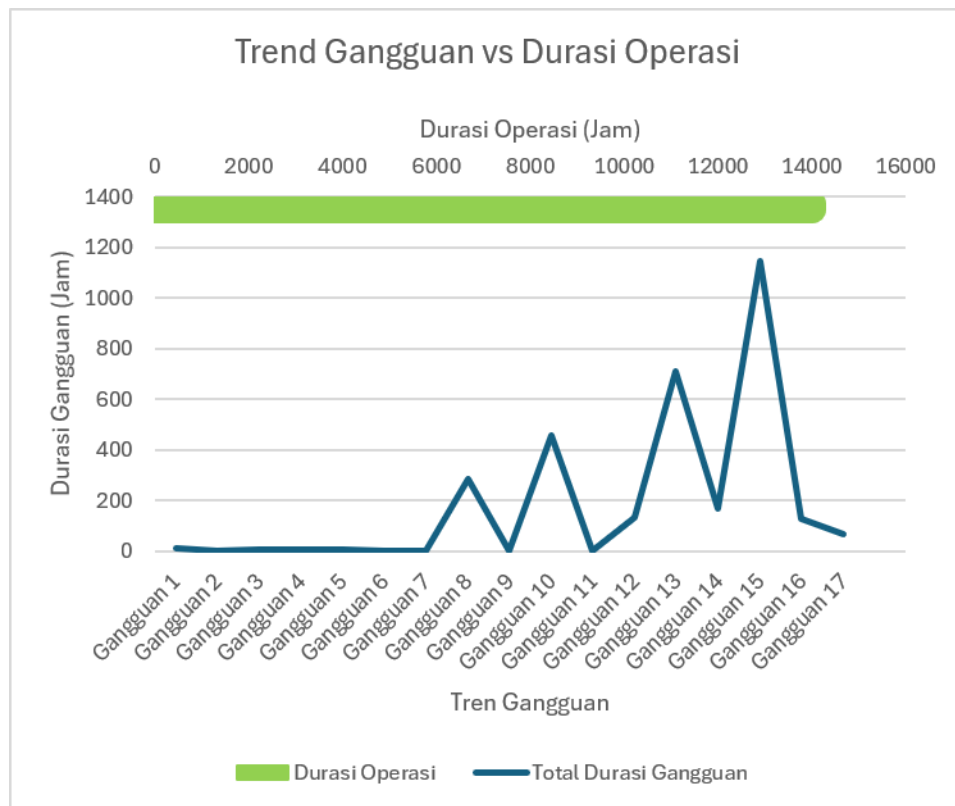
Kerusakan fungsi atomisasi, sudut semprot, dan pola kerucut pada *fuel nozzle* GT 12 ini membawa implikasi buruk yang sistemis terhadap seluruh proses konversi energi di dalam turbin gas, antara lain:

1. Keterlambatan penguapan (*evaporation delay*) yaitu droplet berukuran besar memerlukan waktu penguapan (*evaporation lifetime*) yang jauh lebih lama di dalam ruang bakar. Akibatnya, sebagian bahan bakar tidak sempat menguap dan terbakar di zona primer pembakaran (*primary zone*), melainkan terbakar lambat hingga ke zona pengenceran (*dilution zone*).
2. Ketidakstabilan nyala api (*combustion instability & humming*) yaitu pola semprotan yang asimetris menciptakan fluktuasi tekanan pelepasan panas secara lokal. Hal ini memicu resonansi akustik atau ketidakstabilan pembakaran (*combustion dynamics/humming*) yang dapat merusak dinding ruang bakar akibat getaran ekstrem.
3. Tingginya emisi gas buang dan jelaga yaitu atomisasi yang sangat kasar menghasilkan pembakaran kaya oksigen yang tidak merata, memicu pembentukan karbon monoksida (CO) yang tinggi serta jelaga hitam *unburned carbon* yang meluncur ke sudu turbin, mempercepat proses erosi turbin.
4. Gradien suhu radial yang ekstrem (*hot spots*) yaitu ketidakseimbangan pola semprotan menghasilkan distribusi suhu gas buang yang tidak merata (*exhaust*

temperature spread). Munculnya titik-titik panas ekstrim (*hot spots*) akibat jilatan api langsung (*flame impingement*) pada *combustor liner* akan mempercepat kegagalan termal pada komponen hilir turbin lainnya.

4.1.6 Data Jam Operasi (*Operating Hours*)

PLTG GT 1.2 UP Belawan telah beroperasi selama 14.019,42 *operating hours* dengan *Number of Start* (NOS) sebanyak 32 kali sejak *major overhaul* tahun 2022. Data *performance test* GT 1.2 UP Belawan sebelum pelaksanaan inspeksi yaitu *load* 100 MW dan NPHR 3150,0 kkal/kWh. Berikut ini rekapan data gangguan yang terjadi pada GT 1.2 UP Belawan sejak *overhaul major* tahun 2023 hingga *Major Overhaul Reblading* tahun 2025 pada Gambar 4.19:



Gambar 4.19 Grafik Durasi Gangguan Pembangkit vs Durasi Operasi

Tren gangguan ditunjukkan pada sumbu x dibawah dan sumbu x diatas durasi operasi (jam) sedangkan lama durasi gangguan pada sumbu y pada Gambar 4.19. Korelasi antara jumlah durasi operasi mendekati 1925,14 jam berbanding lurus dengan garis jam durasi gangguan yang mencapai titik tertinggi pada gangguan ke-15 yaitu 1148,27 jam yang menunjukkan keandalan pembangkit masih belum

optimal. Kemudian disusul gangguan MO sebesar 912 jam. Semakin tinggi jam operasi dan frekuensi *start-stop*, semakin besar kemungkinan *fuel nozzle* mengalami *thermal fatigue* akibat siklus pemanasan dan pendinginan yang berulang (sumber data Lampiran 5).

Berdasarkan data operasional, tercatat bahwa PLTG GT 12 Belawan telah beroperasi secara akumulatif selama 14.019,42 jam dengan frekuensi start (*Number of Start / NOS*) sebanyak 32 kali sejak pelaksanaan *major overhaul* tahun 2022 hingga periode inspeksi sebelum dilakukan penggantian sudu (*reblading*) pada tahun 2025. Penjelasan pada tabel 2.2 *scope* pekerjaan masing-masing *overhaul* perlu dilakukan *penetrant test* jika pada tahun 2022 adalah *fuel nozzle* baru. Melihat kondisi dari *fuel nozzle* dari berbagai aspek *fuel nozzle* sudah melebihi 48.000 operasi dari standar untuk dilakukan pergantian. Berikut ini penjelasan masa pakai sesuai standar OEM, antara lain:

1. Jika dibandingkan dengan standar batas umur pakai (*design lifetime limits*) atau interval inspeksi rutin untuk *fuel nozzle* turbin gas kelas *heavy-duty* (standar OEM), komponen *fuel nozzle* pembakar gas/minyak memiliki batas operasi maksimum sebesar 12.000 jam untuk kategori inspeksi jalur gas panas (*Hot Gas Path Inspection / HGPI*) atau penggantian suku cadang basah (*combustor parts replacement*).
2. Hal ini membuktikan secara kuantitatif bahwa komponen *fuel nozzle* pada GT 12 Belawan telah beroperasi melebihi umur pakai desainnya (*overaged operational life*) dengan deviasi kelebihan waktu sebesar:

$$\text{Deviasi} = EOH_{\text{(aktual)}} - EOH_{\text{(standar)}} \quad (4.1)$$

$$\text{Deviasi} = 14.019,42 \text{ jam} - 12.000 \text{ jam} = 2.019,42 \text{ jam}$$

Keterangan:

- $\Delta T / \text{Deviasi} = \text{Selisih/Deviasi Waktu Operasi (jam)}$
 - $T_{\text{aktual}} = \text{Jam Operasi / Jam Kerja Aktual (14.019,42 jam)}$
 - $T_{\text{standar}} = \text{Jam Kerja Standar/Target (12.000 jam)}$
3. Dengan kata lain, komponen ini telah dipaksa bekerja 16,83% melebihi batas toleransi kritis yang direkomendasikan oleh manufaktur aslinya tanpa adanya tindakan regenerasi atau penggantian tepat waktu.

Akar penyebab kegagalan fisik berupa retak sirkumferensial pada sambungan las (Analisis Sub-bab 4.6.4) serta penyumbatan deposit karbon yang mengeras pada ujung *fuel nozzle* (Analisis Sub-bab 4.6.3) adalah kejenuhan siklik material (*material cyclic saturation*) akibat akumulasi waktu paparan beban termomekanis yang melampaui kapasitas ketahanan lelah (*fatigue endurance limit*) material superalloy selama periode kelebihan waktu 2.019,42 jam tersebut.

Secara metalurgi fisik dan mekanika kegagalan, pemaksaan komponen melampaui batas desain OEM memicu kerusakan progresif melalui mekanisme berikut, antara lain:

1. Akumulasi kerusakan lelah termal (*cumulative thermal fatigue damage*) yaitu selama 14.019,42 jam beroperasi pada suhu tinggi di dalam ruang bakar ($> 900^{\circ}\text{C}$), material *fuel nozzle* mengalami fluktuasi regangan mikro (*micro-strain*) secara konstan akibat perubahan beban dan siklus start-stop sebanyak 32 kali.
2. Degradasi kekuatan batas butir (*grain boundary coarsening*) yaitu paparan suhu operasi tinggi yang melebihi batas waktu desain menyebabkan terjadinya pengendapan karbida sekunder pada batas butir paduan super. Proses ini mengurangi keuletan (*ductility*) material secara lokal, menyebabkannya mengalami transisi sifat menjadi getas (*embrittlement*). Batas butir yang getas ini sangat mudah robek ketika menerima getaran mekanis dari aliran bahan bakar bertekanan tinggi.
3. Hilangnya kemampuan pelumasan termal udara atomisasi yaitu lama operasi yang berlebih juga mengikis lapisan pelindung permukaan (*protective oxide layer*), meningkatkan kekasaran dinding saluran dalam *fuel nozzle* yang mempercepat pengendapan residu karbon (*coking*) secara eksponensial di sisa-sisa akhir masa pakainya.

Analisis degradasi batas umur pakai ini sangat selaras dengan standar pemeliharaan pembangkit listrik ASME PTC 22 (*Gas Turbines*) dan dokumen teknis EPRI (*Electric Power Research Institute*) untuk *Gas Turbine Life Management*. Dokumen tersebut menegaskan bahwa pengabaian batas interval operasi HGPI (yang umumnya dibatasi pada 12.000 jam operasi setara untuk bahan

bakar campuran gas/distilat) akan mengakibatkan peningkatan laju kegagalan komponen ruang bakar secara eksponensial. Boyce (2012) dalam *Gas Turbine Engineering Handbook* juga menyatakan bahwa masa pakai material superalloy berbasis nikel mengalami penurunan kekuatan mekanis secara drastis (hampir linear terhadap waktu) setelah melewati kurva batas stabilitas strukturalnya pada 12.000 jam.

Keputusan operasional untuk menunda penggantian *fuel nozzle* melampaui limit desain OEM membawa implikasi serius pada manajemen pemeliharaan PLTG Sektor Belawan:

1. Meningkatnya *Forced Outage Rate* (FOR) yaitu kegagalan fungsional *fuel nozzle* (seperti kebocoran dan distorsi semprotan) memaksa unit untuk sering melakukan trip darurat (*unplanned shutdown*) yang secara langsung menurunkan keandalan (*reliability*) sistem kelistrikan Sumatera Bagian Utara.
2. Kerugian finansial akibat efisiensi rendah yaitu selama 2.019,42 jam operasi berlebih tersebut, unit GT 12 bekerja dengan kondisi *fuel nozzle* yang rusak. Hal ini mengakibatkan terjadinya pemborosan energi bahan bakar (seperti dianalisis pada Gambar 4.8 dan Tabel 7, di mana deviasi aliran bahan bakar gas melambung sebesar 115,24 MMBtu di atas garis dasar/*baseline*). Biaya pemborosan bahan bakar selama sisa jam operasi tersebut jauh melebihi nilai ekonomi pembelian satu set *fuel nozzle* baru.
3. Kegagalan berantai (*domino effect failure*) retakan struktural aktif pada sambungan las (Gambar 4.17) yang dipaksa bekerja berisiko tinggi menyebabkan patahnya *fuel nozzle* secara katastrofik yang dapat menghancurkan bagian *transition piece*, *turbine stage 1 blades*, dan komponen sensitif hilir lainnya.

4.1.7 Data Performance Test

Performance test (uji kinerja) merupakan tahapan evaluasi berkala yang dilakukan pada PLTG GT 12 Belawan untuk mengukur kemampuan aktual turbin gas dibandingkan dengan parameter desain awal (*design/manufacturer standard*). Data uji kinerja ini menjadi instrumen kritis dalam *Root Cause Analysis* (RCA)

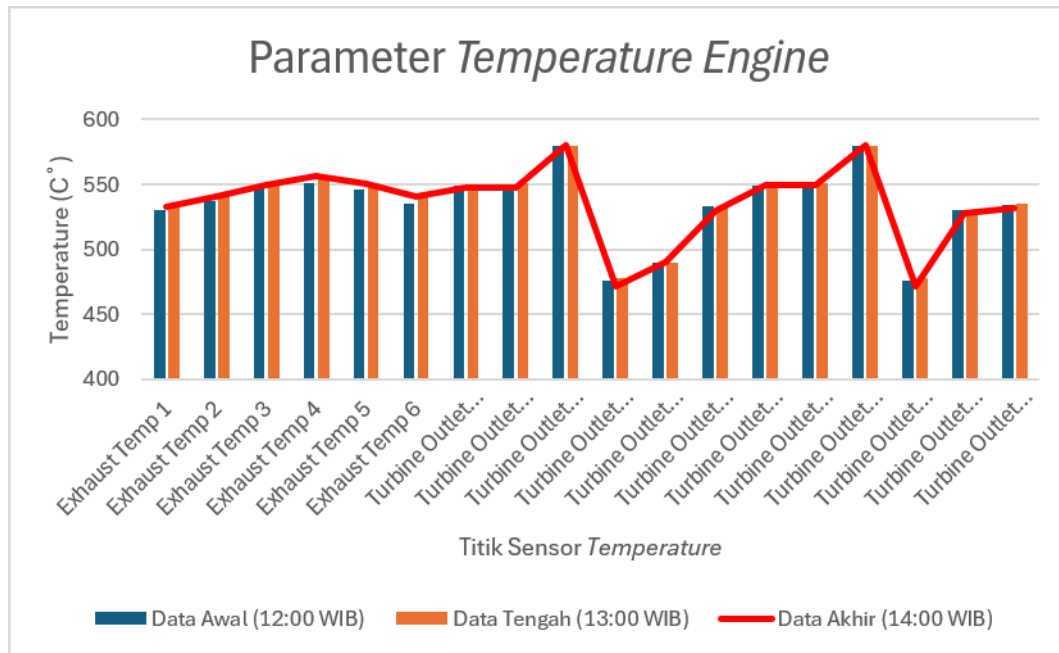
untuk memvalidasi dampak penurunan fungsi mekanis *fuel nozzle* terhadap efisiensi termal dan daya output keseluruhan yang dihasilkan oleh unit pembangkit Siemens KWU tersebut. Berikut ini tabel komparasi data kinerja hasil *performance test* aktual saat terjadi kendala pada komponen ruang bakar dibandingkan dengan data *komisioning*/desain awal unit pada Tabel 7.:

Tabel 7. Tabel *Performance Test* PLTG GT 12

No	Parameter	Pol	Unit	Actual	Baseline	Deviation
1	<i>Gross Power Output</i>	—	kWh	108.000	108.000	-
2	<i>Net Power Output</i>	▲	kWh	107.840	107.496	344
3	<i>Auxiliary Power Consumption</i>	▼	kWh	160	504	(344)
4	<i>% Aux Power Consumption</i>	▼	%	0,15	0,47	(0,32)
5	<i>Fuel Oil Flow Rate</i>	▼	Liter	-	-	-
6	<i>Fuel Gas Flow Rate</i>	▼	Mmbtu	1.337,32	1.222,08	115,24
7	<i>Gas Receiving pressure</i>	▲	Bar	16,53	16,53	-
8	<i>Inlet Filter Differential Pressure</i>	▼	Bar	3,74	4,70	(0,96)
9	<i>Compressor inlet temperature</i>	▼	°C	33,67	26,21	7,46
10	<i>Compressor outlet temperature</i>	▲	°C	340	320	20
11	<i>Compressor outlet pressure</i>	▲	Bar	8,47	9,00	(0,54)
12	<i>Calculation outlet temperature</i>	▼	°C	521	561	(40)
13	<i>Spesific Gas Consumption (SGC)</i>	▼	mmbtu/kWh	0,012	0,011	0,00
14	<i>Gross Plant Heat Rate (GPHR)</i>	▼	kcal/kWh	3.128	2.858	270
15	<i>Net Plant Heat Rate (NPHR)</i>	▼	kcal/kWh	3.133	2.872	261
16	<i>Thermal Plant Efficiency</i>	▲	%	27,49	30,09	(2,59)
17	<i>Compressor Efficiency</i>	▲	%	83,42	88,22	(4,80)

Mengacu pada Tabel 7, hasil *Performance Test* menunjukkan adanya beberapa penyimpangan parameter operasi dibandingkan dengan nilai *baseline*. Penurunan daya keluaran (*Net Power Output*) serta meningkatnya konsumsi bahan bakar dan *heat rate* mengindikasikan penurunan kinerja PLTG GT 12. Selain itu, nilai efisiensi termal dan efisiensi kompresor yang lebih rendah dibandingkan *baseline* menunjukkan bahwa performa unit belum beroperasi secara optimal dan

memerlukan evaluasi lebih lanjut. Pemantauan *exhaust temperature* disajikan pada Gambar 4.20 data log parameter termal GT 12 Belawan pada tabel di bawah ini:



Gambar 4.20 Grafik Pemantauan Parameter *Temperature Engine*

Mengacu pada Gambar 4.20, sumbu x menunjukkan *temperature* (C°) dan sumbu y adalah titik sensor *temperature* dimasing-masing area. Hubungan antar titik sensor menunjukkan panas yang tidak merata dapat dilihat pada bar dan garis. Antara data awal dan data akhir yang ditunjukkan pada bar serta data akhir deviasi tidak terlalu signifikan. Titik pengukuran relatif stabil selama periode pengamatan pukul 12.00–14.00 WIB. Namun, terdapat beberapa titik yang beroperasi pada *Call Mode*, yaitu *turbine outlet temperature* A3, A5, dan B3, dengan temperatur mencapai 580 °C. Perbedaan temperatur antar titik pengukuran masih berada dalam rentang yang dapat diterima dan tidak menunjukkan adanya kenaikan temperatur yang signifikan selama proses operasi. Data ini digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi distribusi temperatur turbin dan mendukung analisis kondisi operasi PLTGU GT 1.2. Pembahasan analisis perbedaan temperature dibahas lebih detail pada subbab 4.2.2 (sumber data Lampiran 6).

4.1.8 Data Pengukuran Dimensi *Fuel Nozzle*

Pengukuran dimensi *fuel nozzle* dilakukan untuk mengetahui kondisi geometris komponen setelah digunakan dalam periode operasi tertentu. Pengukuran

ini bertujuan untuk memastikan bahwa dimensi *fuel nozzle* masih berada dalam batas toleransi yang ditetapkan, sehingga komponen tetap mampu bekerja secara optimal pada sistem pembakaran turbin gas.



Gambar 4.21 Pengukuran Dimensi *Fuel Nozzle*

Alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini adalah jangka sorong (*vernier caliper*) dengan ketelitian 0,02 mm. Pengukuran dilakukan pada beberapa bagian *fuel nozzle* yang mudah dijangkau, seperti diameter luar (*outer diameter*), diameter ujung *nozzle* (*nozzle tip*), panjang keseluruhan komponen, serta dimensi lain yang diperlukan sesuai dengan objek penelitian. Setiap pengukuran dilakukan beberapa kali untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dan meminimalkan kesalahan pembacaan.

Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan dimensi standar atau data spesifikasi komponen yang digunakan oleh perusahaan. Perbandingan ini bertujuan untuk mengetahui apakah terjadi perubahan dimensi akibat keausan, erosi, deformasi, atau faktor lainnya selama *fuel nozzle* beroperasi. Data hasil pengukuran selanjutnya digunakan sebagai salah satu informasi pendukung dalam mengevaluasi kondisi fisik *fuel nozzle*.

4.1.9 Data Diskusi dengan Tim Pemeliharaan UP Belawan dan Tim OH UMRO

Selain memperoleh data melalui inspeksi dan pengujian komponen, penelitian ini juga didukung oleh hasil diskusi dengan Tim Pemeliharaan Unit

Pembangkit (UP) Belawan dan Tim *Overhaul* (OH) UMRO. Diskusi dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai riwayat gangguan *fuel nozzle*, prosedur pemeliharaan yang diterapkan, hasil inspeksi selama kegiatan *overhaul*, serta pengalaman teknis dalam menangani gangguan yang terjadi pada sistem pembakaran turbin gas.

Diskusi dilaksanakan secara langsung dengan personel yang terlibat dalam kegiatan inspeksi, pemeliharaan, dan *overhaul* turbin gas. Informasi yang diperoleh meliputi kondisi *fuel nozzle* sebelum dan sesudah dilakukan pemeliharaan, jenis gangguan yang paling sering ditemukan, metode inspeksi yang digunakan, serta tindakan perbaikan yang dilakukan berdasarkan hasil evaluasi kondisi komponen. Data hasil diskusi digunakan sebagai informasi pendukung untuk memverifikasi hasil inspeksi lapangan dan memperkuat interpretasi terhadap data penelitian.



Gambar 4.22 Diskusi *Fuel Nozzle* dengan Tim Pemeliharaan UP Belawan

Berdasarkan hasil diskusi, diperoleh informasi bahwa gangguan yang umum ditemukan pada *fuel nozzle* meliputi terbentuknya *carbon deposit*, penyumbatan sebagian lubang *nozzle* (*clogging*), perubahan pola penyemprotan (*spray pattern*), serta indikasi keausan pada beberapa bagian komponen setelah mencapai jam

operasi tertentu. Tim pemeliharaan menjelaskan bahwa setiap *fuel nozzle* yang menunjukkan indikasi penurunan performa akan menjalani inspeksi lanjutan melalui pemeriksaan visual, *fuel nozzle spray test*, pengukuran dimensi, dan pengujian *Non-Destructive Testing* (NDT) sesuai dengan prosedur yang berlaku.

Selain itu, hasil diskusi menunjukkan bahwa kegiatan pemeliharaan *fuel nozzle* dilakukan berdasarkan jadwal *preventive maintenance*, hasil inspeksi berkala, serta evaluasi kondisi komponen selama pelaksanaan *overhaul*. Keputusan untuk melakukan pembersihan, perbaikan, atau penggantian komponen ditentukan berdasarkan hasil inspeksi teknis dan standar pemeliharaan yang berlaku di perusahaan. Informasi yang diperoleh dari Tim Pemeliharaan UP Belawan dan Tim OH UMRO menjadi salah satu sumber data pendukung dalam proses analisis penyebab gangguan yang akan dibahas pada subbab berikutnya.

4.2 Analisis dan Pembahasan Data Kegagalan *Fuel Nozzle*

Analisis pada sub-bab ini dilakukan untuk mengolah data hasil pengumpulan pada sub-bab 4.1 (data DCS, data pemakaian bahan bakar, data visual, data LPT, data *spray test*, data jam operasi, data gangguan, data *performance test*, dan data pengukuran dimensi) menjadi informasi kuantitatif dan kualitatif yang dapat digunakan untuk menelusuri akar penyebab (*root cause*) kegagalan *fuel nozzle* pada GT 12 Belawan. Analisis dilakukan secara bertahap, dimulai dari perhitungan indikator kinerja unit, perhitungan indikator keandalan, hingga analisis akar penyebab menggunakan *Fishbone Diagram* dan *5 Why Analysis*.

4.2.1 Perhitungan Efisiensi Termal dan Dampak terhadap Kinerja Unit

Efisiensi termal unit dihitung berdasarkan hubungan antara *Gross Plant Heat Rate* (GPHR) dengan konversi satuan energi listrik ke energi kalor, menggunakan persamaan berikut:

$$\eta_{th} = \frac{860}{GPHR} \times 100\% \quad (4.2)$$

Keterangan:

- η_{th} = Efisiensi termal unit (%)
- 860 = Faktor konversi energi dari 1 *kWh* ke satuan kalor (kkal/kWh)
- GPHR = *Gross Plant Heat Rate* / laju panas kotor pembangkit (kkal/kWh)

a. Kondisi *Baseline* (desain/komisioning)

$$\eta_{th,baseline} = \frac{860}{2.858} \times 100\% = 30,09\% \quad (4.3)$$

Keterangan:

- $GPHR_{baseline}$ = Laju panas kotor pembangkit *baseline* (2.858 kkal/kWh)

b. Kondisi Aktual (saat gangguan pembakaran teridentifikasi)

$$\eta_{th,aktual} = \frac{860}{3.128} \times 100\% = 27,49\% \quad (4.4)$$

Keterangan:

- $GPHR_{aktual}$ = Laju panas kotor pembangkit aktual (3.128 kkal/kWh)

Hasil perhitungan di atas konsisten dengan nilai *Thermal Plant Efficiency* pada Tabel 7 (data *performance test*) yang menunjukkan bahwa perhitungan manual menggunakan data GPHR aktual dapat memvalidasi keakuratan data lapangan yang diperoleh.

c. Persentase Penurunan Efisiensi Termal

$$\Delta\eta_{th} = \frac{(\eta_{th,baseline} - \eta_{th,aktual})}{\eta_{th,baseline}} \times 100\% \quad (4.5)$$

$$\Delta\eta_{th} = \frac{30,09 - 27,49}{30,09} \times 100\% = 8,64\%$$

Keterangan:

- $\Delta\eta_{th}$ = Persentase penurunan efisiensi termal (%)
- $\eta_{th,baseline}$ = Efisiensi termal pada kondisi acuan/desain/komisioning (30,09%)
- $\eta_{th,aktual}$ = Efisiensi termal pada kondisi riil/operasional aktual (27,49%)

d. Kenaikan Konsumsi Energi Spesifik (*Heat Rate*)

$$\Delta NPHR = NPHR_{aktual} - NPHR_{baseline} \quad (4.6)$$

$$\Delta NPHR = 3.133 - 2.872 = 261 \text{ kkal/kWh}$$

Keterangan:

- $\Delta NPHR$ = Kenaikan *Net Plant Heat Rate* / konsumsi energi spesifik (kkal/kWh)
- $NPHR_{\text{aktual}}$ = Efisiensi termal pada kondisi riil/operasional aktual (3.133 kkal/kWh)
- $NPHR_{\text{baseline}}$ = Efisiensi termal pada kondisi acuan/komisioning (2.872 kkal/kWh)

Persentase kenaikan $NPHR$ terhadap kondisi *baseline* dihitung dengan persamaan berikut:

$$\% \Delta NPHR = \left(\frac{\Delta NPHR}{NPHR_{\text{baseline}}} \right) \times 100\% \quad (4.7)$$

$$\% \Delta NPHR = \frac{261}{2.872} \times 100\% = 9,09\%$$

Keterangan:

- $\% \Delta NPHR$ = Persentase kenaikan konsumsi energi spesifik (%)
- $\Delta NPHR$ = Kenaikan *Net Plant Heat Rate* / konsumsi energi spesifik (261 kkal/kWh)
- $NPHR_{\text{baseline}}$ = Efisiensi termal pada kondisi acuan/komisioning (2.872 kkal/kWh)

e. Kenaikan Konsumsi Bahan Bakar

$$\Delta \text{Fuel Gas} = \text{Fuel Gas}_{\text{aktual}} - \text{Fuel Gas}_{\text{baseline}} \quad (4.8)$$

$$\Delta \text{Fuel Gas} = 1.337,32 - 1.222,08 = 115,24 \text{ MMBTU}$$

Keterangan:

- $\Delta \text{Fuel Gas}$ = Kenaikan penggunaan bahan bakar gas (MMBTU)
- $\text{Fuel Gas}_{\text{aktual}}$ = Konsumsi bahan bakar gas kondisi aktual (1.337,32 MMBTU)
- $\text{Fuel Gas}_{\text{baseline}}$ = Konsumsi bahan bakar gas kondisi acuan/desain (1.222,08 MMBTU)

$$\% \Delta \text{Fuel Gas} = \left(\frac{\Delta \text{Fuel Gas}}{\text{Fuel Gas}_{\text{baseline}}} \right) \times 100\% \quad (4.9)$$

$$\% \Delta \text{Fuel Gas} = \frac{115,24}{1.222,08} \times 100\% = 9,43\%$$

Keterangan:

- $\% \Delta \text{Fuel Gas}$ = Persentase kenaikan konsumsi bahan bakar (%)
- $\Delta \text{Fuel Gas}$ = Kenaikan penggunaan bahan bakar gas (115,24 MMBTU)
- $\text{Fuel Gas}_{\text{baseline}}$ = Konsumsi bahan bakar gas kondisi acuan/desain (1.222,08 MMBTU)

Perhitungan kuantitatif membuktikan Unit GT 12 Belawan mengalami degradasi efisiensi termal relatif sebesar 8,64%, disertai pembengkakan konsumsi bahan bakar spesifik sebesar 9,09% serta peningkatan konsumsi gas riil sebesar 9,43% untuk menghasilkan daya *output* bersih yang sama. Penurunan kinerja termal ini secara langsung disebabkan oleh ketidaksempurnaan proses atomisasi bahan bakar pada *fuel nozzle* yang dipicu oleh penyumbatan lubang orifice akibat akumulasi kerak deposit karbon (*clogging*).

Ketika lubang orifice berukuran mikron pada ujung *nozzle* terdistorsi atau tersumbat sebagian oleh endapan karbon, diameter hidrolis aliran fluida menyusut secara asimetris (Qiu et al., 2022). Berdasarkan prinsip mekanika fluida, penyusutan ini menurunkan bilangan Reynolds aliran bahan bakar cair, sehingga merusak kestabilan lembaran fluida (*liquid sheet*) yang keluar dari *nozzle*. Proses pemecahan fluida menjadi droplet (*primary and secondary breakup*) terhambat. Akibatnya, diameter rata-rata droplet (*Sauter Mean Diameter* - SMD) melonjak drastis yang berarti bahan bakar tersemprot dalam bentuk tetesan kasar, bukan kabut halus.

Droplet kasar memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat rendah, sehingga membutuhkan waktu penguapan (*evaporation delay*) yang jauh lebih lama di dalam ruang bakar. Sebagian fraksi bahan bakar tidak sempat menguap dan bereaksi sempurna dalam zona primer pembakaran (*primary zone*), melainkan terbakar lambat pada zona transisi atau bahkan lolos tanpa sempat melepaskan energi kalornya secara optimal. Hal ini secara drastis menurunkan efisiensi pembakaran (*combustion efficiency*), meningkatkan rasio udara-bahan bakar lokal (*local Air-Fuel Ratio* - AFR) di luar batas stoikiometri, dan memaksa sistem kontrol menyuplai lebih banyak laju aliran massa bahan bakar cair/gas untuk mempertahankan target keluaran daya generator sebesar 108 MW.

Fenomena ini selaras dengan penelitian klasik Lefebvre (1989) mengenai atomisasi dan pembakaran turbin gas yang menyatakan bahwa peningkatan SMD droplet di atas batas desain (umumnya $> 25 - 30 \mu\text{m}$) akan langsung memicu *incomplete combustion* dan memperpanjang panjang nyala api (*flame length*). Hal ini secara termodinamika akan menurunkan efisiensi konversi energi kimia bahan bakar menjadi energi entalpi gas panas pembakaran.

Implikasi operasional dari penurunan efisiensi termal sebesar 2,60% (absolut) atau 8,64% (relatif) ini adalah pembengkakan biaya operasional pembangkit secara masif akibat konsumsi bahan bakar yang boros, serta peningkatan akumulasi emisi gas buang tak terbakar yang mempercepat laju kerusakan termal pada sudu-sudu turbin gas hilir (*turbine reblading* akibat *hot corrosion*)

4.2.2 Analisis Sebaran Temperatur Gas Buang (*Exhaust Temperature Spread*)

Exhaust temperature spread merupakan indikator standar dalam diagnostik turbin gas untuk menilai keseragaman proses pembakaran antar ruang bakar (*combustion chamber*). Semakin besar nilai *spread* (selisih temperatur maksimum dan minimum antar termokopel), semakin besar indikasi ketidakseragaman distribusi bahan bakar akibat gangguan pada *fuel nozzle*.

$$\text{Spread} = T_{\text{max}} - T_{\text{min}} \quad (4.9)$$

Keterangan:

- *Spread* = Sebaran/selisih temperatur gas buang ($^{\circ}\text{C}$)
- *T_{max}* = Temperatur maksimum antar termokopel ($^{\circ}\text{C}$)
- *T_{min}* = Temperatur maksimum antar termokopel ($^{\circ}\text{C}$)

Berikut ini disajikan perhitungan sebaran temperatur gas buang (*exhaust temperature spread*) dalam Tabel 8:

Tabel 8. Perhitungan *Spread Temperatur Gas Buang (Exhaust Temperature 1–6)*

Waktu Pengamatan	T Maks ($^{\circ}\text{C}$)	T Min ($^{\circ}\text{C}$)	Rata-rata ($^{\circ}\text{C}$)	Spread ($^{\circ}\text{C}$)
Data Awal (12:00 WIB)	551	530	541,00	21
Data Tengah (13:00 WIB)	554	533	544,83	21
Data Akhir (14:00 WIB)	556	533	545,33	23

Mengacu pada Tabel 8, nilai *spread* yang konsisten pada rentang 21–23 $^{\circ}\text{C}$ dan cenderung meningkat pada pengamatan akhir mengindikasikan adanya ketidakseragaman distribusi panas antar ruang bakar yang secara teknis berkaitan

dengan tidak meratanya distribusi bahan bakar oleh *fuel nozzle* pada masing-masing *combustor can*.

Temuan tambahan diperoleh dari data *Turbine Outlet Temperature*, di mana sensor pada titik ke-4 (A4 dan B4) secara konsisten menunjukkan pembacaan yang jauh lebih rendah (476°C) dibandingkan titik lainnya (528–551°C), baik pada sisi A maupun sisi B. Konsistensi penyimpangan pada posisi yang sama di kedua sisi ini bukan kebetulan acak, melainkan mengindikasikan adanya *combustor can* tertentu yang mengalami pembakaran kurang optimal (*under-fired*), kemungkinan besar akibat aliran bahan bakar yang terhambat sebagian oleh deposit karbon pada *fuel nozzle* di posisi tersebut. Hal ini sejalan dengan temuan visual pada Gambar 4.13 (deposit karbon pada ujung *fuel nozzle*).

4.2.3 Perhitungan Indikator Keandalan (*Downtime*, MTBF, MTTR, dan *Availability*)

Berdasarkan Gambar 4.19 (Data Gangguan PLTG GT 1.2 UP Belawan), dilakukan perhitungan durasi setiap kejadian gangguan (selisih waktu *trip/shutdown* terhadap waktu *start/firing*) yang direkapitulasi pada Tabel 9.

Tabel 9. Rekapitulasi Durasi dan Kategori Gangguan GT 12 Belawan (Jan 2024 – Apr 2025)

No	Jenis Gangguan	Jumlah Kejadian	Total Durasi (jam)	Rata-rata Durasi (jam)
1	FD1 (<i>Forced Derating</i>)	3	138,12	46,04
2	FO1 (<i>Forced Outage</i>)	10	1.925,14	192,51
3	MO (<i>Maintenance/Major Outage</i>)	3	912,10	304,03
4	ME (<i>Maintenance Extended</i>)	1	167,97	167,97
	Total	17	3.143,33	–

FO1 mendominasi jumlah kejadian gangguan tidak terjadwal (*unplanned*) dengan total durasi terbesar kedua setelah MO. Frekuensi FO1 yang tinggi (10 dari 17 kejadian) menjadi perhatian utama karena berkaitan dengan gangguan operasional mendadak yang secara pola waktu kejadian berdekatan dengan periode ditemukannya indikasi kerusakan *fuel nozzle* pada inspeksi (Juli 2024, Oktober–November 2024, Februari–April 2025).

a. Perhitungan *Availability*

Periode pengamatan: 1 Januari 2024 – 13 April 2025 = 469 hari 21,5 jam = 11.277,5 jam

$$Availability_{total} = \frac{(Total\ Periode\ Pengamatan - Total\ Downtime)}{Total\ Periode\ Pengamatan} \times 100\% \quad (4.10)$$

$$Availability_{total} = \frac{11.277,5 - 3.143,33}{11.277,5} \times 100\% = 72,13\%$$

Keterangan:

- $Availability_{total}$ = Total tingkat ketersediaan unit (%)
- $Total\ Periode\ Pengamatan$ = Total waktu periode pengamatan (11.277,5 jam)
- $Total\ Downtime$ = Total durasi pemadaman/gangguan selama periode tersebut (3.143,33 jam)

Jika hanya memperhitungkan gangguan tidak terjadwal (*forced outage* FO1 + FD1), tanpa memasukkan pemeliharaan terjadwal (MO/ME):

$$Availability_{(unplanned)} = \frac{11.277,5 - (1.925,14 + 138,12)}{11.277,5} \times 100\% = 81,71\% \quad (4.11)$$

b. Perhitungan MTBF (*Mean Time Between Failures*)

$$MTBF = \frac{Waktu\ Operasi}{Jumlah\ Kejadian\ FO1} \quad (4.12)$$

$$MTBF = \frac{Waktu\ Operasi}{Jumlah\ Kejadian\ FO1} = \frac{11.277,5 - 3.143,33}{10} = 813,4\ jam \approx 33,9\ hari$$

Keterangan:

- $MTBF$ = Rata-rata jarak waktu operasi di antara dua kegagalan (jam atau hari)
- $Waktu\ Operasi$ = Selisih total jam periode dikurangi total durasi *outage* (8.134,17 jam)
- $Jumlah\ Kejadian\ FO1$ = Frekuensi terjadinya pemadaman paksa (*Forced Outage* 1) tersebut (10 jam)

c. Perhitungan MTTR (*Mean Time To Repair*, khusus FO1)

$$MTTR = \frac{Total\ Durasi\ FO1}{Jumlah\ Kejadian\ FO1} = \frac{1.925,14}{10} = 192,5\ jam \approx 8,0\ hari \quad (4.13)$$

Keterangan:

- $MTTR$ = Rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk perbaikan/pemulihan (jam atau hari)
- $Total\ Durasi\ FO1$ = Akumulasi durasi waktu pemadaman paksa (*Forced Outage* 1) (1.925,14 jam)

- *Jumlah Kejadian FO1* = Frekuensi terjadinya pemadaman paksa (*Forced Outage 1*) tersebut (10 jam)

Perhitungan rekayasa keandalan menghasilkan nilai ketersediaan unit (*Availability*) yang sangat rendah, yaitu 72,13%, dengan nilai MTBF sebesar 33,89 hari dan durasi pemulihan rata-rata (MTTR) mencapai 192,51 jam (8,02 hari) per kejadian gangguan. Tingginya frekuensi mati paksa unit (*Forced Outage* - FO1) yang berulang (10 kejadian dalam 15 bulan) yang dipicu secara berantai oleh kegagalan mekanis langsung pada komponen ruang bakar, khususnya akumulasi *carbon deposit* dan pembentukan *crack* pada sambungan las *fuel nozzle* maupun disebabkan oleh gangguan lainnya.

Ketika *fuel nozzle* mengalami deteriorasi fisik berupa retakan mikro pada sambungan las, bahan bakar cair bertekanan tinggi bocor sebelum melewati lubang orifis utama. Kebocoran ini langsung menurunkan tekanan suplai bahan bakar secara drastis, memicu aktifnya proteksi darurat hulu berupa alarm "*Liquid Fuel Pressure Low*" pada DCS. Di sisi lain, kebocoran bahan bakar cair ini menyebar secara acak ke badan luar *nozzle* yang bertemperatur sangat tinggi, memicu pembakaran tidak terkendali di luar zona desain (*external combustion*). Kondisi ini dideteksi oleh sistem pengaman vibrasi poros (*high vibration bearing #3* akibat distorsi gaya aerodinamis aliran gas panas) atau malafungsi deteksi api (*failure to ignite / no flame detected*).

Demi melindungi integritas struktur turbin gas dari kehancuran total, sistem kontrol DCS secara otomatis melakukan pemutusan hubungan interlock proteksi (*forced shutdown trip*). Proses perbaikan yang membutuhkan *cooling down* ruang bakar (minimal 24-48 jam), pembongkaran casing silinder turbin, inspeksi NDT, kalibrasi *flow divider*, hingga penggantian komponen *nozzle* memakan waktu pengerjaan yang lama yang menjelaskan mengapa nilai MTTR membengkak hingga 8,02 hari per kejadian.

Berdasarkan standar keandalan pembangkit listrik kelas dunia (*World Class Generation Performance Indicators* - IEEE Std 762), target nilai *Availability Factor* untuk unit turbin gas kategori *baseload* minimal harus mencapai 90% hingga 95%, sedangkan nilai MTBF ideal adalah > 360 hari (1 tahun). Keberadaan

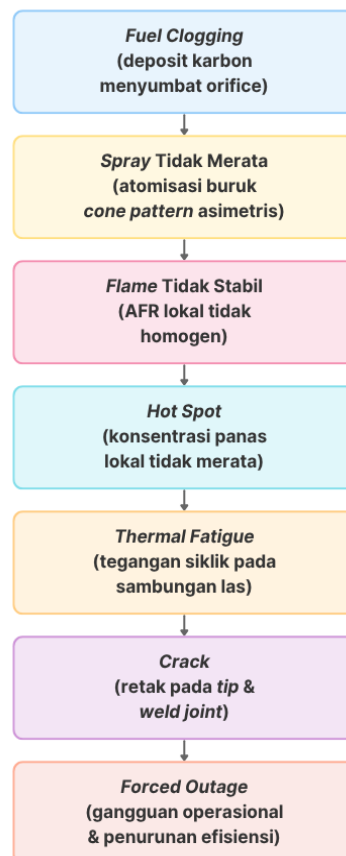
nilai MTBF sebesar 33,89 hari mengonfirmasi bahwa unit GT 12 Belawan berada dalam status keandalan kritis (*chronically unreliable*) yang kurang optimal dalam operasional.

Implikasi finansial dan sistemik dari rendahnya nilai keandalan ini adalah hilangnya potensi pendapatan penjualan listrik akibat tingginya durasi mati paksa (*outage costs*), membengkaknya biaya suku cadang serta jasa pemeliharaan darurat, serta tingginya risiko denda penalti keandalan (*performance liquid damages*) dari operator sistem jaringan akibat ketidakmampuan memasok daya sesuai komitmen sewa jaringan.

4.2.4 Pembahasan Korelasi Antar Data

Merangkum hasil sub-bab 4.1 dan perhitungan pada sub-bab 4.2.1–4.2.3, dapat disusun rangkaian keterkaitan (korelasi) sebagai berikut:

Flow Mechanism Kegagalan Fuel Nozzle GT 12 Belawan



Gambar 4.22 Flow Mechanism Kegagalan Fuel Nozzle GT 12 Belawan

Ketujuh sumber data di atas, jika dirangkai akan menunjukkan satu alur sebab-akibat yang saling menguatkan (*mutually reinforcing evidence*), bukan sekadar temuan yang berdiri sendiri-sendiri. Indikasi paling awal muncul dari alarm DCS berupa *fuel low pressure alarm* yang menjadi sinyal pertama bahwa aliran bahan bakar menuju *fuel nozzle* mengalami hambatan. Sinyal ini kemudian dikonfirmasi secara fisik melalui inspeksi visual yang menemukan perubahan warna cokelat kehitaman dan deposit karbon pada permukaan *nozzle* menjadi bukti nyata bahwa *nozzle* telah lama terpapar temperatur tinggi sekaligus mengalami penyumbatan sebagian. Deposit karbon inilah yang kemudian terbukti mengganggu kinerja atomisasi yang ditunjukkan oleh *Fuel Nozzle Spray Test* yang mencatat pola semprotan tidak simetris pada sebagian *nozzle* yang berarti bahwa bahan bakar tidak lagi tercampur homogen dengan udara sebelum proses pembakaran berlangsung.

Ketidaksempurnaan atomisasi tersebut memiliki konsekuensi terukur pada tingkat sistem yaitu data *performance test* mencatat efisiensi termal turun 8,64% dan konsumsi bahan bakar naik 9,43%, sementara log temperatur menunjukkan *exhaust spread* 21–23°C dengan anomali pada titik A4/B4 yang konsisten di kedua sisi yang mana bukti kuantitatif bahwa distribusi bahan bakar antar *combustor can* memang tidak merata, persis seperti yang diprediksi dari hasil *spray test*. Ketidakmerataan pembakaran ini pada gilirannya menimbulkan tegangan termal berulang pada komponen *nozzle* yang diperkuat oleh data jam operasi (14.019,42 jam dan 32 kali *start* sejak *overhaul* 2022) sebagai bukti bahwa *nozzle* telah mengalami siklus panas-dingin dalam jumlah besar. Akumulasi tegangan siklik inilah yang akhirnya bermuara pada retak, sebagaimana dikonfirmasi oleh *Liquid Penetrant Test* yang menemukan retak permukaan secara spesifik pada *tip* dan sambungan las pada titik-titik dengan konsentrasi tegangan tertinggi, sementara *body nozzle* yang homogen tetap utuh.

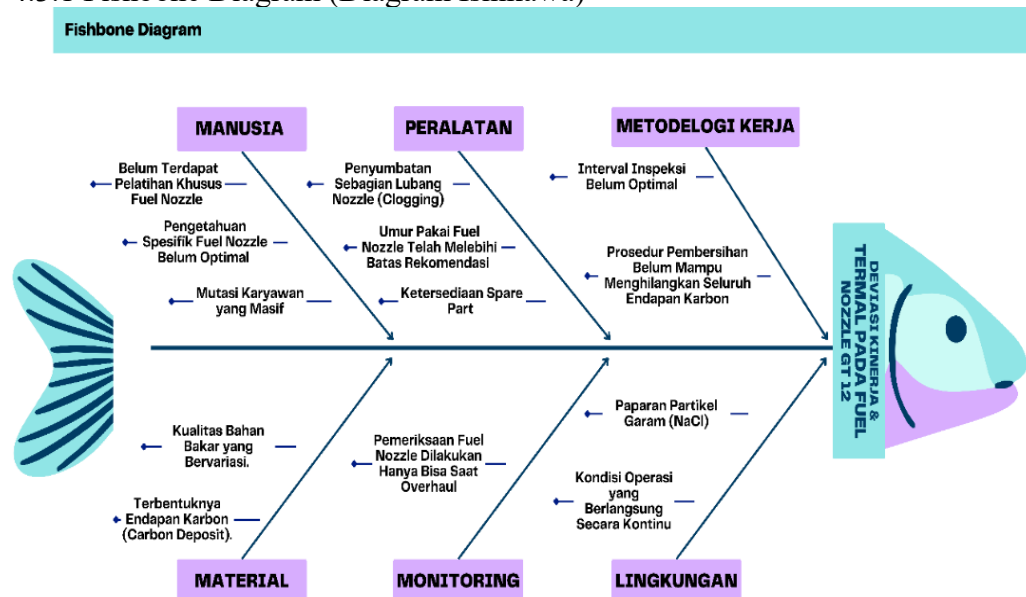
Pada akhirnya, seluruh rangkaian kegagalan komponen ini bermanifestasi sebagai gangguan operasional nyata dimana data gangguan mencatat 10 kejadian *forced outage* dalam ± 15 bulan dengan MTTR rata-rata 8 hari dan pola kemunculannya secara temporal berhimpitan dengan periode-periode ditemukannya kerusakan *nozzle* pada inspeksi. Kesimpulan teknis ini pada akhirnya

juga dikuatkan oleh hasil diskusi dengan tim pemeliharaan yang secara independen menyebutkan deposit karbon, *clogging* dan perubahan *spray pattern* sebagai gangguan paling umum ditemukan pada unit. Hal ini mengonfirmasi bahwa pola kegagalan yang terungkap melalui pengujian teknis bukan kasus tunggal, melainkan pola berulang yang telah dikenali di lapangan.

Dengan demikian, ketujuh sumber data tersebut bukan hanya saling melengkapi, tetapi juga membentuk satu rantai kausal yang runtut dan dapat divisualisasikan sebagai *flow mechanism* yaitu *fuel clogging* akibat deposit karbon memicu *spray* yang tidak merata yang menyebabkan nyala api tidak stabil akibat rasio udara-bahan bakar (AFR) yang tidak homogen, sehingga timbul *hot spot* atau konsentrasi panas lokal pada *nozzle* dan *combustor can*. Paparan panas tidak merata yang berulang ini memicu *thermal fatigue* berupa tegangan siklik pada titik-titik lemah seperti sambungan las. Pada akhirnya berkembang menjadi *crack* dan bila tidak ditangani, bermuara pada *forced outage* yang menurunkan keandalan serta efisiensi operasional unit secara keseluruhan. Rangkaian inilah yang menjadikan sembilan temuan pada tabel bukan sekadar kumpulan fakta terpisah, melainkan bukti empiris pada tiap tahapan dari satu mekanisme kegagalan yang sama.

4.3 Analisis Root Cause Analysis (RCA)

4.3.1 Fishbone Diagram (Diagram Ishikawa)



Gambar 4.23 Fishbone Diagram Penyebab Kegagalan *Fuel Nozzle*

Mengacu pada Gambar 4.22, Diagram Ishikawa (*Fishbone Diagram*) digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab terjadinya deviasi kinerja dan kegagalan pada *fuel nozzle* GT 1.2 secara sistematis. Analisis dilakukan berdasarkan enam kategori utama, yaitu manusia (*man*), peralatan (*machine*), metodologi kerja (*method*), material, monitoring, dan lingkungan (*environment*). Hasil analisis menunjukkan bahwa kegagalan *fuel nozzle* dipengaruhi oleh kombinasi beberapa faktor yang saling berkaitan, dengan faktor material dan peralatan sebagai penyebab yang paling dominan. Diagram ini menjadi dasar dalam menentukan *root cause* serta menyusun rekomendasi perbaikan untuk meningkatkan keandalan dan kinerja sistem pembakaran turbin gas.

Tabel 10. Identifikasi Penyebab Kegagalan *Fuel Nozzle* Berdasarkan Kategori Fishbone

Kategori	Faktor Penyebab	Sumber Data Pendukung
<i>Man</i>	Kurangnya transfer pengetahuan (<i>knowledge transfer</i>) antarpersonel akibat mutasi/rotasi pegawai, sehingga pengalaman teknis dan riwayat penanganan gangguan <i>fuel nozzle</i> tidak terdokumentasi dan tersampaikan secara memadai kepada personel pengganti	Hasil diskusi Tim Pemeliharaan UP Belawan & Tim OH UMRO
<i>Machine</i>	Retak pada ujung dan sambungan las <i>nozzle</i> , penyumbatan sebagian lubang orifice, pola semprotan tidak simetris	Hasil LPT (Tabel 6), <i>Fuel Nozzle Spray Test</i>
<i>Method</i>	Interval pemeliharaan bersifat <i>time-based</i> , belum mempertimbangkan frekuensi <i>start-stop</i> actual, prosedur inspeksi <i>spray pattern</i> belum rutin	Data jam operasi & jumlah <i>start</i> , diskusi Tim Pemeliharaan
<i>Material</i>	Kegagalan sambungan las sebagai titik terlemah terhadap tegangan termal, degradasi material akibat paparan temperatur tinggi berulang	Hasil LPT terkait retak pada sambungan las, perubahan warna <i>nozzle</i>
<i>Environment</i>	Temperatur ruang bakar tinggi (530–580°C) dan temperatur <i>compressor outlet</i> meningkat (340°C), siklus <i>start-stop</i> tinggi (32 kali)	Log parameter temperature, data jam operasi

Mengacu pada Tabel 10, analisis menggunakan metode *fishbone* mengidentifikasi bahwa kegagalan *fuel nozzle* tidak disebabkan oleh satu faktor tunggal, melainkan merupakan kombinasi faktor manusia, mesin, metode, material, dan lingkungan operasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa retak pada sambungan las *fuel nozzle* akibat degradasi material serta kondisi operasi bertemperatur tinggi menjadi penyebab dominan, yang diperkuat oleh metode pemeliharaan yang belum

optimal dan kurangnya transfer pengetahuan dalam penanganan gangguan. Temuan ini menjadi dasar dalam penentuan akar penyebab (*root cause*) dan penyusunan rekomendasi perbaikan.

4.3.2 5 Why Analysis

Penyebab kegagalan utama *fuel nozzle* yaitu ditemukan retak (*crack*) pada ujung dan sambungan las *fuel nozzle* GT 12 Belawan.

Tabel 11. 5 Why Analysis

Tahap	Pertanyaan "Mengapa"	Jawaban
Why 1	Mengapa retak terjadi pada ujung dan sambungan las <i>nozzle</i> ?	Karena area tersebut merupakan titik konsentrasi tegangan termal (<i>thermal stress concentration</i>) akibat perubahan geometri dan perbedaan respons termal antar material pada sambungan las.
Why 2	Mengapa terjadi konsentrasi tegangan termal yang signifikan?	Karena <i>fuel nozzle</i> mengalami siklus pemanasan-pendinginan berulang (<i>thermal cycling</i>) akibat frekuensi <i>start-stop</i> unit yang cukup tinggi (32 kali sejak <i>overhaul</i> 2022) dan variasi beban operasi.
Why 3	Mengapa distribusi panas pembakaran menjadi tidak merata (<i>spread</i> 21–23°C, anomali suhu pada titik ke-4)?	Karena proses atomisasi bahan bakar tidak sempurna, sebagaimana ditunjukkan pola semprotan tidak simetris pada hasil <i>Fuel Nozzle Spray Test</i> .
Why 4	Mengapa atomisasi bahan bakar tidak sempurna?	Karena terdapat deposit karbon yang menumpuk dan menyumbat sebagian lubang <i>orifice nozzle</i> akibat pembakaran tidak sempurna pada permukaan dalam <i>nozzle</i> bertemperatur tinggi.
Why 5	Mengapa deposit karbon dapat menumpuk hingga mengganggu fungsi <i>nozzle</i> ?	Karena interval dan metode pemeliharaan yang diterapkan bersifat <i>time-based</i> dan belum sepenuhnya disesuaikan dengan kondisi operasi aktual (frekuensi <i>start-stop</i> tinggi dan durasi antar- <i>overhaul</i>), sehingga pembersihan deposit karbon tidak dilakukan secara proaktif sebelum menyebabkan gangguan signifikan pada distribusi bahan bakar.

Akar penyebab (*root cause*) berupa strategi pemeliharaan *fuel nozzle* yang bersifat *time-based maintenance* belum mengakomodasi kondisi operasi aktual unit (frekuensi *start-stop* tinggi), sehingga akumulasi deposit karbon tidak tertangani secara proaktif, mengakibatkan atomisasi bahan bakar tidak merata, konsentrasi tegangan termal pada titik las dan ujung *nozzle*, dan pada akhirnya menyebabkan retak (*crack*) yang menurunkan efisiensi pembakaran serta keandalan unit GT 12 Belawan.

4.3.3 Ringkasan Hasil Analisis

Berdasarkan keseluruhan perhitungan dan analisis RCA yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sementara, antara lain:

1. Kegagalan *fuel nozzle* GT 12 Belawan didominasi oleh retak pada ujung dan sambungan las, disertai deposit karbon dan pola semprotan tidak simetris.
2. Kegagalan tersebut mengakibatkan penurunan efisiensi termal sebesar 8,64% dan kenaikan konsumsi bahan bakar spesifik sebesar $\pm 9,4\%$.
3. Data *spread* temperatur gas buang ($21-23^{\circ}\text{C}$) dan anomali temperatur pada titik ke-4 (476°C , konsisten di dua sisi) membuktikan secara kuantitatif adanya ketidakseragaman distribusi bahan bakar antar *combustor can*.
4. Gangguan tidak terjadwal (FO1) terjadi sebanyak 10 kali dalam ± 15 bulan dengan rata-rata durasi pemulihan (MTTR) 8 hari yang menurunkan *availability* unit hingga $\pm 72-82\%$.
5. Hasil 5 *Why Analysis* mengidentifikasi akar penyebab utama berupa pemeliharaan *fuel nozzle* hanya dapat dilakukan saat *overhaul*, sedangkan kebutuhan jadwal *overhaul* belum optimal karena kebutuhan PLTG GT 12 untuk tetap beroperasi.

Temuan ini menjadi dasar dalam merumuskan rekomendasi tindakan korektif dan preventif pada sub-bab berikutnya (4.4 Rekomendasi Perbaikan).

4.4 Rekomendasi Perbaikan

Berdasarkan akar penyebab (*root cause*) yang telah diidentifikasi pada sub-bab 4.3.1, yaitu strategi pemeliharaan *fuel nozzle* yang masih bersifat *time-based* dan belum disesuaikan dengan kondisi operasi aktual. Pendekatan ini menjadwalkan kegiatan inspeksi dan penggantian komponen berdasarkan interval waktu tertentu tanpa mempertimbangkan kondisi aktual komponen maupun tingkat keparahan beban operasi yang dialami selama unit beroperasi. Pada PLTGU Belawan GT 1.2, *fuel nozzle* mengalami frekuensi *start-stop* yang tinggi, paparan temperatur operasi yang mencapai $530-580^{\circ}\text{C}$, serta siklus termal berulang yang mempercepat terjadinya degradasi material dan retak pada sambungan las (*weld joint*). Namun, kondisi tersebut belum menjadi dasar dalam penentuan interval

pemeliharaan, sehingga potensi kerusakan tidak dapat dideteksi secara dini. Akibatnya, kerusakan berkembang hingga menyebabkan penurunan kinerja sistem pembakaran, munculnya alarm *Liquid Fuel Pressure Low* dan pada akhirnya mengakibatkan kegagalan operasi (*trip*) pada unit turbin gas. Oleh karena itu, diperlukan strategi pemeliharaan yang lebih adaptif dan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) atau mempertimbangkan jumlah siklus operasi (*start-stop cycle*) agar potensi kerusakan pada *fuel nozzle* dapat dideteksi lebih awal dan keandalan operasi turbin gas dapat ditingkatkan.

Berikut disusun rekomendasi tindakan korektif dan preventif yang dikelompokkan berdasarkan kategori Fishbone (*Man, Machine, Method, Material, Environment, Monitoring*) agar selaras dengan hasil analisis RCA.

Tabel 12. Rekomendasi Tindakan Korektif dan Preventif

Kategori	Temuan Akar Masalah	Rekomendasi Tindakan	Sifat Tindakan
<i>Method</i>	1. Interval pemeliharaan <i>time-based</i> , belum mempertimbangkan frekuensi <i>start-stop actual</i>	Menerapkan strategi <i>Condition-Based Maintenance</i> (CBM): jadwal pembersihan/inspeksi <i>nozzle</i> disesuaikan dengan jumlah <i>start</i> dan jam operasi aktual, bukan hanya interval kalender tetap	Preventif
	2. Prosedur inspeksi <i>spray pattern</i> belum dilakukan secara rutin	Menjadwalkan <i>Fuel Nozzle Spray Test</i> secara berkala (misalnya, setiap <i>inspection interval</i> minor/major <i>overhaul</i>) sebagai bagian standar prosedur, bukan hanya saat indikasi gangguan sudah muncul	Preventif
<i>Machine</i>	1. Deposit karbon menyumbat sebagian lubang orifice	Melakukan pembersihan (<i>cleaning</i>) <i>nozzle</i> secara berkala menggunakan metode yang sesuai standar OEM sebelum deposit karbon terakumulasi signifikan	Korektif & Preventif
	2. Retak pada ujung dan sambungan las <i>nozzle</i>	Mengganti <i>fuel nozzle</i> yang telah terindikasi retak (melebihi batas toleransi hasil LPT) dengan komponen baru/ <i>rebuilt</i>	Korektif

		sesuai spesifikasi OEM sebelum unit dioperasikan kembali	
<i>Material</i>	Sambungan las sebagai titik terlemah terhadap tegangan termal	Melakukan evaluasi ulang terhadap prosedur pengelasan (<i>welding procedure specification</i>) dan mempertimbangkan perbaikan desain lokal (misalnya, <i>fillet radius</i>) pada titik sambungan untuk mengurangi konsentrasi tegangan	Preventif (jangka menengah)
<i>Man</i>	Kurangnya transfer pengetahuan teknis akibat mutasi/rotasi pegawai yang menyebabkan variasi kompetensi antarpersonel dalam inspeksi dan pemasangan <i>fuel nozzle</i>	Menyusun SOP inspeksi/pemasangan <i>fuel nozzle</i> yang terstandarisasi dan sistem serah-terima (<i>handover</i>) terdokumentasi setiap terjadi mutasi pegawai, termasuk basis data riwayat <i>maintenance</i> (CMMS) dan program <i>mentoring/refreshing training</i> berkala bagi personel baru maupun pengganti	Preventif
<i>Environment</i>	Siklus <i>start-stop</i> tinggi memicu <i>thermal cycling</i>	Mengoptimalkan pola operasi unit (meminimalkan <i>start-stop</i> yang tidak perlu) melalui koordinasi dengan bagian perencanaan operasi sistem, bila memungkinkan dari sisi kebutuhan beban sistem	Preventif (jangka panjang)
<i>Monitoring</i>	Anomali <i>exhaust spread</i> dan temperatur titik ke-4 (A4/B4) belum menjadi indikator dini baku	Menetapkan ambang batas (<i>threshold</i>) <i>exhaust temperature spread</i> sebagai parameter <i>early warning</i> pada sistem DCS, sehingga tren ketidakseragaman pembakaran dapat terdeteksi sebelum berkembang menjadi kegagalan fisik <i>nozzle</i>	Preventif

Prioritas implementasi mengacu pada akar penyebab utama yang telah diverifikasi (sub-bab 4.2.4) dengan rekomendasi prioritas tertinggi adalah penerapan *Condition-Based Maintenance* (CBM) dan penjadwalan rutin *Fuel Nozzle Spray Test* karena keduanya secara langsung menutup celah pada akar

penyebab (metode pemeliharaan yang belum berbasis kondisi operasi aktual), sementara rekomendasi lain bersifat mendukung (*supporting*) dan mitigatif terhadap faktor penyebab sekunder.

BAB 5.

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengumpulan data, perhitungan, dan analisis *Root Cause Analysis* (RCA) terhadap kegagalan *fuel nozzle* pada Turbin Gas GT 12 Unit Pembangkit Belawan yang telah diuraikan pada Bab 4, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kegagalan *fuel nozzle* GT 12 Belawan bermula dari akumulasi deposit karbon pada lubang *orifice* yang mengganggu kualitas atomisasi bahan bakar, sehingga distribusi pembakaran menjadi tidak merata antar *combustor can*. Kondisi ini secara bertahap meningkatkan tegangan termal pada titik-titik dengan konsentrasi tegangan tertinggi, yaitu sambungan las dan area ulir *fuel nozzle*. Sehingga, akhirnya memicu retak (*crack*) pada kedua lokasi tersebut, tanpa disertai deformasi maupun patahan pada *body nozzle* yang mengindikasikan kerusakan masih bersifat lokal dan progresif, bukan kegagalan mendadak.
2. Perubahan pola semprotan (*spray pattern*) yang tidak simetris akibat penyumbatan sebagian pada *orifice* terbukti menjadi penyebab langsung menurunnya kualitas pembakaran yang bermanifestasi sebagai penurunan efisiensi termal sebesar 8,64% dan kenaikan konsumsi bahan bakar spesifik sebesar $\pm 9,4\%$, pada kondisi daya keluaran (*net power output*) yang relatif setara dengan *baseline* desain.
3. Ketidakseragaman distribusi bahan bakar yang teridentifikasi melalui *Fuel Nozzle Spray Test* dan temuan deposit karbon pada inspeksi visual terbukti konsisten dengan bukti kuantitatif di tingkat sistem, yaitu peningkatan sebaran temperatur gas buang (*exhaust temperature spread*) beserta anomali temperatur pada titik pengukuran ke-4 (A4 dan B4 = 476°C, jauh di bawah titik lainnya).
4. *Availability* unit hasil perhitungan sebesar 72,13% belum mencapai target perusahaan (EAF 91,5%) maupun rentang *Availability* turbin gas industrial pada literatur internasional (85–95%) dengan kesenjangan 19,37 poin

persentase merujuk pada definisi *Equivalent Availability Factor* sesuai IEEE Std 762 dan basis data NERC GADS. Estimasi *Equivalent Forced Outage Rate* (EFOR) sebesar $\pm 19,1\%$ belum mencapai target perusahaan sebesar (EFOR 3,10%)

5. Penelitian ini berkontribusi dengan mengintegrasikan data inspeksi komponen (visual, LPT, *spray test*), data operasional turbin (jam operasi, frekuensi *start-stop*), indikator keandalan (MTBF, MTTR, *availability*), serta hasil uji kinerja unit ke dalam satu kerangka analisis RCA yang saling memverifikasi. Sehingga, mampu mengungkap hubungan sebab-akibat antara degradasi *fuel nozzle*, penurunan performa pembakaran, dan strategi pemeliharaan yang belum optimal. Hal ini berkaitan pada suatu keterkaitan yang tidak tampak apabila masing-masing sumber data dianalisis secara terpisah.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa penerapan strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance*) lebih relevan dibandingkan pemeliharaan berbasis waktu (*time-based maintenance*) dalam meningkatkan keandalan *fuel nozzle* dan menurunkan potensi *forced outage* pada PLTG GT 12 Belawan.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan di atas, maka saran-saran yang disampaikan dalam skripsi ini, antara lain:

1. Bagi Unit Pembangkit (PLTG Belawan):
 - a. Menerapkan strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance*) pada sistem bahan bakar dan sistem udara. Hal ini sejalan dengan akar penyebab yang diidentifikasi melalui RCA dan mengintegrasikannya ke dalam kalender pemeliharaan unit.
 - b. Melakukan *monitoring exhaust temperature spread* secara *real-time* melalui sistem DCS sebagai indikator peringatan dini (*early warning*) terhadap degradasi distribusi pembakaran akibat gangguan *fuel nozzle*. Hal ini dilakukan sebelum berkembang menjadi kerusakan fisik.

- c. Membuat kajian dampak penundaan jadwal *overhaul* terhadap keterlambatan inspeksi dan pemeliharaan *fuel nozzle*. Hal ini berguna memitigasi risiko akumulasi kerusakan akibat interval pemeliharaan yang tertunda.
 - d. Melakukan inspeksi *fuel nozzle* secara berkala seperti inspeksi menggunakan LPT, NDT, pengukuran dimensi, pembersihan, dan *spray test* pada *fuel nozzle*.
2. Bagi Tim Pemeliharaan dan *Overhaul*:
- a. Memastikan *scope overhaul* mencakup pembersihan *fuel nozzle* dengan *carbon cleaner*, pengujian LPT, *spray test*, serta penggantian komponen yang telah menunjukkan kerusakan secara konsisten pada setiap siklus pemeliharaan.
 - b. Melakukan inspeksi material secara berkala yang meliputi *Liquid Penetrant Test* (LPT), metode NDT lain yang relevan, serta pengukuran dimensi *nozzle*. Hal ini bertujuan untuk mendeteksi indikasi retak dan keausan sejak dini, mengingat penelitian ini membuktikan bahwa retak umumnya berinisiasi pada sambungan las dan area ulir.
 - c. Melakukan evaluasi berkala terhadap prosedur pengelasan (*welding procedure specification*) pada sambungan *fuel nozzle* sebagai bagian dari upaya mengurangi risiko retak pada titik sambungan di masa mendatang.
3. Bagi Penelitian Selanjutnya:
- a. Melakukan analisis metalurgi lanjutan, seperti *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS), dan metalografi pada material *fuel nozzle* yang mengalami retak untuk mengonfirmasi mekanisme kegagalan secara mikrostruktural.
 - b. Melakukan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada proses atomisasi dan distribusi temperatur di ruang bakar untuk memvalidasi hubungan antara pola semprotan tidak simetris dan ketidakseragaman pembakaran secara numerik.
 - c. Mengembangkan estimasi *Remaining Useful Life* (RUL) *fuel nozzle* berbasis data operasional dan hasil inspeksi, serta mengeksplorasi penerapan *machine learning* untuk prediksi dini kegagalan komponen.

- d. Mengkaji penerapan kerangka *Reliability Centered Maintenance* (RCM) secara lebih luas pada sistem pembakaran turbin gas, di luar cakupan CBM pada *fuel nozzle* semata.
- e. Melakukan studi *reverse engineering* untuk pengembangan *fuel nozzle* dalam negeri. Hal ini berguna mendukung ketersediaan suku cadang secara mandiri.

DAFTAR PUSTAKA

- Andersen, B., & Fagerhaug, T. (2006). *Root Cause Analysis: Simplified Tools and Techniques* (2nd ed). ASQ Quality Press.
- Boyce, M. P. (2012). *Gas Turbine Engineering Handbook* (4nd ed). Elsevier.
- Fathyunes, L., & Mohtadi-Bonab, M. A. (2023). A Review on the Corrosion and Fatigue Failure of Gas Turbines. *Metals*, 13(4), 701–725. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/met13040701>
- Hwang, J., Kim, M. K., Lee, W. J., Min, K., Kang, D. W., & Kim, H.-S. (2023). Combustion Characteristics of Axial Fuel Staging Nozzles for Gas Turbine Combustors. *Journal of the Korean Society of Combustion (한국연소학회지)*, 8(4), 21–29. <https://doi.org/https://doi.org/10.15231/jksc.2023.28.4.021>
- Kazempour-liacy, H., & Shirpay, M. R. (2013). Failure Analysis of a Repaired Gas Turbine Nozzle. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 13(3), 243–248. <https://doi.org/10.1007/s11668-013-9667-4>
- Kraftwerk Union AG. (1988). *Gas Turbines Test Record – Turbine/Compressor Casing Water Hose Levelling*.
- Kurz, R., & Brun, K. (2001). Degradation in Gas Turbine Systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power (ASME)*, 123(1), 70–77. <https://doi.org/10.1115/1.1340629>
- Kurz, R., Meher-homji, C., Kurz, R., & Brun, K. (2012). Gas turbine performance and maintenance. *Texas A&M*.
- Lefebvre, A. H., & Ballal, D. R. (2010). *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions* (3nd ed). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Meher-homji, C. B., & Bromley, A. (2004). Gas Turbine Axial Compressor Fouling and Washing. *Texas A&M University Turbomachinery Laboratories*, 163–192. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/1969.1/163249>
- Mobley, K., Higgins, L., & Wikoff, D. (2008). *Maintenance Engineering Handbook* (7 nd ed). McGraw Hill Professional.
- Mulyono, A., & Suwarti. (2016). *Pemeliharaan Fuel Nozzle pada Sistem Gas Turbin Generator (GTG) pada PLTGU*. 12(3), 91–96. <https://doi.org/https://doi.org/10.32497/eksergi.v12i3.620>
- Oakes, M., Konrade, J., Bleckinger, M., Turner, M., Hughes, S., Hoffman, H., Shultz, T., & Lewis, E. (2023). Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants, Volume 5: Natural Gas Electricity Generating Units for Flexible Operation. In *National Energy Technology Laboratory* (Vol. 5).
- Patoding, H. E., & Sau, M. (2019). *Energi dan Operasi Tenaga Listrik dengan Aplikasi ETAP*. Deepublish.
- Phillips, J. N., & Simas, P. (2004). Gas Turbine Fuel Nozzle Refurbishment. *Hydrocarbon Processing*, 83(1), 72–74.
- Qiu, C., Chen, Z., Zhou, W., Martynenko, S., & Yanovskiy, L. (2022). Experimental Investigation on Carbon Deposition Characteristics of Aeroengine Swirl Nozzle and Its Effect on Spray Behaviors. *Fuel*, 324(124431). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124431>
- Razak, A. M. Y. (2007). *Industrial Gas Turbines: Performance and Operability*.

CRC Press.

- Saravanamuttoo, H., Cohen, H., & Rogers, G. (2013). *Gas Turbine Theory* (5nd ed). Pearson Education.
- Suef, M., Afandi, N. K., Sulistiyowati, W., & Komalasari, D. (2024). Integrating FMEA and RCA Methods to Improve Speaker Product Quality: Identifying and Eliminating the Root Causes of Defects. *AIP Conference Proceedings*, 3167(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0223616>
- Syammmary, R., Hendri, & Lukfianto. (2020). *Analisis Efisiensi Turbin Gas Tipe V94 . 2 Sebelum dan Sesudah Minor Inspection Pada Blok 4 Unit 3 Pltgu Muara Tawar*. 8(2), 71–81. <https://doi.org/https://doi.org/10.33322/powerplant.v8i2.1077>
- Velásquez, R. M. A., & Lara, J. V. M. (2022). Converting Data into Knowledge with RCA Methodology Improved for Inverters Fault Analysis. *Heliyon*, 8(8), e10094. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10094>
- Walsh, P. P., & Fletcher, P. (2004). *Gas Turbine Performance* (2nd ed). Balackwell Science.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Frekuensi Muncul *Alarm Liquid Pressure Low*

Tabel Frekuensi Muncul *Alarm Liquid Pressure Low*

No.	Waktu	Jumlah Muncul Alarm
1	04 Januari 2025	1
2	05 Januari 2025	4
3	06 Januari 2025	8
4	07 Januari 2025	1

Lampiran 2. Pengamatan Tekanan Bahan Bakar

Tabel Pengamatan Tekanan Bahan Bakar

No.	Waktu (Hari)	Tekanan Bahan Bakar (Bar)
1	04 Januari 2025	5,8
2	05 Januari 2025	8,1
3	06 Januari 2025	8
4	07 Januari 2025	4,5

Lampiran 3. Pengamatan *Log Temperature*

Tabel Pengamatan *Log Temperature*

No	Titik Sensor	Temperatur (C°) 04 Januari 2025	Temperatur (C°) 05 Januari 2025
1	Inlet Temp	30,9	29,7
2	Ctd	29	36
3	Exhaust Avg	30	36
4	AAT-1A	28,7	29,5
5	AAT-2A	28,9	29,6
6	Meas AAT	28,8	29,6

Lampiran 4. *Trend Fuel Consumption* vs NPHR

Tabel *Trend Fuel Consumption* vs NPHR

No.	Waktu (Bulan)	Fuel Gas Consumption (mmBTU)	Fuel Oil Consumption (Liter)	NPHR (kkal/kWh)
1	Januari 2024	146.230,66	396.828,42	3337,9
2	Februari 2024	879.320,29		3376,6
3	Maret 2024	862.529,49		3324,7
4	Aoril 2024	877.691,15		3325,9
5	Mei 2024	893.996,70		3298,1
6	Juni 2024	797.592,51		3326,9
7	Juli 2024	481.073,90		3277,5
8	Agustus 2024	893.628,30		3332
9	September 2024	867.389,27		3434
10	Oktober 2024	379.549,29		3577
11	November 2024	757.866,95		3378
12	Desember 2024	570.390,78		3422
13	Januari 2025	297.953,50		3495

Lampiran 5. Durasi Gangguan Pembangkit vs Durasi Operasi

Tabel Durasi Gangguan Pembangkit vs Durasi Operasi

No.	Tanggal <i>Trip/Shutdown</i>	Tanggal <i>Start/Firing</i>	Periode Gangguan	Jenis Gangguan	Total Durasi Gangguan
1	26/01/2024 00:40	26/01/2024 11:55	Gangguan 1	FD1	11,25
2	26/01/2024 11:55	26/01/2024 15:38	Gangguan 2	FO1	3,72
3	26/01/2024 17:35	26/01/2024 21:51	Gangguan 3	FO1	4,27
4	26/01/2024 23:13	27/01/2024 03:38	Gangguan 4	FO1	4,42
5	27/01/2024 04:28	27/01/2024 13:06	Gangguan 5	FO1	8,63
6	06/02/2024 09:57	06/02/2024 12:40	Gangguan 6	FO1	2,72
7	07/02/2024 18:50	07/02/2024 19:12	Gangguan 7	FD1	0,37
8	17/07/2024 20:05	29/07/2024 19:49	Gangguan 8	FO1	287,73
9	30/07/2024 07:26	30/07/2024 11:25	Gangguan 9	FO1	3,98
10	14/10/2024 20:27	02/11/2024 23:52	Gangguan 10	FO1	459,42
11	04/11/2024 17:54	04/11/2024 19:53	Gangguan 11	FO1	1,98
12	13/12/2024 00:00	18/12/2024 11:46	Gangguan 12	MO	131,77
13	13/01/2025 08:59	12/02/2025 00:01	Gangguan 13	MO	711,03
14	12/02/2025 00:01	18/02/2025 23:59	Gangguan 14	ME	167,97
15	19/02/2025 00:01	07/04/2025 20:17	Gangguan 15	FO1	1148,27
16	08/04/2025 14:30	13/04/2025 21:00	Gangguan 16	FD1	126,5
17	11/04/2025 00:12	13/04/2025 21:30	Gangguan 17	MO	69,3

Lampiran 6. Pemantauan Parameter *Temperature Engine*

Tabel Pemantauan Parameter *Temperature Engine*

No	<i>Tag Name</i>	<i>Description</i>	Data Awal (12:00 WIB)	Data Tengah (13:00 WIB)	Data Akhir (14:00 WIB)	Satuan
1	12MBR20CT012A	<i>Exhaust Temp 1</i>	530	533	533	°C
2	12MBR20CT012A	<i>Exhaust Temp 2</i>	537	541	541	°C
3	12MBR20CT013A	<i>Exhaust Temp 3</i>	547	550	550	°C
4	12MBR20CT014A	<i>Exhaust Temp 4</i>	551	554	556	°C
5	12MBR20CT015A	<i>Exhaust Temp 5</i>	546	551	551	°C
6	12MBR20CT016A	<i>Exhaust Temp 6</i>	535	540	541	°C
7	12MBA22CT012A	<i>Turbine Outlet Temperature A1</i>	549	550	548	°C
8	12MBA22CT012A	<i>Turbine Outlet Temperature A2</i>	550	551	548	°C
9	12MBA22CT013A	<i>Turbine Outlet Temperature A3</i>	580	580	580	°C
10	12MBA22CT014A	<i>Turbine Outlet Temperature A4</i>	476	478	472	°C
11	12MBA22CT015A	<i>Turbine Outlet Temperature A5</i>	490	490	490	°C

12	12MBA22CT016A	<i>Turbine Outlet Temperature A6</i>	533	533	530	°C
13	12MBA22CT012B	<i>Turbine Outlet Temperature B1</i>	549	551	550	°C
14	12MBA22CT012B	<i>Turbine Outlet Temperature B2</i>	549	551	550	°C
15	12MBA22CT013B	<i>Turbine Outlet Temperature B3</i>	580	580	580	°C
16	12MBA22CT014B	<i>Turbine Outlet Temperature B4</i>	476	478	472	°C
17	12MBA22CT015B	<i>Turbine Outlet Temperature B5</i>	530	529	528	°C
18	12MBA22CT016B	<i>Turbine Outlet Temperature B6</i>	534	535	532	°C

Lampiran 7. Lembar Asistensi

LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Judul : Analisis Kegagalan *Fuel Nozzle* Turbin Gas PLTG GT 12
Belawan menggunakan Metode *Root Cause Analysis* (RCA)
Nama : Ari Setyawan
NPM : 2407230168P
Dosen Pembimbing : Dr. Suherman, S.T., M.T

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
1.		Perbaiki daftar gambar	9
2.		Perbaiki tujuan penelitian	9
3.		Perbaiki latar belakang	9
4.		Perbaiki format tabel	9
5.		Perbaiki diagram alur	9
6.		Tambahkan penjelasan grafik	9
7.		Buat tabel menjadi grafik	9
8.		Lampirkan data grafik di lampiran	9
9.		Urutkan pembahasan sesuai tujuan penelitian	9
10.		Perbaiki kesimpulan	9
11.		Perbaiki saran	9
		Aec Sidemg	9



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

Bila mendapat surat ini agar disebarkan
kepada seluruh mahasiswa

MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK

UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAK-PT/Ak.Ppy/PT/RI/2024

Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400 - 66224567 Fax. (061) 6625474 - 6631003

<https://fatek.umsu.ac.id> fatek@umsu.ac.id [umsu.medan](#) [umsu.medan](#) [umsu.medan](#) [umsu.medan](#)

**PENENTUAN TUGAS AKHIR DAN PENGHUJUKAN
DOSEN PEMBIMBING**

Nomor : 2549/II.3AU/UMSU-07/F/2025

Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, berdasarkan rekomendasi Atas Nama Ketua Program Studi Teknik MESIN Pada Tanggal 16 Desember 2025 dengan ini Menetapkan :

Nama : ARI SETYAWAN
Npm : 2407230168 p
Program Studi : TEKNIK MESIN
Semester : 7 (TUJUH)
Judul Tugas Akhir : ANALISA GANGGUAN PADA FUEL NAZZLE PLTG LOT 3
UNIT PEMBANGKIT BELAWAN .

Pembimbing : Dr SUHERMAN ST.MT

Dengan demikian diizinkan untuk menulis tugas akhir dengan ketentuan :

1. Bila judul Tugas Akhir kurang sesuai dapat diganti oleh Dosen Pembimbing setelah mendapat persetujuan dari Program Studi Teknik MESIN
2. Menulis Tugas Akhir dinyatakan batal setelah 1 (satu) Tahun dan tanggal yang telah ditetapkan.

Demikian surat penunjukan dosen Pembimbing dan menetapkan Judul Tugas Akhir ini dibuat untuk dapat dilaksanakan sebagaimana mestinya

Medan, 25 Jumadil Akhir 1447 H
16 Desember 2025 M

Dekan



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

Nama : Ari Setyawan
 NPM : 2407230168P
 Judul Tugas Akhir : Analisis Kegagalan Fuel Nozzle Turbin Gas PLTG GT12 Belawan
 Menggunakan Metode Root Cause Analysis (RCA)

TANDA TANGAN TIM DOSEN PENGUJI:

Pembimbing - I : Dr. Suherman, ST, MT :
 Pembimbing - I : Dr. Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T. :
 Pembimbing - II : Chandra Amirsyah P. Siregar, S.T., M.T. :

No	NPM	Nama Mahasiswa	Tanda Tangan
1	2407230171P	Lucy Ryar N	1.
2	2207230057	Rizky IRAWAN	2.
3	2207230142	KHAIRUL FAHMI PURBA	3.
4	2207230041	MUHAMMAD ALFANNY IRAWAN	4.
5	2207230091	LUTHFI DADRUT TAMAM	5.
6	2207230102	ABDUL FAHRIZAL	6.
7			7.
8			8.
9			9.
10			10.

Medan, 28 Juli 2026
 Ketua Prodi. Teknik Mesin

(.....)

**DAFTAR EVALUASI SEMINAR FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**

Nama : Ari Setyawan
NPM : 2407230168P
Judul Tugas Akhir : Analisis Kegagalan Fuel Nozzle Turbin Gas PLTG GT12 Belawan
Menggunakan Metode Root Cause Analysis (RCA)
Dosen Pembimbing - I : Dr. Suherman, ST, MT
Dosen Pembanding - I : Dr. Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T.
Dosen Pembanding - II : Chandra Amirsyah P. Siregar, S.T., M.T.

KEPUTUSAN / REKOMENDASI HASIL EVALUASI:

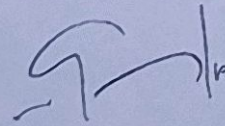
- ☐ 1. Baik dapat diterima ke sidang sarjana (collogium)
☒ 2. Dapat mengikuti sidang sarjana (collogium) setelah selesai melaksanakan perbaikan
☐ 3. Harus mengikuti seminar kembali

Catatan Perbaikan / Temuan Penguji :

Perbaikan sesuai catatan saat seminar

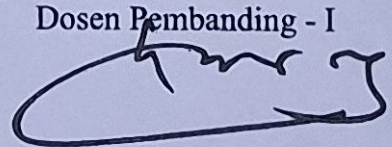
Diketahui:

Ketua Prodi. Teknik Mesin


(.....)

Medan, 28 Juli 2026

Dosen Pembanding - I


Dr. Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T.

**DAFTAR EVALUASI SEMINAR FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**

Nama : Ari Setyawan
NPM : 2407230168P
Judul Tugas Akhir : Analisis Kegagalan Fuel Nozzle Turbin Gas PLTG GT12 Belawan
Menggunakan Metode Root Cause Analysis (RCA)
Dosen Pembimbing - I : Dr. Suherman, ST, MT
Dosen Pembanding - I : Dr. Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T.
Dosen Pembanding - II : Chandra Amirsyah P. Siregar, S.T., M.T.

KEPUTUSAN / REKOMENDASI HASIL EVALUASI:

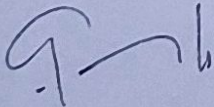
- ☐ 1. Baik dapat diterima ke sidang sarjana (collogium)
☒ 2. Dapat mengikuti sidang sarjana (collogium) setelah selesai melaksanakan perbaikan
☐ 3. Harus mengikuti seminar kembali

Catatan Perbaikan / Temuan Penguji :

lihat buku tugas akhir

Diketahui:

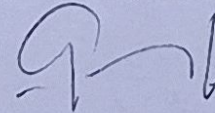
Ketua Prodi. Teknik Mesin



(.....)

Medan, 28 Juli 2026

Dosen Pembanding - II



Chandra Amirsyah P. Siregar, S.T., M.T.

Lampiran 8. Daftar Riwayat Hidup

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



A. DATA PRIBADI

Nama : Ari Setyawan
Jenis Kelamin : Laki-laki
Tempat, Tanggal Lahir : Girimukti, 20 Agustus 1994
Alamat : Jl. PLTA 5C Paya Pasir, Marelan Medan
Kebangsaan : Indonesia
Agama : Islam
E-mail : arisetyawan1994@gmail.com
No. HP : 081322190438

B. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. 2000-2006 : SDN 028 Penajam
2. 2007-2009 : SMPN 05 Penajam
3. 2009-2012 : SMKN 01 Balikpapan
4. 2012-2015 : Politeknik Negeri Samarinda
Program Studi Teknik Mesin
5. 2024-2026 : Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara,
Fakultas Teknik, Perogram Studi Teknik Mesin