

Analisis Penyebab Flame-Out Pada Sistem Pembakaran Turbin Gas Dry Low Emission Menggunakan Metode Root Cause Analysis (RCA)

Faizi Nabil Mustafavi¹, Pribadi Mumpuni Adhi^{2*}, dan Cecep Slamet Abadi¹

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

²Program Studi Magister Terapan Rekayasa Teknologi Manufaktur Pascasarjana Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425.

*Corresponding author E-mail address: pribadi.adhi@mesin.pnj.ac.id

Abstrak

Penelitian ini dilatar belakangi terjadinya flame-out pada turbin gas Dry Low Emission dengan tipe GPB-80D di PT.X yang menyebabkan flame-out atau padamnya api pada combustion dan berakhir trip pada turbin yang mengganggu operasional. Tujuan penelitian ini mencakup apa saja penyebab flameout, akar penyebab masalah terjadinya flame-out, dan bagaimana mengevaluasi agar tidak terjadinya flame-out secara berulang yang dapat mengganggu operasional. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Root Cause Analysis menggunakan Fishbone diagram untuk memetakan faktor machine dan material. Setelah di petakan faktor-faktor itu di temukan beberapa penyebab masalah yaitu kerusakan pada combustor liner, nozzle bahan bakar tersumbat dan terdapat oli di bahan-bakar. Lalu dilakukan 5 whys untuk mencari akar penyebab masalah dengan menanyakan mengapa secara berulang. Hasil analisis menunjukan akar penyebab masalah ada pada oil separator yang digunakan kurang efektif memisahkan gas dengan oli yang menyebabkan oli terbawa (carry over), kesimpulan dan saran nya mengganti oil separator dengan kualitas dan material yang lebih tinggi, pembersihan nozzle dengan ultrasonic, dan mengganti combustor liner untuk mencegah terjadinya flame-out secara berulang dalam waktu singkat.

Kata-kata kunci: Oil separator, Fisbone Diagram, 5 Whys, Flame-out

Abstract

This research is based on the occurrence of flame-out in Dry Low Emission gas turbines of the GPB-80D type at PT.X, which causes flame extinguishment in the combustion process and trips the turbine, disrupting operation. The purpose of this research is to identify the causes of flame-out, determine the root cause of the flame-out problem, and evaluate methods to prevent flame-out from recurring, which can disrupt operations. The method used in this research is Root Cause Analysis using a Fishbone diagram to map machine and material factors. After mapping the factors, several causes of the problem were found, namely damage to the combustor liner, clogged fuel nozzle and oil in the fuel. Then 5 whys were conducted to identify the problem's root cause by repeatedly asking 'why'. The analysis showed that the root cause was the oil separator, which was less effective at separating gas from oil, leading to oil being carried over. The conclusion and suggestion were to replace the oil separator with higher-quality materials, clean the nozzle ultrasonically and replace the combustor liner to prevent a recurrence of flame-out in the near future.

Keywords: Oil separator, Fisbone Diagram, 5 Whys, Flame-out

1. PENDAHULUAN

Gas turbine merupakan salah satu mesin utama yang digunakan dalam pembangkit listrik dan industri untuk menghasilkan energi mekanik maupun listrik. Kinerja sistem ini sangat dipengaruhi oleh proses pembakaran yang berperan dalam menentukan efisiensi, emisi, dan keandalan operasi. Seiring dengan meningkatnya tuntutan pengurangan emisi, khususnya nitrogen oksida (NO_x), teknologi Dry Low Emission (DLE) banyak digunakan pada gas turbine modern melalui penerapan lean premixed combustion. Teknologi ini menurunkan temperatur pembakaran dengan mencampurkan bahan bakar dan udara secara homogen sebelum proses pembakaran, sehingga emisi dapat ditekan secara signifikan[1].

Namun, penerapan sistem lean burn pada DLE memiliki konsekuensi berupa berkurangnya margin kestabilan pembakaran. Operasi pada kondisi sangat lean menyebabkan flame berada dekat dengan batas Lean Blow-Out (LBO), sehingga lebih rentan mengalami flame-out atau pemadaman api secara tiba-tiba. Kondisi ini dapat dipicu oleh berbagai faktor seperti fluktuasi rasio udara–bahan bakar, perubahan beban, osilasi tekanan, serta fenomena auto-ignition dan flashback yang mengganggu stabilitas pembakaran. Ketika flame-out terjadi, sistem proteksi turbin gas akan melakukan trip untuk mencegah kerusakan lebih lanjut[2] (Faqih et al., 2022).

Kejadian flame-out memberikan dampak signifikan terhadap reliability dan availability gas turbine, termasuk penurunan produksi daya, peningkatan downtime, serta kenaikan biaya pemeliharaan. Dalam konteks pembangkit listrik, kondisi ini menjadi isu operasional yang krusial karena dapat mengganggu kontinuitas suplai energi. Oleh karena itu, diperlukan analisis mendalam untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab flame-out agar dapat dirumuskan strategi mitigasi yang tepat[3].

Berbagai penelitian telah dilakukan terkait kestabilan pembakaran pada sistem lean premixed combustion. menunjukkan bahwa kestabilan flame dipengaruhi oleh parameter global seperti kondisi aliran dan karakteristik nyala api[4]. Selain itu, Escalpez et al. (2017) menemukan bahwa komposisi bahan bakar berpengaruh terhadap batas LBO[5], sementara peneliti sebelumnya juga menekankan peran desain premixer dalam menjaga kestabilan pembakaran pada sistem DLE[6]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa teknologi low-emission combustion meningkatkan tantangan stabilitas operasi[7], serta kondisi tekanan dan temperatur yang berpengaruh terhadap kestabilan reaksi pembakaran [8].

Selain studi kestabilan pembakaran, penelitian terkait analisis kegagalan turbin gas juga telah banyak dilakukan menggunakan metode Fault Tree Analysis (FTA) menemukan bahwa flame failure merupakan salah satu penyebab dominan terjadinya trip turbin gas[9]. Peneliti sebelumnya menunjukkan bahwa penyimpangan parameter operasi dan distribusi bahan bakar dapat memicu kegagalan pembakaran menjelaskan bahwa kontrol temperatur yang tidak optimal dapat meningkatkan risiko gangguan pembakaran[10].

Meskipun berbagai penelitian telah membahas fenomena LBO, kestabilan pembakaran, serta analisis kegagalan pada turbin gas, kajian yang secara spesifik mengidentifikasi akar penyebab flame-out pada sistem Dry Low Emission (DLE) masih terbatas, khususnya dengan pendekatan Root Cause Analysis (RCA) yang mengintegrasikan fishbone diagram dan metode 5 Whys. Selain itu, perbedaan kondisi operasional dan objek penelitian menunjukkan bahwa studi lebih lanjut masih diperlukan untuk memahami penyebab aktual flame-out pada sistem DLE di lapangan.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor-faktor penyebab terjadinya flame-out pada gas turbine Dry Low Emission (DLE) serta mengidentifikasi akar penyebab utamanya menggunakan pendekatan Root Cause Analysis (RCA). Selanjutnya, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan rekomendasi perbaikan yang aplikatif untuk mengurangi kejadian trip dan meningkatkan keandalan operasi gas turbine.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian kualitatif deskriptif, yaitu pendekatan penelitian yang bertujuan untuk memahami dan menggambarkan secara sistematis suatu fenomena berdasarkan data faktual yang diperoleh dari kondisi nyata di lapangan. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada analisis penyebab terjadinya flame-out pada turbin gas Dry Low Emission (DLE), sehingga diperlukan pemahaman mendalam terhadap kronologi kejadian, parameter operasi, serta keterkaitan antar faktor teknis dan operasional yang memengaruhi sistem. Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data historis gangguan, laporan operasi, yang kemudian dianalisis secara deskriptif untuk mengidentifikasi pola dan hubungan sebab–akibat. Dalam proses analisis, penelitian ini menerapkan metode Root Cause Analysis (RCA) sebagai kerangka utama untuk menelusuri akar penyebab permasalahan secara sistematis dan terstruktur.

Metode pengambilan sample yang di lakukan adalah purposive sampling dimana mengambil sample yang relavan sesuai kebutuhan penelitian sample yang di ambil adalah alarm terjadinya *flame-out*, dokumentasi penemuan kerusakan, tindakan perbaikan dan wawancara.

Untuk teknik analisis data yang di lakukan adalah mengidentifikasi kerusakan, lalu akan di kelompokkan menjadi diagram fishbone (*ishikawa*) dan di lakukan 5whys dengan menanyakan mengapa sampai menghasilkan jawaban yang sama. Setelah di lakukan 5whys menemukan jawaban yang sama maka akan memverifikasi penyebab nya dengan melihat alarm *flame-out* tidak terjadi lagi.

Objek Penelitian

Objek penelitian ini dilaksanakan pada turbin gas Kawasaki GPB-80D dan beroperasi di PT. X sebagai salah satu unit pembangkit tenaga gas. Fokus penelitian diarahkan pada bagian sistem combustion, khususnya pada komponen dan parameter yang berkaitan langsung dengan proses pembakaran pada teknologi Dry Low Emission (DLE). Pemilihan objek ini didasarkan pada adanya kejadian *flame-out* yang berdampak pada trip turbin, sehingga diperlukan analisis mendalam, distribusi bahan bakar, suplai udara pembakaran, serta sistem kontrol yang memengaruhi kestabilan nyala api. Dengan memusatkan perhatian pada sistem combustion, penelitian ini bertujuan untuk memahami mekanisme terjadinya gangguan pembakaran secara lebih spesifik dan terarah, sehingga proses identifikasi akar penyebab menggunakan metode Root Cause Analysis (RCA) dapat dilakukan secara lebih efektif dan relevan terhadap kondisi operasional turbin gas tersebut.

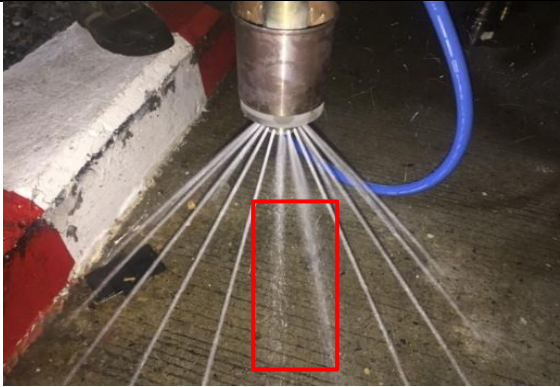


Gambar 1 .Turbin Gas Dry Low Emission

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Temuan Kerusakan

Tabel 1. Temuan Kerusakan

No	Gambar	Keterangan
1	 Gambar 2. Kerusakan Nozzle	Berdasarkan hasil inspeksi, pada bagian gambar yang telah di beri kotak merah ditemukan kondisi dimana spray nozzle tidak rata pada bagian tertentu yang membuat pembakaran tidak stabil. Temuan kerusakan diperoleh melalui pemeriksaan komponen utama pada gas turbin saat di lakukan maintenance. Dari hasil pemeriksaan tersebut, ditemukan adanya penyumbatan pada nozzle bahan bakar yang menyebabkan aliran bahan bakar menuju ruang bakar menjadi tidak optimal.

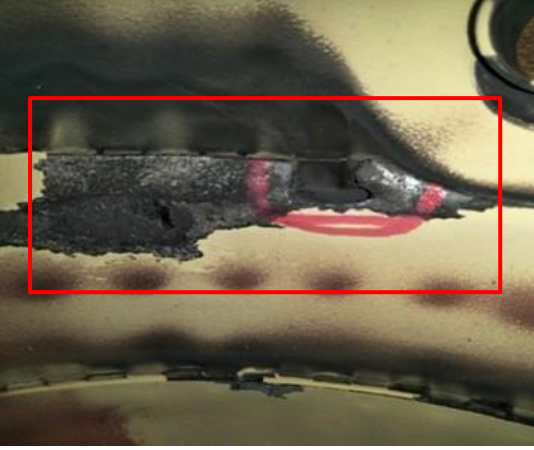
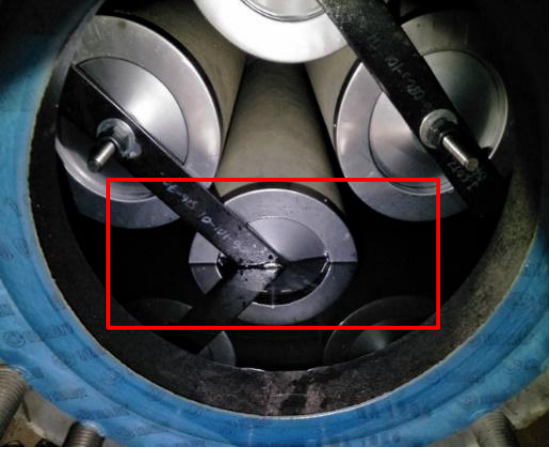
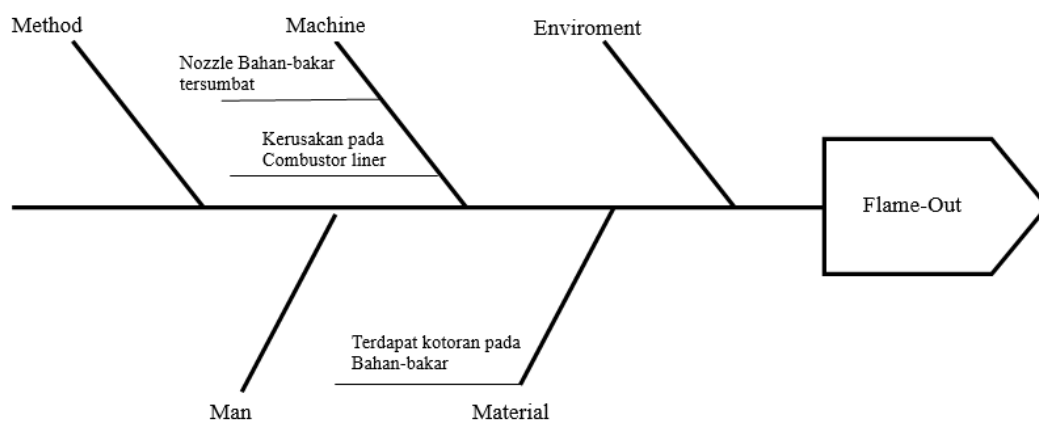
2	 Gambar 3 . Kerusakan combustor liner	Selain penyumbatan nozzle, ditemukan juga indikasi kerusakan pada bagian <i>combustor liner</i>. Seperti gambar kerusakan tersebut terlihat dari adanya korosi permukaan komponen akibat temperatur tinggi selama proses pembakaran berlangsung. Kondisi <i>combustor liner</i> yang mengalami korosi dapat mempengaruhi kestabilan nyala api di dalam ruang bakar dan meningkatkan risiko terjadinya gangguan pembakaran.
3	 Gambar 4. Coalescer tank	Ditemukan banyak oli berlebih pada coalescer tank. Hal ini menjadi indikasi bahwa terdapat kegagalan sistem pemisah oli atau oil separator.

Diagram Fishbone



Gambar 5 Fishbone Diagram

Berdasarkan diagram, faktor penyebab utama dibagi menjadi dua kategori, yaitu faktor *machine* dan *material*. Pada aspek *machine*, ditemukan adanya nozzle bahan bakar yang tersumbat. Kondisi ini dapat menghambat aliran bahan bakar menuju ruang pembakaran sehingga campuran udara dan bahan bakar menjadi tidak optimal. Akibatnya, proses pembakaran menjadi tidak stabil dan berpotensi menyebabkan api padam saat mesin beroperasi. Selain itu, terdapat kerusakan pada *combustor liner* yang juga menjadi penyebab penting. Kerusakan pada komponen ini dapat mengganggu kestabilan temperatur dan distribusi aliran udara di dalam ruang bakar, sehingga efisiensi pembakaran menurun dan risiko *flame-out* meningkat.

Sementara itu, pada aspek *material*, penyebab yang diidentifikasi adalah adanya kontaminasi pada bahan bakar. Kontaminasi bahan bakar oleh oli dapat mengurangi kualitas pembakaran dan memicu penyumbatan pada sistem bahan bakar. Oli tersebut juga dapat mengganggu proses atomisasi bahan bakar sehingga pembakaran tidak berlangsung sempurna. Jika kondisi ini terjadi secara terus-menerus, maka nyala api di ruang bakar menjadi tidak stabil dan akhirnya menyebabkan *flame-out*.

Tabel 5 Whys

Melalui pendekatan ini, peneliti tidak hanya berhenti pada penyebab yang bersifat permukaan, tetapi dapat mengidentifikasi faktor mendasar yang memicu terjadinya masalah. Hasil akhir dari tabel ini berupa root cause yang menjadi dasar dalam penentuan tindakan perbaikan. Dengan demikian, tabel 5 Whys membantu menyederhanakan proses analisis masalah yang kompleks menjadi lebih sistematis, terstruktur, dan mudah dipahami dalam konteks penelitian.

Tabel 5Whys Nozzle Bahan-bakar Tersumbat

Berdasarkan tabel 2. , diketahui bahwa penyumbatan pada nozzle diawali oleh adanya penyumbatan pada permukaan nozzle. Kondisi ini kemudian ditelusuri lebih lanjut yang menunjukkan bahwa kontaminasi tersebut berasal dari oli gas compressor yang terbawa.

Tabel 2. Tabel Bahan-bakar Tersumbat

Masalah	Nozzle Bahan-bakar tersumbat (Machine)	
	Pertanyaan	Jawaban
Why 1	Kenapa nozzle bahan-bakar bisa tersumbat?	Karena nozzle gas terkontaminasi dengan oli
Why 2	Kenapa terkontaminasi dengan oli?	Oli berasal dari gas compressor
Why 3	Kenapa berasal dari gas compressor?	Karena oli terbawa aliran gas
Why 4	Kenapa oli bisa terbawa ke aliran gas?	Karena oil separator stage 1 tidak bekerja dengan sempurna dan tidak efektif dalam memisahkan gas dengan oli
Why 5	Kenapa oil separator tidak efektif dalam memisahkan gas dengan oli?	Karena ada perbedaan merk oil separator dengan sebelumnya terpasang. Sehingga mempengaruhi efektifitas oil separator

Setelah dilakukan 5whys pada masalah nozzle bahan bakar tersumbat dengan mengulang pertanyaan hasil yang di dapat yaitu karena ada perbedaan merk oil separator dengan sebelumnya yang mempengaruhi efektivitas oil separator.

Tabel 5Whys Kerusakan Pada Combustor Liner

Analisis menggunakan metode 5 Whys untuk mengidentifikasi akar penyebab kerusakan pada combustor liner. Berdasarkan hasil penelusuran, kerusakan diawali oleh kondisi overheating pada ruang bakar yang menyebabkan material liner mengalami penurunan kualitas dan akhirnya mengalami kerusakan.

Tabel 3. Kerusakan combustor liner

Masalah	Kerusakan pada combustor liner (Machine)	
	Pertanyaan	Jawaban
Why 1	Kenapa combustor liner rusak?	Terdapat hot spot pada combustor
Why 2	Kenapa terdapat hot spot pada combustor liner?	Terjadinya pembakaran yang tidak merata
Why 3	Kenapa bisa terjadi pembakaran yang tidak merata?	Karena penyumbatan pada fuel nozzle
Why 4	Kenapa terjadi penyumbatan pada fuel nozzle?	Karena ada oli yang mengendap pada fuel nozzle dan terkena panas sehingga menjadi karbon yang menumpuk
Why 5	Kenapa ada pengendapan oli pada fuel nozzle?	Karena gas terkontaminasi oli?
Why 6	Kenapa gas terkontaminasi oli?	Karena gas yang di supply oleh gas kompressor ke gas turbin banyak mengandung oli
Why 7	Kenapa gas yang di supply oleh gas kompressor banyak mengandung oli?	Karena oil separator stage 1 pada gas kompressor tidak bekerja dengan sempurna dan tidak efektif dalam memisahkan gas dengan oli
Why 8	Kenapa oil separator tidak efektif dalam memisahkan gas dengan oli?	Karena ada perbedaan merk oil separator dengan sebelumnya terpasang. Sehingga mempengaruhi efektifitas oil separator

Analisis menggunakan metode 5 Whys untuk mengidentifikasi akar penyebab kerusakan pada combustor liner. Berdasarkan hasil penelusuran, kerusakan diawali oleh kondisi overheating pada ruang bakar yang menyebabkan material liner mengalami penurunan kualitas dan akhirnya mengalami kerusakan.

Tabel 5Whys Nozzle Bahan-bakar Tekontaminasi

Pada table ini dilakukan analisis menggunakan metode 5 Whys untuk mengetahui akar penyebab bahan bakar yang terkontaminasi oli.

Tabel.4. Tabel Bahan-bakar Terkontaminasi

Masalah	Bahan bakar terkontaminasi (Material)	
	Pertanyaan	Jawaban
Why 1	Kenapa bahan-bakar terkontaminasi?	Karena bahan-bakar di supply oleh gas kompressor yang menggunakan oli sehingga oli terbawa
Why 2	Kenapa oli terbawa?	Oil separator kurang efektif dalam memisahkan gas dengan oli
Why 3	Kenapa oil separator kurang efektif?	Terdapat perbedaan material pada oil separator
Why 4	Kenapa terdapat perbedaan material oil separator?	Merk yang digunakan berbeda dari sebelumnya
Why 5	-	-

Akar Penyebab Masalah

Berdasarkan hasil analisis fishbone dengan bantuan 5 whys akar penyebab masalah terletak di oil separator pada gas compressor yang digunakan berbeda dengan sebelumnya. dimana oil separator yang bermasalah tidak memiliki lapisan luar sehingga kurang efektif memisahkan oli dengan gas yang biasa di sebut *carry over*.



Gambar 6. Oil Separator Baru



Gambar 7. Oil Separator Lama

Pada gambar 6. Oil separator baru memiliki lapisan luar galvanis dengan penyaringan lebih efektif untuk menghindari terjadinya *carry over*, pada Gambar 7. Oil separator lama tidak memiliki lapisan luar sehingga kurang efektif memisahkan oli dan gas.

Konfirmasi Akar Penyebab Masalah

Hasil sesudah perbaikan dengan mengidentifikasi terjadinya flame-out pada 22 Mei 2023 dan 16 Januari 2024 masalah flame-out terjadi secara berulang dengan pola gangguan yang sama. Setelah tindakan perbaikan dilakukan, hasil pemantauan menunjukkan bahwa alarm *flame-out* tidak kembali muncul selama periode pengamatan terbaru demikian alarm ini juga memvalidasi bahwa tindakan perbaikan berhasil mengatasi akar penyebab masalah .

KESIMPULAN

Flame-out pada sistem pembakaran turbin gas Kawasaki tipe GPB-80D dapat terjadi akibat beberapa faktor utama yang saling berkaitan. Salah satunya adalah kerusakan pada *combustor liner*, yaitu bagian ruang bakar yang berfungsi menahan dan mengarahkan proses pembakaran. Jika komponen ini mengalami retak, korosi, atau deformasi, maka kestabilan api bisa terganggu hingga akhirnya padam. Selain itu, penyumbatan pada nozzle bahan bakar juga menjadi penyebab penting. Nozzle yang tersumbat akan menghambat aliran bahan bakar dan mengganggu proses atomisasi, sehingga campuran udara dan bahan bakar tidak terbentuk secara optimal. Akibatnya, pembakaran menjadi tidak sempurna dan api mudah mati. Faktor lainnya adalah kerusakan pada filter oil separator.

Penyebab utama yang menjadi akar masalah terjadinya flame-out adalah penggunaan filter oil separator yang kualitasnya lebih rendah dan tidak sesuai dengan spesifikasi yang digunakan sebelumnya. Perbedaan kualitas ini dapat memengaruhi kemampuan filter dalam menyaring kotoran atau partikel dari sistem pelumasan. Pada akhirnya, gangguan tersebut dapat menyebabkan proses pembakaran menjadi tidak stabil hingga memicu terjadinya flame-out.

Berdasarkan akar permasalahan tersebut, langkah perbaikan yang disarankan adalah mengganti filter oil separator dengan produk yang memiliki kualitas lebih baik atau minimal setara dengan spesifikasi yang digunakan sebelumnya.

REFERENSI

- [1] B. A. Wibowo, 'Analisis kinerja turbin gas (GT 3.1) PLTGU Muarakarang setelah masa konstruksi sesuai ISO 2314: 2009', *J. New Energ. Manuf.*, vol. 1, no. 1, pp. 8–20, 2022.
- [2] A. A. Bahashwan, R. B. Ibrahim, M. B. Omar, and M. Faqih, 'The Lean Blowout Prediction Techniques in Lean Premixed Gas Turbine: An Overview', *Energies*, vol. 15, no. 22, p. 8343, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15228343.
- [3] M. Rahman, V. Zaccaria, X. Zhao, and K. Kyprianidis, 'Diagnostics-oriented modelling of micro gas turbines for fleet monitoring and maintenance optimization', *Processes*, vol. 6, no. 11, p. 216, 2018.
- [4] E. Ahmed and Y. Huang, 'Flame volume prediction and validation for lean blow-out of gas turbine combustor', *Aeronaut. J.*, vol. 121, no. 1236, pp. 237–262, Feb. 2017, doi: 10.1017/aer.2016.125.
- [5] L. Esclapez *et al.*, 'Fuel effects on lean blow-out in a realistic gas turbine combustor', *Combust. Flame*, vol. 181, pp. 82–99, 2017.
- [6] N. S. Rodrigues *et al.*, 'Development and Performance of a Perforated Plate Burner under Relevant Gas Turbine Engine Conditions.', in *2018 Joint Propulsion Conference*, 2018, p. 4475.
- [7] M. A. Nemitallah, S. S. Rashwan, I. B. Mansir, A. A. Abdelhafez, and M. A. Habib, 'Review of novel combustion techniques for clean power production in gas turbines', *Energy Fuels*, vol. 32, no. 2, pp. 979–1004, 2018.
- [8] H. M. Khalil, Y. A. Eldrainy, W. A. Abdelghaffar, and A. A. Abdel-Rahman, 'Increased heat transfer to sustain flameless combustion under elevated pressure conditions—a numerical study', *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, vol. 13, no. 1, pp. 782–803, 2019.
- [9] F. Rahman and A. V. Ratnasari, 'Analisis Penyebab Trip Gas Turbine Generator Menggunakan Metode FTA di PT. Pertamina EP Doggi Matindok', *Jambura Ind. Rev. JIREV*, vol. 2, no. 2, pp. 83–88, 2022.
- [10] D.-J. Kim, Y.-H. Moon, B.-S. Choi, H.-S. Ryu, and H.-K. Nam, 'Impact of a heavy-duty gas turbine operating under temperature control on system stability', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 4543–4552, 2017.