

Strategi Pengurangan Risiko Kerusakan Pada Komponen Kritis *Boiler* di Industri Pembangkit Listrik

Iing Pamungkas*¹, Heri Tri Irawan²

^{1,2}Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar
e-mail: *¹iingpamungkas@utu.ac.id

Abstrak

Artikel ini menggunakan pendekatan failure mode and effect analysis (FMEA) dalam merumuskan strategi pengurangan risiko kerusakan pada komponen kritis bagian boiler pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) Nagan Raya. Boiler merupakan salah satu bagian penting dalam sistem produksi PLTU. Masalah di bagian boiler adalah frekuensi kerusakan yang relatif tinggi dibandingkan dengan bagian lain. Tujuan penelitian ini adalah mengusulkan strategi pengurangan risiko kerusakan pada komponen kritis boiler menggunakan pendekatan failure mode and effect analysis (FMEA). Usulan pengurangan risiko kerusakan akan memprioritaskan pada komponen kritis yang memiliki nilai risk priority number (RPN) tertinggi. Adapun strategi yang berhasil dirumuskan yaitu untuk komponen cyclone separator, melakukan pemeriksaan dan perawatan preventif secara berkala dan terjadwal khususnya pada return leg agar tidak terjadi penumpukan partikel padat pada sistem fluida. Untuk komponen primary air fan dan induced draft fan, harus melaksanakan standar operational procedure (SOP) pada saat mengoperasikan fan agar tidak mengalami vibrasi tinggi, serta secara rutin menyeimbangkan rotor yang terdapat pada fan. Sedangkan untuk komponen coal feeder, mengawasi aliran batubara dengan detail agar tidak menumpuk pada satu titik tertentu yang dapat menyebabkan kebocoran pada flange outlet.

Kata kunci - *Boiler*, Risiko Kerusakan, Failure Mode and Effect Analysis, Risk Priority Number

Abstract

This paper uses the failure mode approach and effect analysis (FMEA) in formulating a risk reduction strategy for damage to critical components of the boiler section of the Nagan Raya steam power plant. Boilers are an important part of the production system of steam power plants. The problem in the boiler section is the relatively high damage frequency compared to other parts. The aim of this study is to propose a risk reduction strategy for critical boiler components using a failure mode approach and effect analysis (FMEA). The proposed damage risk reduction will prioritize important components that have the highest risk priority number (RPN). The strategy that was successfully formulated was for the cyclone separator component, to carry out periodic and scheduled preventive checks and maintenance, especially on the return leg to prevent the accumulation of solid particles in the fluid system. Primary air fans and induced draft fan components, they must perform standard operational procedures (SOP) when operating the fan so that they do not experience high vibrations, and routinely balance the rotor contained in the fan. As for the coal feeder components, monitor the coal flow in detail so that it does not accumulate at one particular point, which can cause leakage at the outlet flanges.

Keywords - *Boiler*, Failure Risk, Failure Mode and Effect Analysis, Risk Priority Number

1. PENDAHULUAN

Sistem kelistrikan dunia saat ini masih bergantung dengan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Kapasitas produksi yang relatif besar dan harga bahan baku yang terjangkau menjadikan PLTU sebagai pembangkit listrik yang sangat populer digunakan sehingga dapat memenuhi kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat. Indonesia merupakan salah satu Negara yang mayoritas pembangkit listriknya masih menggunakan PLTU dan keberadaannya

tersebar merata diseluruh wilayah. PLTU Nagan Raya merupakan salah satu PLTU yang ada di Indonesia yang terletak di Provinsi Aceh dan milik PT. PLN (Persero) yang mayoritas sahamnya dikuasai oleh pemerintah Indonesia. PLTU Nagan Raya memiliki kapasitas pembangkit sebesar 2x110 megawatt.

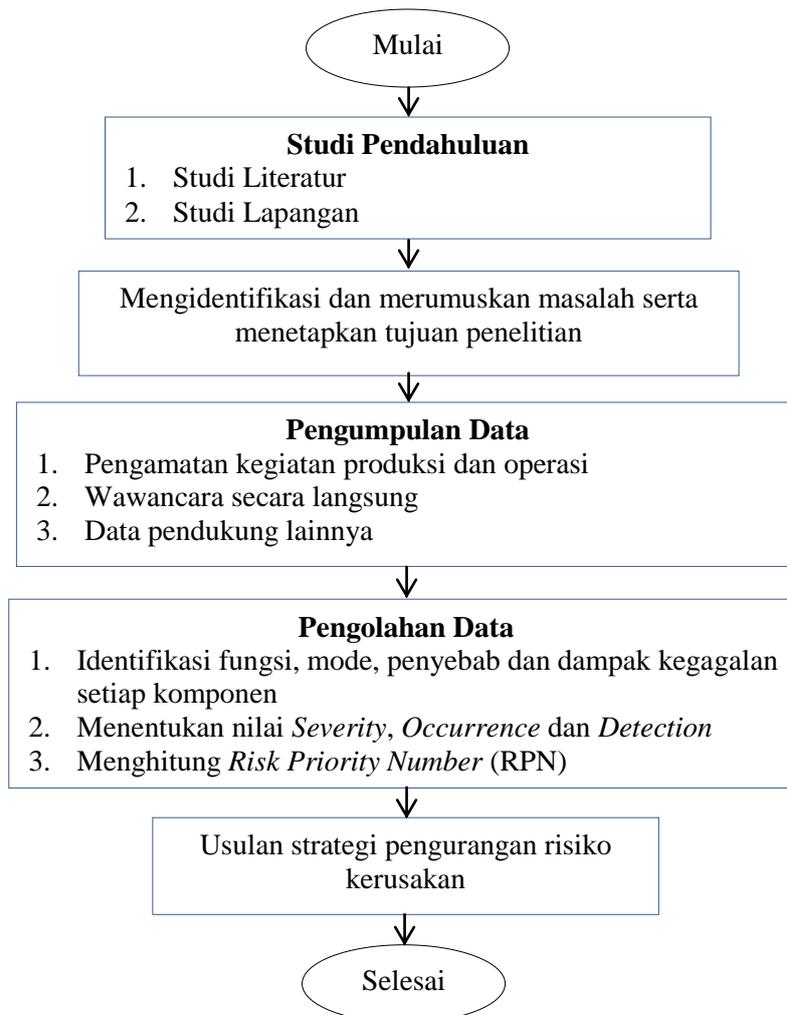
PLTU memiliki beberapa bagian penting dalam sistem produksinya, yaitu *boiler*, turbin, dan *generator*. *Boiler* merupakan salah satu bagian yang sering mengalami kerusakan pada PLTU Nagan Raya dibandingkan bagian lainnya. *Boiler* terdiri dari komponen-komponen pendukung dalam melakukan operasinya. Risiko akibat kerusakan khususnya pada komponen-komponen kritis bagian *boiler* saat ini belum pernah dilakukan dan belum diketahui secara pasti. Penilaian tingkat risiko pada bagian *boiler* di PLTU Nagan Raya pernah dilakukan, namun dilakukan secara umum atau tidak berdasarkan komponen kritis [1]. Maka dari itu, sangat dibutuhkan suatu usulan berupa strategi pengurangan risiko kerusakan khususnya pada komponen-komponen kritis bagian *boiler* agar dapat mengurangi risiko kerusakan di masa depan.

Failure mode and effect analysis (FMEA) merupakan salah satu pendekatan yang umum digunakan menganalisis risiko kerusakan yang berguna untuk mengetahui penyebab kerusakan dan menghasilkan pencegahan terjadinya kerusakan di masa depan. FMEA menilai secara kualitatif tingkat keparahan (*severity*), kejadian (*occurrence*) serta deteksi (*detection*) pada setiap kegiatan untuk proses operasi maupun peralatan atau komponen untuk suatu sistem tertentu. Ketiga komponen penilaian tersebut kemudian diberikan skor berdasarkan ketentuan baku dan komponen yang mendapatkan *risk priority number* (RPN) tertinggi akan diusulkan strategi pengurangan risiko kerusakannya. Adapun penelitian terdahulu mengaplikasikan model RPN yang terdapat pada FMEA untuk penelitiannya [2]. Selain itu, beberapa penelitian juga mengkombinasikan pendekatan FMEA dengan pendekatan lainnya seperti *fault tree analysis* (FTA), *Bayesian network* (BN) dan *probability impact matrix* (PIM) [3,4,5]

Adapun tujuan penelitian ini adalah mengusulkan strategi pengurangan risiko kerusakan pada komponen kritis *boiler* menggunakan pendekatan *failure mode and effect analysis* (FMEA).

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan pada pembangkit listrik tenaga uap Nagan Raya yang terletak di Kabupaten Nagan Raya, Provinsi Aceh, Indonesia. Objek penelitian ini adalah komponen-komponen kritis bagian *boiler* karena bagian *boiler* merupakan bagian yang frekuensi kerusakannya tertinggi dibandingkan *generator* dan turbin. Prosedur penelitian menjelaskan langkah-langkah penelitian secara garis besar dan dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Prosedur Penelitian

2.1. Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan pada penelitian ini terbagi atas dua, yaitu data primer dan data sekunder, di mana uraiannya sebagai berikut:

a. Data Primer

Data primer dalam penelitian ini yaitu data berupa hasil wawancara secara langsung dengan pekerja atau karyawan khususnya yang bekerja pada bagian *boiler*. Hasil wawancara di *input* pada *worksheet* yang telah disediakan.

b. Data Sekunder

Data sekunder dalam penelitian ini yaitu berupa data perawatan masa lalu khususnya pada bagian *boiler*. Selain itu buku dan artikel/jurnal yang terkait dengan penelitian dibutuhkan untuk menunjang jalannya penelitian.

2.2. Metode Analisis

Metode analisis dalam penelitian ini menggunakan pendekatan *failure mode and effect analysis* (FMEA). FMEA adalah suatu pendekatan yang berguna untuk mengevaluasi kegagalan terjadi dalam sebuah sistem, desain proses atau pelayanan (*service*). Identifikasi kegagalan potensial dilakukan dengan cara pemberian nilai atau skor masing-masing moda kegagalan

berdasarkan atas tingkat kejadian (*occurrence*), tingkat keparahan (*severity*) dan tingkat deteksi (*detection*) [6]. Pada penelitian ini, FMEA akan mengidentifikasi fungsi, mode, penyebab dan dampak kegagalan setiap setiap komponen kritis *boiler*. Identifikasi tersebut dihimpun dari hasil wawancara pada ahlinya, dalam hal ini yaitu pekerja atau karyawan pada bagian *boiler*, khususnya bagian *maintenance*. Hasil wawancara yang di *input* pada *worksheet* yaitu berupa nilai beserta deskripsi penilaiannya. Penilaian yang dilakukan yaitu tingkat *severity* (keparahan dampak), *occurrence* (kejadian) dan *detection* (deteksi). Setiap penilaian memiliki potensi-potensi dan skala tertentu. Adapun penilaian *severity* dinilai pada skala 1 sampai 10 dan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Penilaian *Severity*

Tingkat Keparahannya	Tingkat Keparahannya Dampak	Peringkat
Berbahaya tanpa peringatan	Kegagalan tidak didahului oleh peringatan	10
Berbahaya dengan peringatan	Kegagalan didahului oleh peringatan	9
Sangat tinggi	Produk tidak dapat dioperasikan	8
Tinggi	Produk dapat dioperasikan dengan tingkat kinerja yang banyak berkurang	7
Sedang	Produk dapat dioperasikan tetapi sebagian item tambahan (fungsi sekunder) tidak dapat berfungsi	6
Rendah	Produk dapat dioperasikan dengan tingkat kinerja yang sedikit berkurang	5
Sangat rendah	Cacat disadari oleh pelanggan (>75%)	4
Minor	Cacat disadari oleh pelanggan (50%)	3
Sangat minor	Cacat disadari oleh pelanggan (<25%)	2
Tidak ada	Tidak memiliki pengaruh	1

Untuk penilaian *occurrence* dinilai pada skala 1 sampai 10 dan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Penilaian *Occurrence*

Probabilitas Kejadian Risiko	Deskripsi	Peringkat
Sangat Tinggi	Sering terjadi	10
Tinggi	Terjadi berulang	9
		8
		7
Sedang	Jarang terjadi	6
		5
		4
Rendah	Sangat kecil terjadi	3
		2
Sangat rendah	Hampir tidak pernah terjadi	1

Untuk penilaian *detection* dinilai pada skala 1 sampai 10 dan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Penilaian *Detection*

Deteksi	Kemungkinan Deteksi	Peringkat
Hampir tidak mungkin	Pengontrol tidak dapat mendeteksi kegagalan	10
Sangat jarang	Sangat jauh kemungkinan pengontrol akan menemukan potensi kegagalan	9
Jarang	Jarang kemungkinan pengontrol akan menemukan potensi kegagalan	8
Sangat rendah	Kemungkinan pengontrol untuk mendeteksi kegagalan sangat rendah	7
Rendah	Kemungkinan pengontrol untuk mendeteksi kegagalan rendah	6
Sedang	Kemungkinan pengontrol untuk mendeteksi kegagalan sedang	5
Agak tinggi	Kemungkinan pengontrol untuk mendeteksi kegagalan agak tinggi	4
Tinggi	Kemungkinan pengontrol untuk mendeteksi kegagalan tinggi	3
Sangat tinggi	Kemungkinan pengontrol untuk mendeteksi kegagalan sangat tinggi	2
Hampir pasti	Kegagalan dalam proses tidak dapat terjadi karena telah dicegah melalui desain solusi	1

Setelah diperoleh nilai pada setiap komponen penilaian, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai *risk priority number* (RPN). Adapun persamaan untuk menghitung nilai RPN dapat dilihat pada persamaan 1 sebagai berikut.

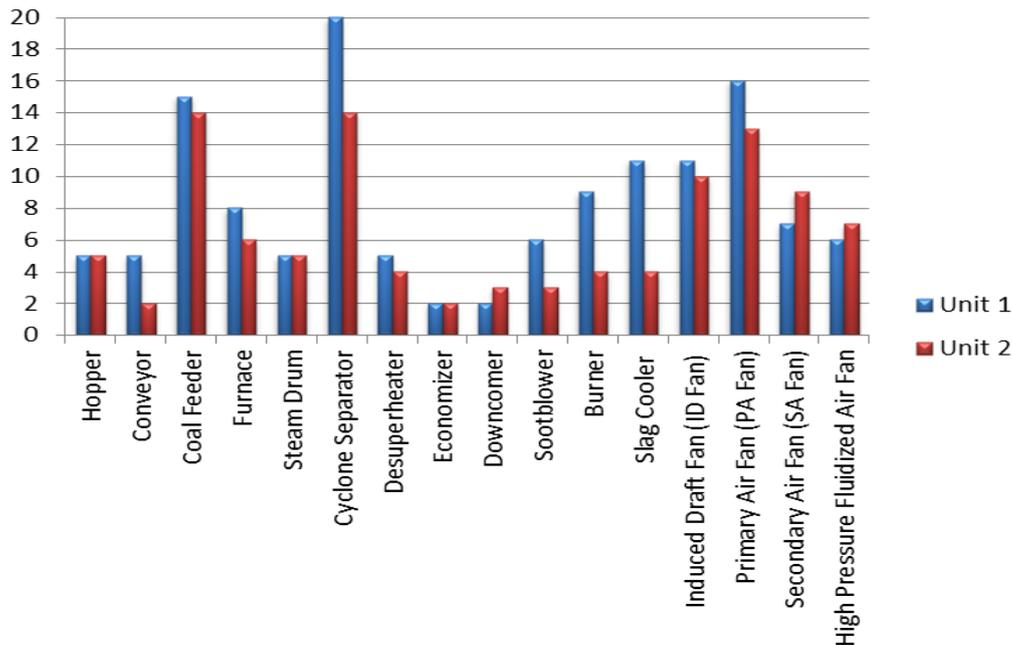
$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detection \quad (1)$$

Komponen kritis dengan nilai RPN tertinggi, kemudian akan dirumuskan strategi pengurangan risiko kerusakan agar meminimalisir terjadi kerusakan di masa depan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Komponen Rusak *Boiler*

Komponen-komponen rusak pada bagian *boiler* menjadi objek pada penelitian ini. *Boiler* merupakan salah satu bagian penting dalam sistem produksi pada pembangkit listrik tenaga uap selain *turbine* dan *generator*. *Boiler* adalah alat yang menghasilkan uap panas bertekanan tinggi dari hasil proses pembakaran batubara. Uap panas tersebut kemudian digunakan untuk menggerakkan *turbine* sehingga terkonversi menjadi energi listrik. PLTU Nagan Raya memiliki dua unit pembangkit listrik dengan kapasitas terpasang 2x110 megawatt. Berdasarkan data masa lalu periode juni 2013 hingga agustus 2015, terdapat beberapa komponen *boiler* yang mengalami kerusakan relatif sering terjadi. Langkah selanjutnya, komponen-komponen *boiler* tersebut kemudian akan diidentifikasi mode kegagalan, penyebab dan dampak yang ditimbulkan akibat kerusakan yang terjadi. Adapun data frekuensi kerusakan komponen bagian *boiler* pada PLTU Nagan Raya yang telah dihimpun, dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Frekuensi Kerusakan Komponen Bagian Boiler

3.2. Analisis Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

3.2.1. Identifikasi Mode Kegagalan, Penyebab dan Dampak

Identifikasi mode kegagalan, penyebab dan dampak dilakukan melalui proses wawancara secara langsung. Identifikasi tersebut dilakukan pada komponen boiler yang sering mengalami kerusakan. Adapun hasil identifikasi mode kegagalan, penyebab dan dampak pada komponen boiler dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Identifikasi Mode Kegagalan, Penyebab dan Dampak pada Komponen Boiler

Komponen	Fungsi	Mode Kegagalan	Penyebab Kegagalan	Dampak Kegagalan
<i>Hopper</i>	Penyimpanan batubara sebelum dipindahkan oleh conveyor	hambatan akibat abu hopper	Banyak abu menumpuk	<i>Hopper</i> macet
<i>Conveyor</i>	Memindahkan batubara yang berasal dari hopper	<i>Scraper conveyor</i> putus	Kelebihan kapasitas batubara	<i>Conveyor</i> macet atau tidak berfungsi
<i>Coal feeder</i>	Mengatur laju aliran batubara sesuai dengan kebutuhan	Kebocoran pada flange outlet	Penumpukkan batubara	<i>Coal feeder</i> tidak bisa beroperasi
<i>Furnace</i>	Tempat pembakaran bahan bakar dan batubara	<i>Furnance high pressure</i>	<i>Plugging element air heater</i>	<i>Unit trip</i>
<i>Steam drum</i>	Penampung air panas dan pembangkitan steam	Pipa level transmitter steam drum, pecahnya clading	Tingginya tekanan uap panas	<i>Unit trip</i>
<i>Cyclone separator</i>	Pemisah padatan material yang tidak terbakar dengan gas buang atau fly ash	<i>Manhole u-beem</i>	Tidak dilakukan visual check di dalam return leg	Menumpuknya partikel padat pada sistem fluida

Tabel 4. Identifikasi Mode Kegagalan, Penyebab dan Dampak pada Komponen *Boiler*

Komponen	Fungsi	Mode Kegagalan	Penyebab Kegagalan	Dampak Kegagalan
<i>Desuperheater</i>	Menjaga suhu uap yang akan masuk ke dalam <i>turbine</i> sesuai dengan desain pada <i>turbine</i> .	<i>bypass valve</i> , <i>outlet valve</i> dan <i>control valve desuperheater</i>	Uap panas tidak sesuai	<i>Turbine</i> tidak bisa beroperasi
<i>Economizer</i>	ruangan pemanas yang digunakan untuk memanaskan air dari air yang terkondensasi dari sistem sebelumnya maupun air umpan baru.	Pipa <i>drain economizer</i> bocor	Tingginya tekanan uap panas	Kalor terbuang
<i>Downcomer</i>	Penghubung <i>steam drum</i> dengan bagian bawah <i>low header</i>	<i>Valve drain downcomer</i>	Tingginya tekanan uap panas	Kalor terbuang
<i>Sootblower</i>	Pembersih abu, debu dan kotoran menempel pada <i>tube</i> atau pipa <i>boiler</i>	<i>Sootblower C30</i>	Tidak dilakukan <i>visual check</i>	Menumpuknya kotoran di pipa
<i>Burner</i>	Mengubah energi kimia yang terdapat dalam bahan bakar, menjadi energi panas di dalam <i>furnace</i> melalui suatu reaksi kimia dalam nyala api.	<i>Burner trip</i>	<i>Loss of flame</i> , modul <i>flame</i> rusak, <i>flame scanner</i> kotor	<i>Derating</i>
<i>Slag cooler</i>	Mendinginkan kotoran yang panas	Kebocoran pada jalur pendingin <i>slag cooler</i>	Tingginya tekanan uap	<i>Slag</i> yang menumpuk
<i>Induced draft fan (ID fan)</i>	Mempertahankan <i>pressure</i> pada <i>furnace boiler</i>	Turbulensi udara pada <i>fan</i> , <i>unbalance rotor</i>	Pembukaan katup tidak sesuai SOP, adanya keausan pada <i>fan blade</i>	Vibrasi tinggi
<i>Primary air fan (PA fan)</i>	penghasil udara primer yang digunakan sebagai pengangkut serbuk batubara dari <i>pulverizer</i> menuju <i>burner</i>	Turbulensi udara pada <i>fan</i> , <i>unbalance rotor</i>	Pembukaan katup tidak sesuai SOP, adanya keausan pada <i>fan blade</i>	Vibrasi tinggi
<i>Secondary air fan (SA Fan)</i>	Memberikan tekanan positif pada <i>boiler</i> dan mengontrol udara serta oksigen	Turbulensi udara pada <i>fan</i> , <i>unbalance rotor</i>	Pembukaan katup tidak sesuai SOP, adanya keausan pada <i>fan blade</i>	Vibrasi tinggi
<i>High pressure fluidized air fan</i>	Mengalirkan udara untuk mengembalikan <i>bad material</i> dari <i>cyclone</i> agar kembali ke <i>furnace</i>	Turbulensi udara pada <i>fan</i> , <i>unbalance rotor</i>	Pembukaan katup tidak sesuai SOP, adanya keausan pada <i>fan blade</i>	Vibrasi tinggi

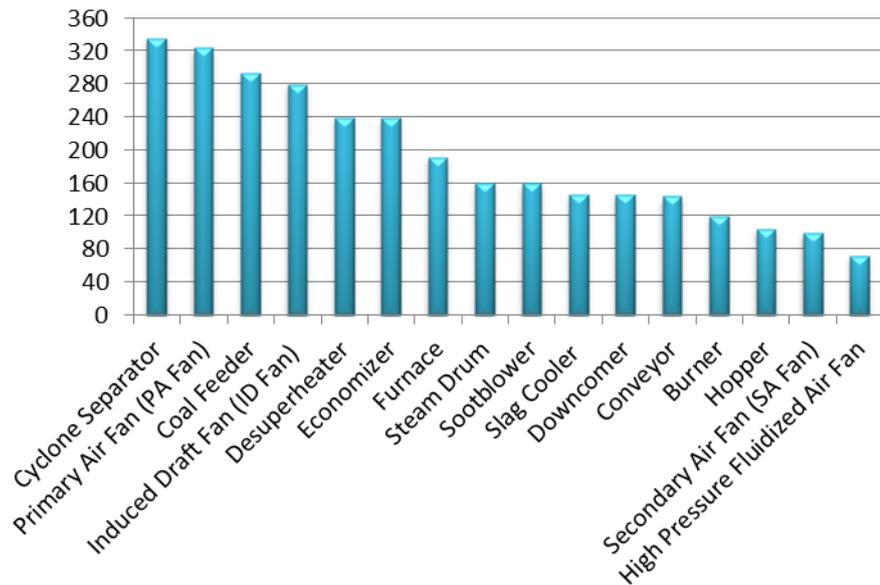
3.2.2. Penilaian *Risk Priority Number* (RPN)

Setelah dilakukan proses identifikasi mode kegagalan, penyebab dan dampak terjadinya kerusakan pada setiap komponen *boiler*, maka langkah selanjutnya adalah melakukan penilaian *risk priority number* (RPN) untuk tingkat *severity*, *occurrence* dan *detection*. Penilaian dilakukan berdasarkan hasil wawancara secara langsung. Hasil penilaian RPN dari tertinggi hingga terendah berdasarkan tingkat *severity*, *occurrence* dan *detection* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. *Risk Priority Number* (RPN) Komponen *Boiler*

No	Komponen	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	RPN
1	<i>Cyclone separator</i>	8	7	6	336
2	<i>Primary air fan (PA fan)</i>	6	6	9	324
3	<i>Coal feeder</i>	7	6	7	294
4	<i>Induced draft fan (ID fan)</i>	5	7	8	280
5	<i>Desuperheater</i>	8	5	6	240
6	<i>Economizer</i>	8	6	5	240
7	<i>Furnace</i>	8	4	6	192
8	<i>Steam drum</i>	8	4	5	160
9	<i>Sootblower</i>	8	4	5	160
10	<i>Slag cooler</i>	7	3	7	147
11	<i>Downcomer</i>	7	3	7	147
12	<i>Conveyor</i>	8	3	6	144
13	<i>Burner</i>	6	4	5	120
14	<i>Hopper</i>	5	3	7	105
15	<i>Secondary air fan (SA fan)</i>	5	4	5	100
16	<i>High pressure fluidized air fan</i>	4	3	6	72

Berdasarkan perolehan nilai RPN pada setiap komponen *boiler*, telah diketahui urutan-urutan komponen yang memiliki risiko tertinggi hingga terendah, di mana komponen *cyclone separator* memiliki risiko kerusakan tertinggi dengan nilai RPN sebesar 336 dan *high pressure fluidized air fan* memiliki risiko kerusakan terendah dengan nilai RPN sebesar 72. Dari hasil penilaian RPN, komponen rusak bagian *boiler* yang akan diusulkan strategi pengurangan kerusakannya antara lain yaitu komponen *cyclone separator* (336), *primary air fan* (324), *coal feeder* (294), dan *induced draft fan* (280). Keempat komponen tersebut diusulkan karena memiliki kesenjangan risiko kerusakan yang relatif tinggi dibandingkan dengan komponen lainnya pada bagian *boiler* atau dapat disebut komponen kritis. Kesenjangan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Risk Priority Number (RPN) Komponen Boiler

3.3. Usulan Strategi Pengurangan Risiko Kerusakan

Setelah diketahui komponen kritis bagian boiler berdasarkan penilaian *risk priority number* (RPN) pada setiap komponen rusak boiler, langkah selanjutnya akan diusulkan rumusan strategi pengurangan risiko kerusakan komponen kritis pada bagian boiler. Strategi pengurangan risiko kerusakan akan memanfaatkan sumber daya yang ada dengan menganalisa mode kegagalan, penyebab dan dampak yang telah dilakukan sebelumnya, dan diharapkan efektif dalam mengurangi kerusakan secara tidak terprediksi di masa depan. Adapun usulan strategi pengurangan risiko kerusakan komponen kritis pada bagian boiler, dapat dilihat pada Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Usulan Strategi Pengurangan Risiko Kerusakan Komponen Kritis Bagian Boiler

No	Komponen Kritis Boiler	RPN	Strategi Pengurangan Kerusakan
1	<i>Cyclone separator</i>	336	1. Melakukan pemeriksaan dan perawatan preventif secara berkala dan terjadwal khususnya pada <i>return leg</i> agar tidak terjadi penumpukan partikel padat pada sistem fluida.
2	<i>Primary air fan (PA fan)</i>	324	1. Harus melaksanakan <i>standar operational procedure</i> (SOP) pada saat mengoperasikan <i>primary air fan</i> agar tidak mengalami vibrasi tinggi. 2. Secara rutin menyeimbangkan rotor yang terdapat pada fan
3	<i>Coal feeder</i>	294	1. Mengawasi aliran batubara dengan detail agar tidak menumpuk pada satu titik tertentu yang dapat menyebabkan kebocoran pada <i>flange outlet</i> .
4	<i>Induced draft fan (ID fan)</i>	280	1. Harus melaksanakan <i>standar operational procedure</i> (SOP) pada saat mengoperasikan <i>induced draft fan</i> agar tidak mengalami vibrasi tinggi. 2. Secara rutin menyeimbangkan rotor yang terdapat pada fan

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian diperoleh dalam usaha mengurangi risiko kerusakan pada komponen kritis bagian *boiler*, ada beberapa usulan strategi yang dapat diterapkan perusahaan, antara lain:

1. Untuk komponen *cyclone separator*, melakukan pemeriksaan dan perawatan preventif secara berkala dan terjadwal khususnya pada *return leg* agar tidak terjadi penumpukan partikel padat pada sistem fluida.
2. Untuk Komponen *primary air fan* dan *induced draft fan*, harus melaksanakan *standar operational procedure (SOP)* pada saat mengoperasikan *fan* agar tidak mengalami vibrasi tinggi, serta secara rutin menyeimbangkan rotor yang terdapat pada *fan*.
3. Untuk *coal feeder*, mengawasi aliran batubara dengan detail agar tidak menumpuk pada satu titik tertentu yang dapat menyebabkan kebocoran pada *flange outlet*.

5. SARAN

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya yaitu dengan mengembangkan atau mengkombinasikan metode *failure mode and effect analysis (FMEA)* dengan metode analisis risiko lainnya yang telah ada, seperti dengan metode *fault tree analysis (FTA)*, *root cause analysis (RCA)*, *logic tree analysis (LTA)*, *probability impact matrix (PIM)* dan lainnya. Kombinasi tersebut diharapkan mengoptimalkan hasil yang diperoleh sehingga dapat diaplikasikan pada perusahaan dan efektif dalam pengurangan risiko kerusakan kedepannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pamungkas, I., 2019, Penentuan Tingkat Risiko dan Keandalan pada *Boiler* di Industri Pembangkit Listrik Nagan Raya, *ETD Unsyiah*.
- [2] Kim, K. O., Zuo, M. J., 2018, General Model for the Risk Priority Number in Failure Mode and Effects Analysis, *Reliability Engineering System Safety*, vol 169, hal 321-329.
- [3] Whiteley, M., Dunnett, S., Jackson, L., 2016, Failure Mode and Effect Analysis and Fault Tree Analysis of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, *International Journal Hydrogen Energy*, vol 41, hal 1187-1202.
- [4] Rastayesh, S., Bahrebar, S., Blaabjerg, F., Zhou, D., Wang, H., Sørensen, J. D., 2020, A System Engineering Approach Using FMEA and Bayesian Network for Risk Analysis- A Case Study, *Sustainability*, vol 12, no 1, hal 77-94.
- [5] Pamungkas, I., Irawan, H. T., Arkanullah, L., Dirhamsyah, M., Iqbal, M., 2019, Penentuan Tingkat Risiko pada Proses Produksi Garam Tradisional di Desa Ie Leubeu Kabupaten Pidie, *Jurnal Optimalisasi*, vol 5, no 2, hal 107-120.
- [6] Stamatis, D. H., 1995, *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA From Theory to Execution*, ASQC Quality Press, Milwaukee.