

Penerapan FMECA dalam Mengidentifikasi Kegagalan Komponen Kritis pada *Rotary Kiln* di Industri Semen

Muhammad Alfian Fikri¹, Mochamad Yusuf Santoso¹ dan Mey Rohma Dhani¹

¹²³Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111

*E-mail: yusuf.santoso@ppns.ac.id

Abstrak

Sektor manufaktur di Indonesia mengalami pertumbuhan yang pesat. Salah satu perusahaan dalam industri ini adalah produsen semen. Akibat tingginya permintaan pasar, proses produksi semen beroperasi terus menerus, 24 jam sehari. Hal ini membuat mesin dan peralatan yang digunakan dalam proses tersebut rentan terhadap kegagalan operasional. *Rotary kiln* merupakan komponen penting dalam produksi semen, yang juga beroperasi sepanjang waktu. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi mode kegagalan dan bahaya yang terkait dengan komponen-komponen tanur putar. Penelitian ini menggunakan metode *Failure Mode Effect and Criticality Analysis* (FMECA), yang merupakan bentuk lanjutan dari *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). FMECA memungkinkan analisis proses produksi, dampak kegagalan, penyebab kegagalan, tindakan pencegahan, deteksi mode kegagalan, dan penentuan mode kegagalan paling kritis. Analisis FMEA mengungkapkan 11 mode kegagalan yang berbeda, dimana nilai Nomor Prioritas Risiko (RPN) dihitung berdasarkan tingkat keparahan, kejadian, dan kemampuan terdeteksi. Kesebelas mode kegagalan ini kemudian dilakukan analisis kekritisan menggunakan matriks kekritisan. Hasil analisis kekritisan menunjukkan bahwa modus kegagalan komponen ban retak menjadi prioritas utama untuk dilakukan tindakan perbaikan.

Kata Kunci: FMECA, Industri Semen, Kegagalan Kritis, *Rotary Kiln*

Abstract

The manufacturing sector in Indonesia is experiencing rapid growth. One such company in this industry is a cement producer. Due to high market demand, the cement production process operates continuously, 24 hours a day. This makes the machinery and equipment used in the process susceptible to operational failures. The rotary kiln is a critical component in cement production, also running around the clock. The objective of this research was to identify failure modes and hazards associated with the rotary kiln's components. The study employed the Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA) method, an advanced form of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). FMECA enables the analysis of production processes, failure effects, failure causes, preventive actions, failure mode detection, and determination of the most critical failure modes. The FMEA analysis revealed 11 distinct failure modes, for which Risk Priority Number (RPN) values were calculated based on severity, occurrence, and detectability. These 11 failure modes were then subjected to criticality analysis using a criticality matrix. The criticality analysis results indicated that the cracked tire component failure mode is the top priority for corrective action.

Keywords: Cement Industry, Critical Failure, FMECA, *Rotary Kiln*

1. PENDAHULUAN

Dewasa ini perkembangan industri di Indonesia sangat pesat, salah satunya di bidang manufaktur. Industri yang melakukan kegiatan manufaktur atas sebuah usaha yang mengoperasikan mesin, peralatan dan tenaga kerja dalam suatu medium proses untuk mengubah bahan-bahan mentah menjadi barang jadi yang memiliki nilai jual (Pede, 2021). Pada sektor industri manufaktur, tolok ukur produktivitas dari perusahaan dapat dilihat dari kemampuan suatu perusahaan dalam menjalankan proses produksi dengan efektif dan efisien (Antandito et al.,

2014). Salah satu perusahaan yang bergerak di bidang manufaktur adalah perusahaan produksi semen. Proses pembuatan semen pada dasarnya menggunakan bahan baku utama yaitu batu kapur dan tanah liat. Selain kedua bahan tersebut, terdapat bahan baku koreksi yang terdiri dari pasir besi dan pasir silika dan bahan baku tambahan yaitu *gypsum* dan *trass*. Akibat permintaan pasar yang cukup tinggi, maka perusahaan melakukan proses produksi semen selama 24 jam, hal ini membuat alat dan mesin yang digunakan dalam proses produksi rentan terjadi kegagalan komponen.

Salah satu proses yang berlangsung selama 24 jam dalam proses produksi pembuatan semen adalah *rotary kiln*. *Rotary kiln* merupakan sebuah alat pembakaran lanjutan produk *raw mill* menjadi klinker di perusahaan semen, karena peranannya yang sangat besar sebagai komponen utama penghasil produk semen (Wahyu dan Sumiaty, 2009). Proses yang terjadi di *rotary kiln* dimulai dengan pengumpulan bahan baku yang telah tercampur dan dimasukkan ke *preheater* untuk dilakukan pembakaran awal dengan suhu 350°C - 800°C. Setelah itu, masuk ke *rotary kiln* dan akan mengalami proses pembakaran dengan suhu tinggi yang bisa mencapai 1400 °C (Herman et al., 2019). Secara garis besar, di dalam kiln terbagi menjadi tiga zona yaitu zona kalsinasi, zona transisi, dan zona sintering (klinkerisasi) (Draswati dkk, 2020). Banyak catatan temuan mengenai kecelakaan kerja, terutama di area *rotary kiln* (Faizin dan Nuruddin, 2022). Pada tahun 2022, dalam proses produksi pada kiln suatu perusahaan semen telah terjadi 350 kegagalan.

Dari permasalahan tersebut perlu dilakukan analisis kegagalan komponen pada *rotary kiln*. Menurut Adhi (2015) *Failure Mode Effect and Analysis* (FMEA) adalah metode untuk menganalisis kegagalan potensial dari suatu proses atau produk, yang digunakan sejak tahun 1950 di dalam sistem kontrol penerbangan. FMEA memiliki fokus pada pencegahan kerusakan produk, peningkatan keselamatan kerja dan meningkatkan kepuasan konsumen (McDermott, Beauregard dan Bennett, 2009). Metode ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh-pengaruh kegagalan tersebut terhadap keandalan sistem (Syarifudin and Putra, 2021). FMEA dapat diterapkan dengan lebih efisien dengan adanya penambahan analisis nilai kekritisan (*Criticality Analysis*) lalu ditambahkan ke dalam setiap mode kegagalan yang sekarang disebut dengan *Failure Mode Effect and Criticality Analysis* (FMECA). Menurut Singh dan Mondal (2017) disebutkan bahwa informasi kerusakan atau kegagalan komponen yang dimiliki oleh suatu perusahaan dapat dianalisis menggunakan FMECA untuk dilakukan perhitungan kekritisan bagi setiap mode kegagalan komponen. Dari hasil pemrioritasan dengan matriks kekritikalitas maka didapatkan mode kegagalan terbaru yang digunakan untuk menentukan penyebab terjadinya kegagalan (Dofantara et al., 2023).

Artikel ini berfokus untuk mengetahui risiko kegagalan dari komponen kritis yang dapat terjadi pada komponen *rotary kiln*. Salah satu cara untuk melakukan identifikasi adalah dengan menggunakan metode FMECA. Analisis pada metode ini dapat menggambarkan mode kegagalan, efek kegagalan, penyebab kegagalan, tindakan preventif dan penilaian deteksi dari komponen. Selanjutnya akan dinilai kekritisan mode kegagalan menggunakan matriks kekritikalitas. Komponen dengan kekritisan tertinggi akan mendapatkan perhatian dan tindakan korektif terlebih dahulu.

2. METODE

Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA) merupakan metode yang memiliki dua analisis, yaitu menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Criticality Analysis* (CA) yang memiliki fungsi untuk melakukan evaluasi terhadap beberapa risiko yang berasal dari kemungkinan-kemungkinan terjadinya masalah dengan beberapa cara atau metode (Rahman, 2021). Metode FMEA harus diselesaikan dahulu sebelum melakukan perhitungan *Criticality Analysis* (CA). Dalam pembuatan FMEA dilakukan perhitungan RPN (nilai risiko prioritas) yang bertujuan untuk mengetahui komponen kritis dari suatu mesin yang selanjutnya dilakukan pengkategorian konsekuensi kegagalan yang terjadi pada tiap komponen (Hendratmoko and Pranoto, 2023). Nilai dari RPN akan menentukan seberapa kritis komponen pada mesin (Ginting dan Lista, 2019). Sedangkan untuk CA melakukan klasifikasi atau memprioritaskan tingkat kepentingan berdasarkan tingkat kegagalan dan tingkat keparahan. FMEA sendiri nantinya akan digunakan sebagai dasar dalam penentuan Analisis Kekritisan. Bagian dari analisis ini juga akan memberikan penilaian tentang sebab dan akibat dari setiap mode kegagalan. Data dari lembar FMEA akan digunakan untuk analisis selanjutnya di FMECA agar dapat dikembangkan dalam analisis kekritisan.

Langkah penyusunan FMECA terbagi menjadi dua proses menurut Ibrahim et al (2011), yaitu sebagai berikut:

1. Analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Analisis FMEA terdapat beberapa tahap yaitu, menetapkan mode kegagalan dari proses *rotary kiln*. Tahap ini dilakukan menentukan titik-titik kegagalan yang menyebabkan terjadinya kegagalan. Setelah itu, dilakukan evaluasi dengan perhitungan nilai *Risk Priority Number* (RPN). Di mana RPN adalah hasil perkalian dari *Severity* (S), *Occurrence* (O), *Detection* (D). *Severity*

adalah tingkat keparahan akibat dari proses yang gagal pada proses produksi dan aktivitas yang ada, *Occurrence* adalah penentuan nilai gangguan yang bisa menyebabkan kegagalan produksi, *Detection* adalah kemampuan mendeteksi kegagalan proses yang bisa diketahui sebelum terjadinya kegagalan tersebut.

2. *Criticality Analysis (CA)*, analisis menggunakan matriks kekritisan dan dilakukan dengan beberapa tahap:
 - a. Menentukan tingkat *severity* dan *occurrence*.
 - b. Melakukan perhitungan RPN pada setiap titik kegagalan.
 - c. Menempatkan setiap titik kegagalan pada matriks kekritisan (CA) dengan memperhatikan nilai *severity* dan *occurrence* seperti yang ada pada Gambar 1. Jika posisi titik kegagalannya cenderung berada di sebelah kanan matriks maka artinya titik kegagalannya semakin tinggi, dan jika titik kegagalan berada di posisi semakin ke atas maka tingkat kegagalannya akan semakin tinggi juga. Berlaku sebaliknya jika posisinya semakin ke kiri dan ke bawah matriks kekritisan maka tingkat kegagalan akan semakin rendah.

Penilaian FMEA ditentukan dari perhitungan frekuensi terjadinya kegagalan berdasarkan data historis kegagalan perusahaan (Nurjanah et al., 2024). Untuk melakukan penentuan titik kegagalan dapat dilakukan dengan penentuan nilai RPN dengan cara perkalian antara nilai *severity*, *occurrence*, dan *detection* dimana nilai tersebut hasil dari identifikasi dari setelah melakukan diskusi dengan *expert judgement*. Perhitungan dari RPN sebagai berikut.

$$RPN = S \times O \times D$$

Nilai RPN yang muncul menunjukkan tingkat kepentingan terhadap perhatian yang diberikan untuk area/komponen yang terdapat dalam sistem (Suherman dan Cahyana, 2019). Tabel 1, Tabel 2 dan Tabel 3 secara berurutan menunjukkan kriteria dari tingkat *severity*, *occurrence* dan *detection*. Terdapat 10 tingkat *severity* yang terdapat pada Tabel 1. *Severity* terbesar dideskripsikan dengan “Risiko tanpa peringatan” sedangkan yang paling rendah dideskripsikan dengan “tidak ada”. Kriteria *occurrence* juga memiliki 10 tingkatan. Kriteria “sangat tinggi” dideskripsikan sebagai yang paling tinggi dari *occurrence* sedangkan “sangat rendah” menjadi kriteria yang paling rendah. Jumlah tingkatan sebanyak 10 juga digunakan untuk kategori *detection*. Kriteria atau tingkatan paling tidak mungkin terdeteksi dideskripsikan dengan “*absolute uncertainty*” yang bernilai 10, sedangkan tingkatan yang hampir pasti bisa terdeteksi dideskripsikan dengan “hampir pasti” dengan nilai 1.

Tabel 1. Kategori tingkat keparahan (*severity*)

Tingkat Keparahan	Keterangan	Skor
Risiko tanpa peringatan	Ranking tertinggi dari akibat yang ditimbulkan oleh mode kerusakan terhadap sistem operasional dengan tanpa peringatan sebelumnya	10
Risiko dengan peringatan	Ranking tertinggi dari akibat yang ditimbulkan oleh mode kerusakan terhadap sistem operasional dengan peringatan sebelumnya	9
Sangat Tinggi	Sistem tidak dapat beroperasi dengan tanpa berkompromi terhadap keselamatan	8
Tinggi	Sistem tidak dapat beroperasi dengan kerusakan peralatan	7
Sedang	Sistem tidak dapat beroperasi dengan sedikit kerusakan peralatan	6
Rendah	Sistem tidak dapat beroperasi tanpa kerusakan	5
Sangat rendah	Sistem beroperasi dengan penurunan secara signifikan terhadap performance	4
Kecil	Sistem beroperasi dengan penurunan pada beberapa performance	3
Sangat kecil	Sistem beroperasi dengan sedikit gangguan	2
Tidak ada	Tanpa akibat	1

Tabel 2. Kategori tingkat keseringan (*occurrence*)

<i>Occurrence of Failure</i>	<i>Failure Prob</i>	Skor
Sangat tinggi: kerusakan yang pasti terjadi (tidak dapat dielakkan)	>1 in 2	10
	1 in 3	9
Tinggi: Kerusakan berulang	1 in 8	8
	1 in 20	7
Sedang: kerusakan yang kadang-kadang terjadi	1 in 80	6
	1 in 400	5
	1 in 2.000	4
Rendah: Kerusakan yang kemungkinan kejadiannya relatif sangat	1 in 15.000	3

<i>Occurrence of Failure</i>	<i>Failure Prob</i>	Skor
kecil		
	1 in 150.000	2
Sangat rendah/ <i>remote</i> : kerusakan yang tidak mungkin terjadi	< 1 in 1.500.000	1

Tabel 3. Kategori pendeteksian kegagalan (*Detection*)

<i>Detection</i>	Keterangan	Skor
<i>Absolute Uncertainty</i>	Sangat tidak bisa mendeteksi penyebab yang berpotensi pada kerusakan	10
<i>Very remote</i>	Sangat kecil kemungkinan untuk dapat mendeteksi penyebab yang berpotensi pada kerusakan	9
<i>Remote</i>	Kecil kemungkinan untuk dapat mendeteksi penyebab yang berpotensi pada kerusakan	8
Sangat rendah	Sangat rendah kemungkinan untuk dapat mendeteksi penyebab yang berpotensi pada kerusakan	7
Rendah	Rendah kemungkinan untuk mendeteksi penyebab yang berpotensi pada kerusakan	6
Sedang	Sedang, kemungkinan untuk dapat mendeteksi penyebab yang berpotensi pada kerusakan	5
Sangat sedang	Sangat sedang kemungkinan untuk dapat mendeteksi penyebab yang berpotensi pada kerusakan	4
Tinggi	Tinggi kemungkinan untuk dapat mendeteksi penyebab yang berpotensi pada kerusakan	3
Sangat tinggi	Sangat tinggi kemungkinan untuk dapat mendeteksi penyebab yang berpotensi pada kerusakan	2
Hampir pasti	Hampir pasti dapat mendeteksi penyebab yang berpotensi pada kerusakan	1

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Mode kegagalan komponen dari mesin *rotary kiln* disajikan pada Tabel 4. Terdapat 11 mode kegagalan yang akan dianalisis. Mode kegagalan komponen tersebut telah dihitung nilai RPN-nya berdasarkan perkalian SOD yang telah dihasilkan melalui *expert judgement*. Hasil FMEA tersebut akan dianalisis kembali menggunakan CA untuk mengetahui prioritas komponen yang perlu dilakukan tindakan korektif terlebih dahulu.

Tabel 4. Tabel FMEA mesin rotary kiln

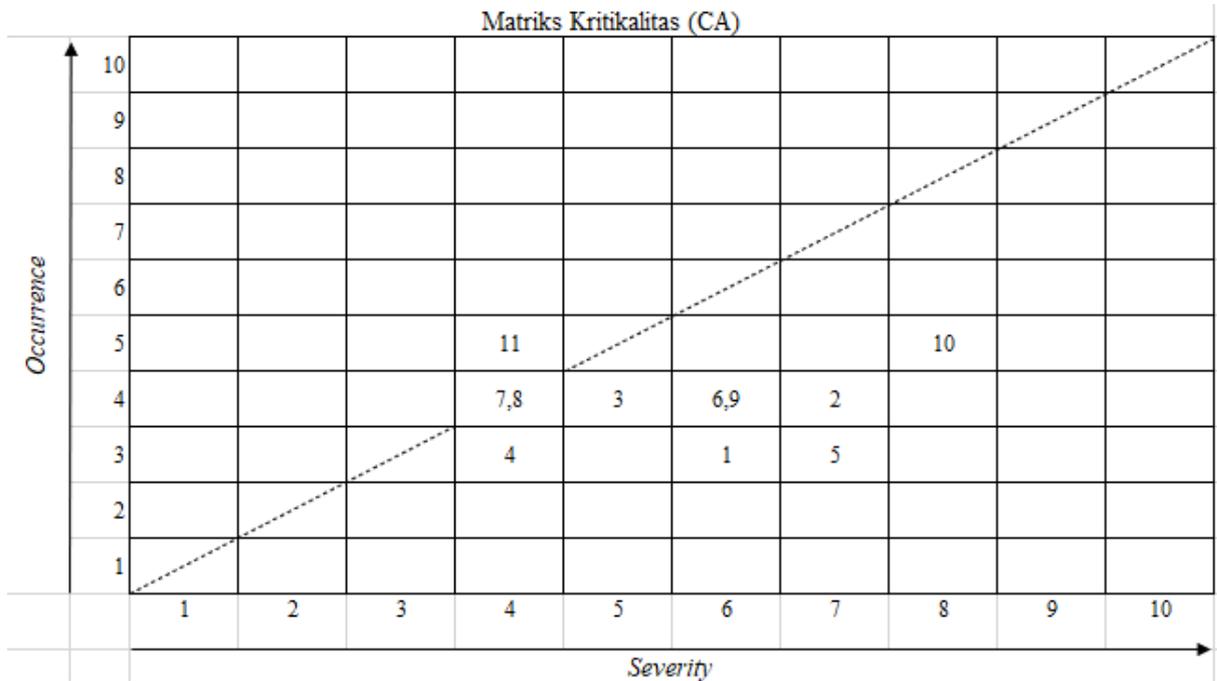
<i>No</i>	<i>Component & functional</i>	<i>Potential failure mode</i>	<i>Potential effect (s) of failure</i>	<i>S</i>	<i>Potential cause (s) of failure</i>	<i>O</i>	<i>Current control, prevention</i>	<i>Current control, detection</i>	<i>D</i>	<i>RP N</i>
1.	Gate, untuk kontrol aliran material	Gate aus	Tidak bekerja <i>slide gate</i>	6	Kurang pelumasan	3	Inspeksi <i>gate</i>	Inspeksi rutin	3	54
2.	DVC, untuk kontrol aliran udara	<i>Damper valve controler</i> bocor	Terjadi kebakaran	7	<i>Valve</i> aus	4	Pengecekan rembesan	Notifikasi ke sistem	2	56
3.	<i>Lamela Inlet</i> , mengatur aliran material	<i>Lamela inlet</i> rusak	Kelebihan panas kiln	5	Gesekan berlebih	4	Notifikasi sistem	Terdapat <i>interlock</i>	4	80
4.	<i>Coupling marland</i> , untuk transmisi	<i>Coupling marland noise</i>	Kebisingan meningkat	4	Kurang pelumasan	3	Pengecekan komponen	Inspeksi rutin	5	60

No	Component & functional	Potential failure mode	Potential effect (s) of failure	S	Potential cause (s) of failure	O	Current control, prevention	Current control, detection	D	RPN
	torsi antar motor									
5.	Gate, untuk kontrol aliran material	Reject gate macet	Kecelakaan kerja	7	Penumpukan material	3	Pengecekan komponen	Pengecekan kinerja mesin	4	84
6.	Reducer inching, kontrol kecepatan putaran kiln	Reducer inching suara kasar	Reducer pecah	6	Bearing aus	4	Pengecekan komponen	Notifikasi masuk ke sistem	5	120
7.	Bearing pinion, berfungsi menopang poros pinion	Bearing Pinion aus	Kebisingan meningkat	4	Pemasangan kurang tepat	4	Pengukuran lingker	Notifikasi masuk ke sistem	2	32
8.	Bearing support, untuk menopang beban drum kiln	Bearing support aus	Getaran drum tidak terkontrol	4	Kurang pelumasan	4	Inspeksi rutin	Inspeksi rutin	4	64
9.	Deflektor, untuk mengatur panas dalam kiln	Deflektor lepas	Kerusakan lining kiln	6	Pemasangan kurang tepat	4	Inspeksi rutin	Pengecekan visual komponen	4	96
10.	Tire, untuk mengurangi gesekan pada drum dan penopang	Tire retak	Tabung kiln bergeser	8	Perbedaan suhu	5	Monitoring indikator suhu	Indikator suhu meningkat	4	160
11.	Actuator, untuk kontrol dan penggerak kiln	Actuator inlet lepas	Pencemaran lingkungan	4	Pemasangan kurang tepat	4	Pengecekan rutin komponen	Inpeksi visual komponen	5	80

Fungsi dari matriks CA adalah untuk menentukan prioritas mode kegagalan yang berdasar pada tingkat keparahan dan tingkat kejadiannya, jika ada nilai RPN yang sama maka untuk penentuan mode kegagalan akan mempermudah dengan penentuan *severity* dan *occurrence* (Rahman, A. 2021). Penggunaan matriks CA akan membuat sangat jelas jika ada dua mode kegagalan yang memiliki nilai RPN sama, contohnya adalah pada mode kegagalan (3) *lamela inlet* rusak dengan (11) *Actuator inlet* lepas. Kesebelas mode kegagalan dalam matriks CA dapat dilihat dalam Gambar 1.

Gambar 1 menunjukkan grafik CA dengan tingkat *severity* 1-10 pada garis horizontal, tingkat *occurrence* 1-10 pada garis vertikal, dan terdapat garis bantuan diagonal yang berarti semakin tinggi nilai *severity* dan *occurrence* maka posisi mode kegagalan komponen semakin kekanan atas grafik. Di dalam grafik CA terdapat angka yang menunjukkan nomor komponen dari FMEA yang telah di buat. Masing-masing nomor mewakili urutan analisis FMEA, nomor (1) *Gate* aus, (2) *Damper valve controller* bocor, (3) *Lamela inlet* rusak, (4) *Coupling marland noise*, (5) *Reject gate* macet, (6) *Reducer inching* suara kasar, (7) *Bearing pinion* aus, (8) *Bearing support*

aus, (9) *Deflektor* lepas, (10) *Tire* retak, (11) *Actuator inlet* lepas.



Gambar 1. Grafik Matiks Kritikalitas (CA)

Mode kegagalan nomor (3) *lamela inlet* rusak dengan (11) *Actuator inlet* lepas memiliki nilai RPN yang sama yaitu 80. Oleh karena itu, analisis CA akan membantu mengurutkan prioritas dari kedua mode kegagalan tersebut. Mode kegagalan nomor (3) *lamela inlet* rusak memiliki nilai *severity* 5 dan nilai *occurrence* 4. Sedangkan, pada mode kegagalan nomor (11) *actuator inlet* lepas memiliki nilai *severity* 4 dan nilai *occurrence* 4. Berdasarkan grafik CA, maka urutan dari kedua mode kegagalan dari kedua komponen yang memiliki nilai RPN yang sama adalah mode komponen nomor (3) terlebih dahulu.

Berdasarkan hasil CA yang disajikan pada Gambar 1, didapatkan urutan prioritas mode kegagalan yang harus segera ditangani dari 11 mode kegagalan, yang disajikan pada tabel 5. Dari 11 mode kegagalan tersebut, didapatkan bahwa mode kegagalan yang menempati prioritas tertinggi adalah komponen nomor (10), yaitu *tire* retak. Oleh karena itu, komponen *tire* retak perlu mendapatkan tindakan korektif terlebih dahulu

Tabel 5. Urutan prioritas mode kegagalan setelah dilakukan CA

Nomor Komponen	Potential Failure Mode	RPN
10	<i>Tire</i> retak	160
2	<i>Damper valve controler</i> bocor	56
5	<i>Reject gate</i> macet	84
6	<i>Reducer inching</i> suara kasar	120
9	<i>Deflektor</i> lepas	96
1	<i>Gate</i> aus	54
3	<i>Lamela inlet</i> rusak	80
11	<i>Actuator inlet</i> lepas	80
7	<i>Bearing Pinion</i> aus	32
8	<i>Bearing rupport</i> aus	64
4	<i>Coupling marland noise</i>	60

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan di atas, maka peneliti dapat menarik kesimpulan di mana terdapat 11 mode kegagalan dari mesin *rotary kiln*, yaitu *tire* retak, *Damper valve controler* bocor, *Reject gate* macet, *Reducer inching* suara kasar, *Deflektor* lepas, *Gate* aus, *Lamela inlet* rusak, *Actuator inlet* lepas, *Bearing Pinion* aus, *Bearing rupport* aus, *Coupling marland noise*. Setelah dilakukan analisis FMECA maka di dapatkan mode kegagalan yang harus mendapatkan perhatian khusus adalah *tire* retak. Oleh karena itu, dengan menerapkan metode ini dapat membantu perusahaan dalam mencegah risiko kegagalan yang dapat terjadi dan sebagai tahap awal untuk membuat perencanaan selanjutnya, sehingga penerapan FMECA dapat dilakukan sebagai evaluasi untuk mencegah terjadinya kegagalan yang tidak diinginkan perusahaan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis ditujukan kepada pembimbing *on the job training* yang telah bersedia menjadi *expert judgement* dan perusahaan tempat OJT yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.

6. DAFTAR NOTASI

Risk Priority Number (RPN) = Nomor prioritas mode kegagalan hasil perkalian dari *severity, occurrence, detection*.
Severity (S) = Nilai tingkat keparahan dari akibat yang ditimbulkan.

Occurence (O) = Seberapa sering kemungkinan penyebab kegagalan terjadi.

Detection (D) = Seberapa jauh penyebab kegagalan dapat terjadi (Wiryono dkk, 2019).

DAFTAR PUSTAKA

Adhi, R., Pramesti, C., Purwanggono, B., & Bakhtiar, A. (2015). Analysis of Defect Event Quantity Using Priority-Cost Failure Mode, Effect, And Criticality Analysis (PC-FMECA) Method (Case Study: Smoothmill Facility PT. Ebako Nusantara). 1-5.

Antandito, D.J., Choiri, M., & Riawati, L. (2014). Pendekatan lean manufacturing pada proses produksi furniture dengan metode cost integrated value stream mapping (Studi kasus: PT. Gatra Mapan, Ngijo, Malang). 2014, 2(6), 1158- 1167.

Dofantara, V., Subekti, A., & Amrullah, N. (2023). Identifikasi Kegagalan Komponen Pada Container Crane Menggunakan Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA) Dan Fault Tree Analysis (FTA). 2581.

Faizin, R. A., & Nuruddin, M. (2022). Analisis Risiko Pada Area Rotary Kiln di PT Gresik Mitra Teknik Guna Pencegahan Kecelakaan Kerja. *Jurnal Serambi Engineering*, 7(3), 3473–3480.

Ginting, E., Lista, Y., 2019. Analisa Komponen Kritis untuk Mengurangi Breakdown Mesin Produksi pada PT. XYZ. *Talent. Conf. Ser. Energy Eng.* 2.

Hendratmoko, T., Pranoto, H., 2023. Analisis Kegagalan dengan Menggunakan Metode FMEA dan FTA Untuk Menentukan Perawatan Undercarriage Pada Kendaraan Listrik E-Niaga Geni Biru Tiga Roda 1, 94–103

Herman, S., Studi, P., Mesin, T., Mesin, J. T., Teknik, F., Sriwijaya, U., Saputra, R. A., IRLANE MAIA DE OLIVEIRA, Rahmat, A. Y., Syahbanu, I., Rudyansyah, R., Sri Aprilia and Nasrul Arahman, Aprilia, S., Rosnelly, C. M., Ramadhani, S., Novarina, L., Arahman, N., Aprilia, S., Maimun, T., ... Jihannisa, R. (2019).. *Jurusan Teknik Kimia USU*, 3(1), 18–23.

Ibrahim B, Jacob AM, dan Hesamestyna M. 2011. Penggunaan metode FMECA (Failure Modes, Effects and Critically Analysis) dalam identifikasi titik kritis tracebility industri pengolahan udang breaded. *Quality Arif Rahman dan Farah Fahma Jurnal Teknologi Industri Pertanian* 31 (1): 110-119 *Jurnal Manajemen dan Akutansi Untuk Meningkatkan Kualitas SDM*. 1(5): 34-45.

McDermott, R., Beauregard, M. dan Bennett, M.A. (2009) *The Basics of FMEA*. 2nd, Revis ed, *The Basics of FMEA*. 2nd, Revis ed. New York: CRC Press.

Nurjanah, D. A., Kusminah, I. L., Rachmat, A. N., & Nabella, N. (2024). Analisis Penentuan Komponen Kritis Small Excavator Menggunakan Metode FMEA dan Diagram Pareto. *Journal of Safety, Health, and Environmental*

Engineering, 1(1), 7–15. <https://doi.org/10.33863/jshee.v1i1.19>

Pede, P. F. A. (2021). Pengaruh Return on Assets Dan Debt To Equity Ratio Terhadap Sustainable Growth Rate Pada Perusahaan Manufaktur Sektor Industri Barang Konsumsi Yang Tercatat Di Bursa Efek Indonesia Tahun 2019. *JIMEN Jurnal Inovatif Mahasiswa Manajemen*, 1(2), 113–123.

Rahman, A. (2021). Penggunaan Metode Fmeca (Failure Modes Effects Criticality Analysis) Dalam Identifikasi Titik Kritis Di Industri Kemasan. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 31(1), 110–119.

Singh, A. K., & Mondal, S. (2017). Mechanical failure analysis of a rake unloading system using FTA and FMECA. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 7(5), 235-242.

Suherman, A., Cahyana, B.J., 2019. Pengendalian Kualitas dengan Metode Failure mode and Effect Analysis (FMEA) dan Pendekatan Kaizen untuk Mengurangi Jumlah Kecacatan dan Penyebabnya. *J. UMJ* 16, 1–9

Syarifudin, A., Putra, J.T., 2021. Analisa Risiko Kegagalan Komponen Pada Excavator Komatsu 150LC dengan Metode FTA dan FMEA di PT. XY. *J. InTent* 4, 1–10.

Wahyu, D., & Sumiaty. (2009). Analisis Energi pada System Rotary Kiln unit Indarung IV Pt Semen Padang. Padang: Politeknik Negeri Padang.

Wiryo, L.K.R. dan Arvianto, A. (2019) “Analisis Perbaikan Kualitas Kertas White Top Liner Menggunakan Metode Fault Tree Analysis (Fta), Failure Mode and Effect Analysis (Fmea), Dan Criticality Analysis (Studi Kasus: Pt Pura Barutama Unit Paper Mill 5),” *Industrial Engineering Online Journal*, 8(2).