



# Analisis Kegagalan Combustion Chamber Aeroderivative Gas Turbine Dengan Metode FMEA Dan RCFA

Prima Nurfarhan W.1\* , Deby Mardiansyah<sup>2</sup>, dan Emir Ridwan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Pembangkit Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. Dr. G.A Siwabessy, Kampus Baru UI Depok 16425

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. Dr. G.A Siwabessy, Kampus Baru UI Depok 16425

---

## Abstrak

Permasalahan saat ini pada pembangkit PT. X adalah terjadinya kegagalan proses pembakaran pada operasi combustion chamber atau ruang bakar turbin gas aeroderivative. Kegagalan proses pembakaran menyebabkan operasi turbin gas yang terganggu sehingga menurunkan waktu operasi turbin gas dan meningkatnya waktu pemeliharaan turbin gas. Penelitian ini bertujuan menganalisa kegagalan pada ruang bakar turbin gas aeroderivatif PT.X dengan pendekatan analisis FMEA dan RCFA . Kuesioner analisis FMEA disusun berdasarkan identifikasi komponen yang berpengaruh terhadap kegagalan ruang bakar turbin gas aeroderivatif oleh karyawan PT.X. Setelah kuesioner disusun, kuesioner diberikan kepada responden yang berjumlah 11 orang, dipilih berdasarkan faktor keterkaitan dan serta pemahaman terhadap masalah yang diteliti. Hasil kuesioner menunjukkan penilaian terhadap indikator utama, yang terbagi ke dalam tiga bagian, yaitu nilai severity (kerusakan kegagalan), occurrence (frekuensi terjadi) dan detection (deteksi kegagalan). Kemudian diimplementasikan dalam perhitungan RPN (Risk Priority Number), untuk mendapatkan komponen yang memiliki tingkatan kegagalan tertinggi dari segi severity, occurrence dan detection. Nilai RPN tertinggi kemudian dianalisa dengan pendekatan RCFA (root cause failure analysis) yang terbagi ke dalam lima faktor , yaitu faktor manusia, , faktor material, faktor lingkungan, faktor metode operasi dan faktor peralatan (machine). Hasilnya adalah berdasarkan data FMEA diperoleh kerusakan fuel nozzle dengan kerusakan coating loss dengan nilai RPN 294 . Berdasarkan analisa RCFA hal ini disebabkan oleh nilai suhu aktual dan kelembaban aktual melebihi standar serta Hasil reaksi melebihi batas titik lebur base material fuel nozzle. Tingginya suhu yang berlebih akan menyebabkan overheating dan thermal fatigue pada fuel nozzle.

Kata-kata kunci: FMEA, RCFA, Combustion Chamber, turbin gas

## Abstract

Current problems at PT. X is the failure of the combustion process in the combustion chamber or aeroderivative gas turbine combustion chamber. The failure of the combustion process in the gas turbine combustion chamber can disrupt the flow of hot gas towards the gas turbine blade. The disrupted gas turbine operation reduces the gas turbine operation time and increases the maintenance time of the gas turbine. This study aims to analyze the failure of the PT.X aeroderivative gas turbine combustion chamber with FMEA and RCFA analysis approaches. The FMEA analysis questionnaire was compiled based on the identification of component which affected the failure of the aeroderivative gas turbine combustion chamber by PT.X employee. After the questionnaire was compiled, the questionnaire was given to respondents totaling 11 people, selected based on the factors of relevance and understanding of the problem under study. The results of the questionnaire show an assessment of the main indicators, which are divided into three parts, namely the value of severity failure, occurrence (frequency occurs) and detection (failure detection). Then it is implemented in the calculation of the RPN (Risk Priority Number), to get components that have the highest failure rate in terms of severity,

---

\* Corresponding author E-mail address: prima.nurfarhanwidhyutomo.tn15@mesin.pnj.ac.id

occurrence and detection. The highest RPN value is then analyzed using the RCFA (root cause failure analysis) approach which is divided into five factors, namely human factor, material factor, mileu (environmental) factor, operating method factor and machine factor. The result is based on FMEA data obtained damage to the fuel nozzle with coating loss damage with a value of RPN 294. Based on RCFA analysis this is caused by the actual and actual suhu values exceeding the standard and the reaction results exceed the fuel nozzle material melting point limit. The high excess suhu will cause overheating and thermal fatigue at the fuel nozzle.

*Kata-kata kunci:* FMEA, RCFA, Combustion Chamber, gas turbine

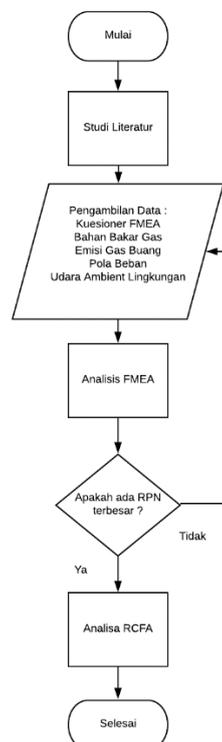
## 1. PENDAHULUAN

Turbin gas aeroderivatif merupakan turbin gas yang diadaptasi langsung dari mesin pesawat. Turbin gas yang terdapat pada PT.X merupakan turbin gas tipe LM6000 yang diadaptasi dari mesin pesawat turboprop CF6-80C2 [1]. Jenis ruang bakar yang digunakan pada turbin gas ini adalah tipe *single annular combustor* dengan bahan bakar natural gas.

Pada operasi turbin gas unit 1 PT X. terjadi kegagalan yaitu kenaikan suhu inlet sudu turbin gas melebihi standar operasi sehingga menimbulkan notifikasi pada control room untuk dilakukan pemeliharaan. Pemeliharaan seperti ini dapat mengurangi waktu operasi pembangkit dan meningkatkan waktu pemeliharaan sehingga produksi pembangkit menurun.

Maka dari itu penulis menganalisa kegagalan pada ruang bakar dengan pendekatan analisa FMEA dan RCFA sehingga menemukan strategi pemeliharaan yang tepat agar dapat mencegah kegagalan yang sama terjadi kembali. Makalah ini bertujuan untuk menentukan komponen ruang bakar yang mengalami kegagalan tertinggi berdasarkan RPN (*Risk Priority Number*) dan menentukan penyebab kegagalan komponen ruang bakar tertinggi dengan pendekatan RCFA (*Root Cause Failure Analysis*)

## 2. METODE



Gambar 1. Diagram alir metode analisis kegagalan combustion chamber

Metode penelitian dilakukan dengan cara studi lapangan, data diperoleh dengan cara pengumpulan data wawancara, kuisisioner, data operasi turbin gas 1, data komposisi gas bahan bakar PLTG unit 1, data komposisi

gas buangan PLTG unit 1 dan komposisi udara ambient PLTGU PT X.. Kuisisioner dan wawancara untuk menentukan standar tingkat keseriusan kerusakan (severity), frekuensi kejadian (occurrence), dan deteksi kejadian (detection) yang sesuai dengan teori FMEA pada sebuah objek masalah. Komponen yang memiliki nilai RPN tertinggi berdasarkan data laporan FMEA. Data yang akan dijadikan untuk RCFA akan dilakukan dengan metode Ishikawa Diagram atau dikenal dengan Fishbone Diagram. Pada RCFA kerusakan tersebut akan dianalisis akar penyebab dari suatu kerusakan dengan menggunakan alur fishbone diagram melalui faktor-faktor dari faktor manusia, faktor bahan, faktor lingkungan, faktor mesin dan faktor metode. Dari kegiatan tersebut akan diketahui apa penyebab utama terjadi kerusakan.

### **FMEA (Failure Mode Effect Analysis)**

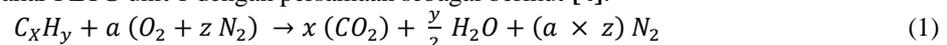
FMEA merupakan metode sistematis untuk menemukan cara suatu proses mungkin mengalami gagal untuk mencapai suatu tujuan dan pengaruh kegagalan tersebut pada performa sistem, atau proses, atau lingkungan. FMEA merupakan proses penalaran, juga disebut pemrosesan bottom – up atau analisis induktif. FMEA memiliki tujuan khusus yaitu membantu mendefinisikan, mengidentifikasi dan memprioritaskan kerusakan dengan rencana tindakan yang ditetapkan sehingga dapat meminimalkan resiko kerusakan yang terjadi [2].

### **RCFA (Root Cause Failure Analysis)**

RCFA adalah urutan logis dari langkah-langkah mengidentifikasi suatu komponen melalui proses pengumpulan fakta-fakta seputar suatu peristiwa atau kegagalan. Setelah masalah telah sepenuhnya didefinisikan, analisa secara sistematis menentukan tindakan terbaik yang akan diselesaikan dan pastikan itu tidak diulang. Langkah pertama dalam proses ini adalah mendapatkan definisi yang jelas tentang masalah potensial atau peristiwa kegagalan terjadi [3]. Peristiwa kegagalan kemudian dianalisa dari segi dari faktor manusia, faktor bahan, faktor lingkungan, faktor mesin dan faktor metode.

Faktor manusia merupakan analisa penyebab kegagalan berdasarkan perilaku pemeliharaan suatu peralatan yang mengalami kegagalan. Faktor manusia diperoleh dari jadwal kegiatan pemeliharaan ruang bakar turbin gas yang dilaksanakan PT X.

Faktor bahan merupakan analisa penyebab kegagalan berdasarkan kandungan bahan suatu peralatan dan bahan bakar peralatan yang mengalami kegagalan. Faktor bahan bakar diperoleh dari kandungan bahan komponen ruang bakar turbin gas dengan nilai RPN tertinggi dan perhitungan kandungan bahan bakar gas. Perhitungan kandungan bahan bakar gas menggunakan stokiometri pembakaran berdasarkan data komposisi gas bahan bakar PLTG unit 1 dengan persamaan sebagai berikut [4]:



Faktor lingkungan merupakan analisa penyebab kegagalan berdasarkan keadaan lingkungan suatu peralatan yang mengalami kegagalan. Faktor lingkungan diperoleh dari data pengujian udara lingkungan PT X. sebagai udara yang digunakan untuk reaksi pembakaran pada turbin gas.

Faktor mesin merupakan analisa penyebab kegagalan berdasarkan kondisi awal peralatan yang mengalami kegagalan. Faktor mesin diperoleh dari bagaimana data inlet turbin gas diperoleh.

Faktor metode merupakan analisa penyebab kegagalan berdasarkan pola operasi peralatan yang mengalami kegagalan. Faktor metode diperoleh dari pola operasi turbin gas PT X. pada akhir bulan januari tahun 2019 dan tahun 2018.

## **3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Hasil Analisa Failure Mode Effect and Analysis (FMEA)**

Tabel 1. Hasil perhitungan RPN berdasarkan kuesioner komponen combustion chamber

No	Komponen	Bentuk Kerusakan	Severity	Occurrence	Detection	RPN
1	Fuel nozzle	Crack	3	6	2	36
2	Fuel nozzle	Carbon Deposit	3	5	4	60
3	Fuel nozzle	Coating Loss	7	6	7	294
4	Gas filter	Kotor	4	3	3	36
5	Sensor T48	Out Of Resistance	3	5	5	75
6	Sensor T48	Crack	6	6	3	108
7	Transmitter	Error	3	5	4	60

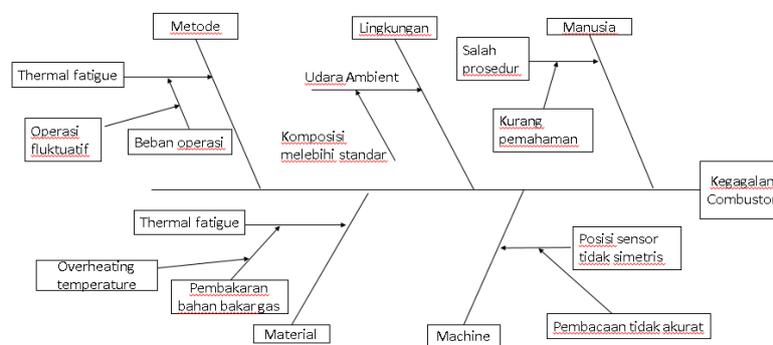
Tabel 1 menampilkan hasil perhitungan RPN (*Risk Priority Number*) berdasarkan hasil kuesioner komponen combustion chamber berdasarkan 11 responden yang terdiri dari 6 teknisi mekanik dan 5 teknisi instrumentasi karyawan PT.X. Responden dipilih berdasarkan indikasi kegagalan turbin gas dilihat dari faktor kegagalan komponen yang dilakukan pemeliharaan oleh bagian mekanik dan faktor kegagalan pembacaan inlet turbin gas yang dilakukan pemeliharaan oleh bagian instrumentasi. Diketahui bahwa komponen fuel nozzle mengalami coating loss dengan nilai RPN paling tinggi sebesar 294. Hal tersebut menandakan bahwa komponen tersebut memiliki potensi kerusakan tinggi terhadap sistem combustion chamber unit PLTG. Efek kerusakan yang diberikan yaitu base material yang dapat terjadi pemanasan sehingga proses pembakaran tidak sempurna dan mengakibatkan terjadinya crack sehingga aliran bahan bakar tidak sesuai kebutuhan. Komponen yang memiliki kerusakan coating loss, efek kerusakan yang diberikan yaitu dapat merusak lapisan permukaan dan apabila terjadi terus-menerus akan merusak base material. Coating loss juga disebabkan melalui aliran gas pembakaran menabrak dinding-dinding komponen sehingga mengalami erosi corrosion saat keadaan high suhu oxidation. Rekomendasi tindakan yang dilakukan merupakan hasil brainstorming dari anggota teknisi mekanik dengan mempertimbangkan teori dan pengalaman terhadap bentuk kerusakan, efek kerusakan, penyebab kerusakan dan tindakan yang dilakukan saat ini. Berikut Worksheet FMEA pada kegagalan combustion chamber.

Tabel 2. WorkSheet FMEA

Nama Komponen	Bentuk Kerusakan	Efek Kerusakan	S	Sebab Kerusakan	O	Pengendalian Kerusakan	D	RPN
Fuel Nozzle	Crack	Proses aliran bahan bakar dan udara terganggu	3	Base material mengalami proses hot corrosion sehingga terjadi fatigue pada material	6	Pemeriksaan kondisi fuel nozzle saat semi annual inspection	2	36
Fuel Nozzle	Carbon deposit	Flow bahan bakar menurun, suhu pembakaran menurun	3	Sisa pembakaran karbon, kualitas gas buruk	5	Pemeriksaan kondisi fuel nozzle saat semi annual inspection	4	60
Fuel Nozzle	Coating Loss	Dapat merusak material inti	7	Aliran gas pembakaran menabrak dinding-dinding komponen	6	Pemeriksaan kondisi fuel nozzle saat semi annual inspection	7	294
Gas Filter	Kotor	Flow bahan bakar turun	4	Kualitas gas buruk, gas treatment bermasalah	3	Pemeriksaan gas treatment seperti	3	36

						coaleshing filter, gas cooler		
Sensor T48	Out Of Resistance	Pembacaan sensor pembakaran tidak akurat	3	Kegagalan isolasi atau sobek pada kabel termokopel yang memungkinkan korsleting atau ground	5	Pemeriksaan kondisi sensor T48 saat semi annual inspection	5	75
Sensor T48	Crack	Inti thermocouple dapat meleleh dan T48 tidak berfungsi	6	Pemasangan thermocouple tidak mengikuti manual book	6	Pemeriksaan kondisi sensor T48 saat semi annual inspection	3	108
Kabel Transmitter	Error	Tidak ada pembacaan T48	3	Harness kabel longgar, sehingga kabel mengenai hot part turbin gas, serat kabel putus	5	Kalibrasi, pemeriksaan kabel transmitter saat semi annual inspection	4	60

### Hasil Analisa Root Cause Failure Analysis (RCFA)



Gambar 2. Diagram Ishikawa kegagalan combustion chamber

Berdasarkan hasil worksheet FMEA tabel 2., kerusakan komponen fuel nozzle dengan kerusakan coating loss memiliki nilai RPN tertinggi dari 4 komponen sehingga komponen tersebut harus diketahui penyebab kerusakannya. Penyebab kerusakan fuel nozzle dilakukan dengan metode RCFA. Penyebab kerusakan akan dilakukan meliputi 5 faktor. Hasil kerusakan pada fuel nozzle dapat dilihat pada gambar berikut:



Coating loss on fuel nozzle

Gambar 3. Kegagalan pada Fuel Nozzle

Berdasarkan gambar 2. diagram Ishikawa kegagalan combustion chamber, diketahui bahwa terdapat kemungkinan potensi yang menyebabkan coating loss pada fuel nozzle yang ditunjukkan pada gambar 3. Potensi tersebut didapatkan berdasarkan hasil diskusi teknisi mekanik PT. X yang disesuaikan dengan pendekatan teori RCFA. Potensi penyebab kerusakan tersebut akan dianalisis secara bertahap lebih lanjut dari setiap faktornya sehingga akan menemukan penyebab utama *coating loss* pada fuel nozzle.

### Faktor Mesin

Pembacaan sensor T48 mewakili suhu pembakaran 4-5 fuel nozzle, ketika salah satu sensor mengalami penurunan suhu yang signifikan, maka dilakukan pengamatan pada satu dari 4-5 fuel nozzle di area T48 yang mengalami penurunan suhu pembakaran. Kemudian fuel nozzle yang mengalami penurunan suhu kemudian ditukar posisi dengan fuel nozzle yang mengalami kenaikan suhu di area T48 yang lain sehingga grafik kinerja suhu pembakaran masih di bawah batas operasi. Fuel Nozzle yang mengalami kondisi kerusakan akan dilakukan penggantian dengan fuel nozzle yang tersedia di warehouse. Notifikasi pembacaan suhu tinggi diperoleh dari perbedaan suhu antara pembacaan T48 tertinggi dan pembacaan T48 terendah yang melebihi standar operasi yaitu 125°C.

### Faktor Manusia

Faktor manusia merupakan salah satu penyebab terjadinya kecelakaan kerja akibat perilaku diri sendiri. Dampak kecelakaan kerja pun tidak dapat dihindari selama proses pekerjaan dan dampak tersebut dapat mengakibatkan pada diri sendiri maupun pada komponen fuel nozzle. Indikasi penyebab kerusakan komponen pada faktor kesalahan manusia seperti penggunaan tools yang salah, pengukuran yang diambil tidak akurat, tidak memiliki sertifikat kompeten dalam bidangnya dan pegawai mengalami kelelahan.

Setiap teknisi memiliki WO (work order) sebelum melakukan pekerjaan dan dilengkapi dengan dokumen standar operasional prosedur (SOP), dokumen safety permit work, pemakaian APD lengkap dan safety briefing. Setiap penggunaan peralatan selalu dicek atau dikalibrasi untuk pengukuran telah sesuai dengan list tools inspeksi. Pekerjaan inspeksi dilakukan selama 7 jam termasuk 2 x jam istirahat setiap harinya sehingga asumsi kelelahan pada teknisi dapat dihindari. Pemeliharaan combustor dilakukan pada semi annual maintenance, *Hot Section Repair* setiap 12.500 jam operasi dan *Boroscope test* setiap 4000 jam operasi untuk melihat kondisi dalam combustor secara langsung. *Boroscope test* dilakukan oleh pihak ketiga dengan bantuan teknisi PT X.

### Faktor Lingkungan (Mileu)

Tabel 3. Komposisi udara ambient PLTGU PT X.

Kualitas Komposisi Udara Ambient PLTGU PT.X				
No	Parameter	Satuan	Ambang batas	Hasil
1	Nitrogen Dioksida (NO <sub>2</sub> )	µg/Nm <sup>3</sup>	400	<35
2	TSP (Debu)	µg/Nm <sup>4</sup>	230	<5

3	Timbal (Pb)	$\mu\text{g}/\text{Nm}^5$	2	0.06
4	Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> )	$\mu\text{g}/\text{Nm}^6$	900	39,68
5	Oksidan (O <sub>3</sub> )	$\mu\text{g}/\text{Nm}^7$	200	43,76
6	Hidrokarbon (HC)	$\mu\text{g}/\text{Nm}^8$	160	131
7	Karbon Monoksida (CO)	$\mu\text{g}/\text{Nm}^9$	24000	5.579
8	PM10 (partikel <10 micro)	$\mu\text{g}/\text{Nm}^{10}$	150	86
9	PM10 (partikel <2.5 micro)	$\mu\text{g}/\text{Nm}^{11}$	65	43
10	Suhu	$^{\circ}\text{C}$	15	34
11	Kelembaban	%	60	63

Komposisi udara ambient PLTGU PT.X diperoleh berdasarkan pengujian lab pihak ketiga PT X. Berdasarkan tabel 3 diketahui bahwa udara ambient yang digunakan untuk proses produksi PLTG masih tetap didalam standar PERMENAKER No. 05 Tahun 2018 . Komposisi udara akan mempengaruhi kinerja dari kompressor. Semakin bagus komposisi udara maka semakin baik kinerja kompressor dan partikel yang masuk juga akan lebih sedikit sehingga proses difusi pada fuel nozzle akan lebih baik dan komponen tidak mengalami erosi dari partikel udara yang bergesekan dengan material komponen. Namun diluar parameter udara ambient terdapat faktor suhu dan kelembaban yang melebihi dari standarnya yaitu ketetapan ISO 2314. Semakin tinggi suhu udara ambient dan kelembaban masuk kompressor maka semakin tinggi juga suhu udara hasil kompresi yang akan masuk fuel nozzle dan ketika terjadi proses pembakaran maka semakin tinggi juga suhu pembakaran yang terjadi didalamnya [5] . Jadi faktor udara ambient dalam hal komposisi suhu dan kelembaban sebagai salah satu penyebab kerusakan fuel nozzle karena melebihi standar ISO 2314 yang dapat mempengaruhi suhu pembakaran .

#### Faktor Bahan (Kandungan bahan Fuel Nozzle dan Komposisi Bahan Bakar)

Material yang digunakan pada combustor basket yaitu jenis paduan *Hastelloy X*. *Hastelloy X* adalah bahan material campuran dari nikel, crom, ferum, molybdenum dan cobalt yang melapisi permukaan fuel nozzle. Material *Hastelloy X*. *Hastelloy X* memiliki kandungan logam nikel yang sifatnya memiliki kekuatan terhadap suhu titik lebur hingga 1400 $^{\circ}\text{C}$ . Jenis material tersebut juga memiliki ketahanan korosi yang baik. Secara umum, *Hastelloy X* sudah banyak diaplikasikan pada mesin jet, turbin gas dan furnace. Jadi pada penelitian ini kesalahan penggunaan material tidak dapat terbukti karena material tersebut sudah memiliki spesifikasi yang cocok dan sudah diuji oleh pihak manufaktur.

Bahan bakar yang digunakan pada turbin gas umumnya adalah gas alam. Komposisi gas alam memengaruhi kesempurnaan pembakaran. Proses pembakaran akan terlihat dari reaksi pembakaran dan suhu pada fuel nozzle. Berikut komposisi bahan bakar gas alam yang digunakan dan proses pembakaran pada operasi turbin gas.

Tabel 4 Komposisi bahan bakar gas

Komponen	Simbol	Persentase mol
Nitrogen	N <sub>2</sub>	2.67
Karbodioksida	CO <sub>2</sub>	4.98
Metana	CH <sub>4</sub>	85.25
Etana	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.51
Propana	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.47
I- Butana	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.55
N-Butana	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.7
I-Pentana	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.26
N-Pentana	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.18
Hexana Plus	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.43

Komposisi bahan bakar gas alam diperoleh dari pengujian kandungan gas alam oleh lab pihak ketiga PT X. Berdasarkan tabel 4. bahan bakar gas alam memiliki banyak kandungan senyawa namun yang paling tinggi

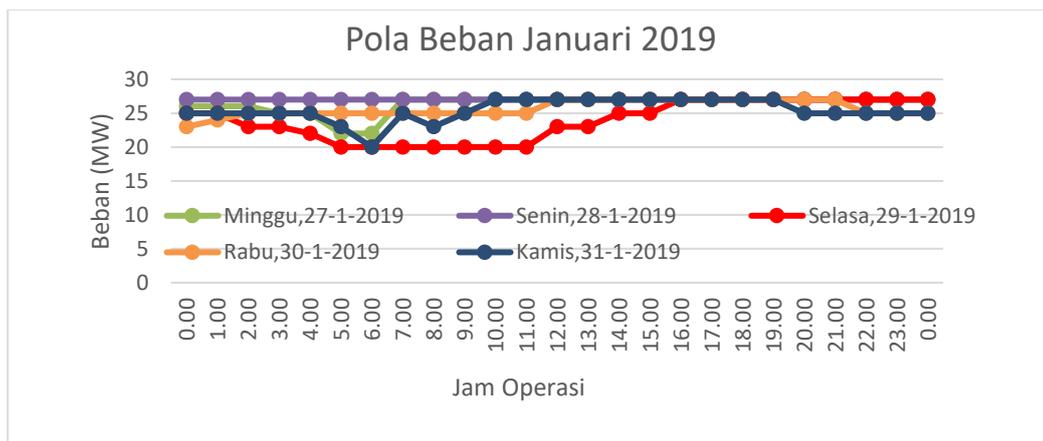
yaitu gas metana sehingga perhitungan pada penelitian ini akan menggunakan komposisi gas metana, gas etana, gas propane, dan gas butane sedangkan gas lainnya diabaikan karena komposisi yang rendah.

Tabel 5 Kalor pembakaran gas

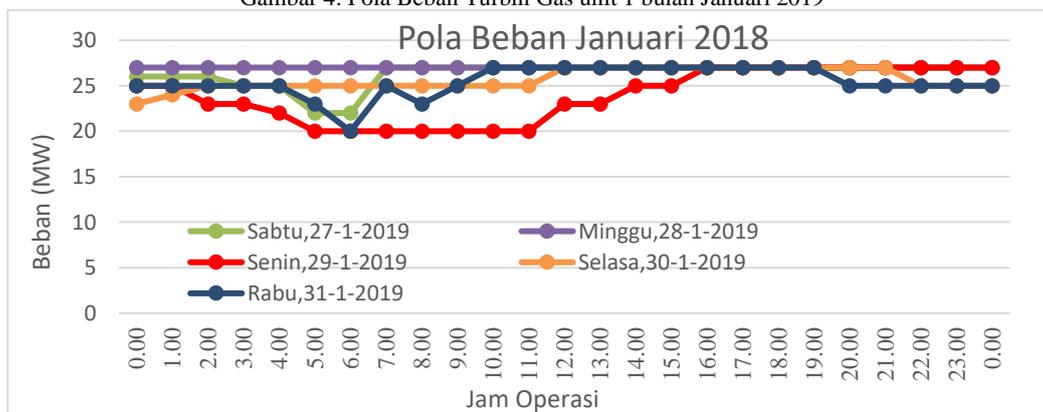
Komponen	Simbol	Persentase Mol (%)	Kalor Pembakaran KJ/Mol
Metana	CH <sub>4</sub>	85.25	802
Etana	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.51	1561
Propana	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.47	2220
Butana	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.25	2878

Diperoleh jumlah perhitungan kalor total pembakaran pada gas metana, gas etana, gas propane dan gas butane sebesar 813,695 KJ dengan kebutuhan oksigen pada reaksi pembakaran sebesar 0,0664 Kg menghasilkan karbondioksida pada reaksi pembakaran sebesar 0,0474 Kg dan uap air sebesar 0,03615 Kg dengan suhu pembakaran sebesar 1663,5 °C. Proses pembakaran tersebut dapat memicu timbulnya overheating pada area combustor dan fuel nozzle. Overheating akan menimbulkan korosif pada permukaan. Jika proses terus berlanjut dengan suhu tinggi dan terjadinya aliran turbulensi tinggi didalamnya akan menimbulkan erosi material yaitu pengikisan lapisan permukaan atau bisa disebut dengan coating loss. Selain itu coating loss dapat menyebabkan cracking melalui proses thermal fatigue.

#### Faktor Method (Pola Beban)



Gambar 4. Pola Beban Turbin Gas unit 1 bulan Januari 2019



Gambar 5. Pola Beban Turbin Gas unit 1 bulan Januari 2018

Berdasarkan gambar 4 dan gambar 5 pola beban yang dihasilkan berfluktuatif tiap jamnya. Pola beban berubah-ubah mempengaruhi kinerja difusi fuel nozzle. Pembakaran pada beban tinggi akan menghasilkan suhu pembakaran tinggi juga dan sebaliknya pembakaran pada beban rendah akan menghasilkan suhu yang

rendah [6]. Hal tersebut menunjukkan bahwa suhu yang terjadi didalam ruang bakar mengalami fluktuatif dan dapat mengakibatkan thermal fatigue pada materialnya.

## 5. KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil analisis metode FMEA jenis kerusakan pada combustion chamber yang memiliki RPN tertinggi 294 adalah fuel nozzle dengan bentuk kerusakan coating loss. Coating loss pada komponen tersebut mengakibatkan pemanasan pembakaran pada base material fuel nozzle sehingga menyebabkan crack pada komponen fuel nozzle pada dinding material yang disebabkan oleh hot corrosion sehingga menimbulkan thermal fatigue pada material.
2. Berdasarkan hasil analisis metode RCFA penyebab coating loss pada fuel nozzle adalah :
  - Berdasarkan faktor mesin, area pembacaan sensor T48 yang tidak simetris untuk fuel nozzle menyebabkan kondisi fuel nozzle yang sulit diprediksi
  - Berdasarkan faktor manusia, pengecekan kondisi dalam combustor turbin gas tidak mudah dilakukan karena *boroscope test* dilakukan oleh pihak ketiga dan dilaksanakan berdasarkan jam operasi, sehingga pemeliharaan combustor turbin gas yang dilakukan ketika terjadi kegagalan hanya *corrective maintenance*.
  - Berdasarkan faktor lingkungan, nilai suhu aktual (34°C) dan kelembaban aktual (65%) udara ambient melebihi standar suhu (15°C) dan kelembaban (60%) berdasarkan ISO 2314.
  - Berdasarkan faktor bahan, diperoleh perhitungan reaksi suhu nyala api pembakaran mencapai 1663,5 °C melebihi batas titik lebur bahan fuel nozzle yaitu 1400 °C. Tingginya suhu yang berlebih akan menyebabkan overheating dan thermal fatigue pada fuel nozzle.
  - Berdasarkan faktor metode, pola beban yang berfluktuatif memengaruhi suhu pada ruang bakar sehingga mengakibatkan thermal fatigue pada material fuel nozzle.

## REFERENSI

1. G. Electric, "GE Aeroderivative Gas Turbines - Design and Operating Features," ed, 2013.
2. R. Snee, "Failure Modes and Effects Analysis," *Research Gate*, 2016.
3. D. L. Ransom, "A Practical Guideline for A Successful Root Cause Failure Analysis," Turbomachinery Symposium, pp. 151-156, 2007.
4. Taufiq, "Perbandingan Suhu Ring Stainless Steel dan Suhu Ring Keramik pada Fenomena *Flame Lift-Up*". Universitas Indonesia, Depok, 2008.
5. M. Hizbullah, "Kajian Sistem Pendinginan Udara Masuk Turbin Gas Untuk Meningkatkan Daya Output Turbin Gas Ptg Gilimanuk Yang Beroperasi Pada Waktu Beban Puncak". Universitas Indonesia, Depok, 2014.
6. Rahman, "Thermodynamic Performance Analysis of Gas-Turbine Power-Plant," *International Journal of the Physical Sciences*, vol. 6, pp. 3539-3550, Universiti Malaysia Pahang, Malaysia, 2011.