

Strategi Mitigasi Risiko Berbasis FMEA untuk Pencegahan Kegagalan Komponen Final Drive pada Bulldozer

FMEA-Based Risk Mitigation Strategy for Preventing Final Drive Component Failures in Bulldozers

Yusril Arsyad¹, Sutrisna^{1*}, Dandung Rudy Hartana¹, Yohanes Agus Jayatun¹

¹*Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta*

* *sutrisna@itny.ac.id*

ABSTRAK

Kerusakan pada komponen final drive bulldozer merupakan salah satu penyebab utama meningkatnya downtime dan biaya perawatan alat berat di sektor pertambangan dan konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis risiko kegagalan pada komponen final drive serta merumuskan strategi mitigasi risiko dengan menggunakan metode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Data penelitian diperoleh dari observasi lapangan, wawancara dengan teknisi, serta analisis data historis kerusakan dan hasil Scheduled Oil Sampling (SOS). Setiap potensi kegagalan dinilai berdasarkan tiga parameter utama, yaitu Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D) untuk menghasilkan nilai Risk Priority Number (RPN). Hasil analisis menunjukkan bahwa kegagalan pada Sun Gear memiliki nilai RPN tertinggi 270 sehingga menjadi fokus utama mitigasi. Strategi yang diusulkan meliputi peningkatan frekuensi inspeksi, pengendalian kualitas pelumasan, serta penerapan sistem pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*). Implementasi strategi mitigasi ini diharapkan dapat menurunkan tingkat risiko kegagalan dan meningkatkan keandalan sistem transmisi final drive pada bulldozer

Kata kunci: *FMEA, mitigasi risiko, final drive, bulldozer, pemeliharaan prediktif*

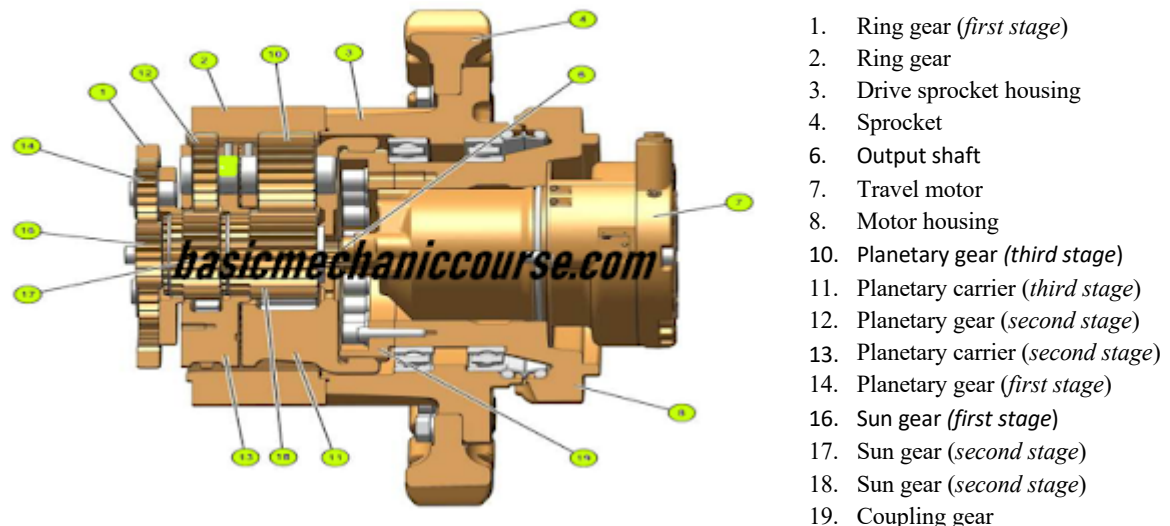
ABSTRACT

Failures in bulldozer final drive components are among the leading causes of increased downtime and maintenance costs in heavy equipment operations, particularly in mining and construction sectors. This study aims to analyze the potential failure risks of final drive components and to formulate effective risk mitigation strategies using the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method. Data were collected through field observations, interviews with maintenance technicians, and analysis of historical failure records and Scheduled Oil Sampling (SOS) results. Each failure mode was evaluated based on three main parameters: Severity (S), Occurrence (O), and Detection (D), to determine the Risk Priority Number (RPN). The results indicate that failures in bearing and seal oil components have the highest RPN values 270, making them the primary focus of mitigation. Proposed strategies include increasing inspection frequency, improving lubrication quality control, and implementing condition-based maintenance systems. The application of these mitigation strategies is expected to reduce the likelihood of component failures and enhance the reliability of the bulldozer final drive system .

Keyword : *FMEA, risk mitigation, final drive, bulldozer, predictive maintenance.*

PENDAHULUAN

Komponen *final drive* pada *bulldozer* merupakan salah satu bagian kritis dalam sistem penggerak (*drivetrain*) yang berfungsi meneruskan torsi dari motor penggerak ke roda atau *track* sehingga pergerakan pada medan berat dapat dilakukan. Komponen ini secara langsung mengalami beban tinggi, kondisi lingkungan yang keras (debu, kelembaban, suhu tinggi), beban kejutan (*shock load*), serta keausan dan kekurangan pelumasan. Kegagalan *final drive* tidak hanya menyebabkan *downtime* dan kerugian operasional, tetapi juga biaya pemeliharaan dan penggantian yang tinggi, serta potensi kerusakan lebih lanjut pada sistem lain [1], [2]. Pada gambar 1 menunjukkan *final drive bulldozer* dan bagian-bagiannya.



1. Ring gear (*first stage*)
2. Ring gear
3. Drive sprocket housing
4. Sprocket
6. Output shaft
7. Travel motor
8. Motor housing
10. Planetary gear (*third stage*)
11. Planetary carrier (*third stage*)
12. Planetary gear (*second stage*)
13. Planetary carrier (*second stage*)
14. Planetary gear (*first stage*)
16. Sun gear (*first stage*)
17. Sun gear (*second stage*)
18. Sun gear (*second stage*)
19. Coupling gear

Gambar 1. Final Drive Bulldozer [3]

Meskipun pemeliharaan preventif dan inspeksi rutin sudah banyak dilakukan, seringkali kegagalan masih terjadi secara tiba-tiba atau setelah gejala awal yang tidak diidentifikasi secara sistematis. Masalah yang umum ditemukan mencakup: kebocoran oli atau pelumas karena seal yang aus atau retak [4], kontaminasi pelumas oleh partikel logam, debu atau air, keausan pada *bearing* dan gigi (*gear wear*), serta beban operasional yang melebihi spesifikasi komponen [2], [3], [5]

Beberapa studi telah mengidentifikasi penyebab kegagalan *final drive* secara empiris. Misalnya, analisis kerusakan *planetary gear* pada *final drive bulldozer* mengindikasikan bahwa kurangnya pelumasan akibat *seal* yang aus menyebabkan oli merembes dan akhirnya *bearing* serta *gear* mengalami keausan yang signifikan. [6]Juga dijelaskan bahwa kontaminasi oli dan kebocoran adalah gejala awal yang sering diabaikan, sehingga menyebabkan kerusakan lebih besar kemudian[7] .

Namun demikian, sedikit penelitian yang secara khusus menerapkan pendekatan sistematis seperti *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi secara proaktif mode-mode kegagalan, menentukan probabilitas, dampak, dan deteksi (*severity, occurrence, detectability*) khusus untuk *final drive bulldozer*, lalu merumuskan strategi mitigasi risiko yang terukur berdasarkan prioritas risiko[8]. Beberapa penelitian dalam industri peralatan berat telah mengaplikasikan FMEA untuk keseluruhan unit *heavy equipment* [9], namun tidak se[10], [11], [12]cara spesifik membahas *final drive* sebagai fokus utama.

Penelitian ini mengusulkan pendekatan Strategi Mitigasi Risiko Berbasis FMEA untuk pencegahan kegagalan komponen *final drive* pada *bulldozer*. Dengan mengidentifikasi *failure mode potensial*, menganalisis parameter *severity, occurrence, dan detectability*, maka akan dihitung *Risk Priority Number* (RPN) untuk setiap *failure mode*. Berdasarkan hasil RPN, akan diusulkan tindakan mitigasi (perawatan, desain ulang seal, pemilihan pelumas, protokol operasional, pelatihan operator, pemantauan kondisi) yang paling efektif dan efisien.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi teoretis dalam bidang reliabilitas dan manajemen risiko, tetapi juga manfaat praktis bagi industri peralatan berat dan perusahaan yang menggunakan *bulldozer*, dalam meningkatkan ketersediaan (*availability*), menurunkan biaya pemeliharaan, dan memperkecil risiko kegagalan yang tidak terduga.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahapan kronologis, meliputi identifikasi masalah, pengumpulan data, analisis risiko menggunakan metode FMEA, serta formulasi dan validasi strategi mitigasi. Tahap awal adalah studi pendahuluan dan identifikasi masalah untuk memahami kondisi aktual dan penyebab utama tingginya *downtime* serta biaya perawatan pada sistem *final drive bulldozer*. Data awal diperoleh melalui observasi lapangan dan wawancara dengan teknisi serta operator. Tahap berikutnya, pengumpulan data, dilakukan dengan observasi langsung, wawancara, dan analisis data historis dari *maintenance logbook*. Data mencakup jam operasi unit, waktu dan jenis kerusakan, serta tindakan perbaikan yang telah dilakukan. Selanjutnya, dilakukan identifikasi komponen dan mode kegagalan, dengan memetakan

subkomponen utama dari *final drive* (*Sprocket, sun gear, ring gear, planetary gear, bearing, planetary carrier, seal, dan housing*) serta mengidentifikasi potensi *failure mode* berdasarkan data historis dan hasil inspeksi.

Analisis risiko dilakukan menggunakan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) dengan menilai tiga parameter utama, yaitu *Severity (S)*, *Occurrence (O)*, dan *Detection (D)*. Nilai risiko dihitung menggunakan persamaan:

$$RPN=S \times O \times D \quad (1)$$

Hasil perhitungan *Risk Priority Number* (RPN) digunakan untuk menentukan prioritas risiko dan klasifikasi tingkat risiko menjadi tinggi, sedang, dan rendah. Berdasarkan hasil analisis, disusun strategi mitigasi risiko berupa penerapan *condition-based maintenance (CBM)*, penyesuaian interval pelumasan, perbaikan desain dan material, serta pelatihan operator dan penerapan sistem pemantauan getaran.

Tahap akhir adalah validasi dan evaluasi efektivitas strategi melalui implementasi dalam periode operasional tertentu dan membandingkan kondisi sebelum serta sesudah penerapan. Evaluasi dilakukan berdasarkan penurunan nilai RPN dan peningkatan reliabilitas komponen *final drive*.

Metodologi ini diharapkan mampu menghasilkan strategi mitigasi yang efektif dalam mengurangi potensi kegagalan komponen serta meningkatkan efisiensi pemeliharaan alat berat.

HASIL DAN ANALISIS

Penetapan Komponen Utama

Penetapan komponen utama pada sistem *final drive* dilakukan untuk menentukan bagian-bagian kritis yang berperan langsung dalam proses transmisi tenaga dan berpotensi mengalami kegagalan mekanis. *Final drive* pada bulldozer merupakan sistem reduksi kecepatan akhir yang berfungsi mengubah torsi tinggi dari transmisi menjadi gaya dorong pada *track chain*. Sistem ini bekerja di bawah beban berat, lingkungan keras, serta paparan kontaminan seperti debu dan partikel logam, sehingga analisis setiap komponennya sangat penting untuk mencegah kegagalan.

Berdasarkan fungsi dan posisi kerja dalam sistem transmisi, komponen utama *final drive* ditetapkan sebagai berikut: *Sprocket, sun gear, ring gear, planetary gear, bearing, planetary carrier, seal, dan housing*.

Komponen-komponen tersebut ditetapkan sebagai fokus utama dalam penelitian karena memiliki pengaruh langsung terhadap performa transmisi akhir dan keandalan sistem penggerak bulldozer. Penetapan ini menjadi dasar dalam penerapan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi potensi kegagalan dan menentukan prioritas mitigasi risiko.

FMEA Sheet

FMEA Sheet atau lembar FMEA adalah lembar yang digunakan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan dan pengaruhnya terhadap komponen *Final Drive*. Lembar ini menghitung *Risk Priority Number* (RPN) untuk setiap mode kegagalan dengan mengalikan nilai S, O dan D. Semakin tinggi RPN, maka semakin tinggi resiko kegagalan. *FMEA Sheet* juga dapat membantu untuk mengusulkan tindakan untuk mengurangi resiko setiap kegagalan. Jadi dibawah ini merupakan Tabel *FMEA Sheet* yang membahas kegagalan yang terjadi pada komponen utama pada *Final Drive*.

Tabel 1. FMEA Sheet final drive System

Syste m	final drive	Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)										Target Mitigasi		Date
		Worksheet												8/7/2025
Type	bulldozer													Page
No.	Element	Failure	Effect	S	Cause	O	Detection	D	RP N	S	O	D	RPN	Mitigate Action
1	Sproket	Keausan abrasi pada gigi akibat kontaminasi (abrasi = aus karena gesekan dan partikel kasar)	Slip dan kehilangan daya transmisi karena gigi tidak mencengkeram dengan baik	7	Kurangnya pelumasan dan masuknya kotoran dari luar menyebabkan gesekan langsung antar logam, mempercepat keausan gigi.	6	Mendeteksi suara berisik dari final drive saat bekerja serta memeriksa kondisi gigi secara langsung saat perawatan.	4	168	7	3	2	42	Jadwal pelumasan berkala (<i>menghindari gesekan langsung</i>), pembersihan sistem (<i>mengurangi kotoran abrasi</i>), inspeksi preventif
2	Sun Gear	Fraktur gigi akibat kelelahan material (fraktur = patah akibat kejutan dan beban berulang)	Tidak dapat mentransmisikan torsi, final drive gagal total	9	Gigi gear mengalami tegangan berulang karena sering menerima beban mendadak dari medan berat, hingga akhirnya patah.	5	Getaran tinggi saat kerja berat dapat dianalisis untuk melihat apakah ada tanda-tanda keausan atau keretakan gigi.	6	270	9	3	2	54	Gunakan material tahan kejutan (<i>meningkatkan daya tahan beban kejutan</i>) dan pasang shock damper (<i>meredam lonjakan torsi</i>)
3	Ring Gear	Pitting pada permukaan gigi akibat pelumasan tidak memadai (pitting = lubang kecil karena tekanan berulang)	Efisiensi menurun, getaran dan suara meningkat	6	Pelumas tidak bekerja baik atau kotor, menyebabkan tekanan tidak merata dan menimbulkan lubang kecil di permukaan gigi.	5	Menggunakan sensor getaran dan suara untuk mendeteksi tanda-tanda awal pitting sebelum kerusakan meluas.	5	150	6	3	2	36	Peningkatan kualitas pelumas (<i>mengurangi tekanan kontak</i>) dan filterisasi oli (<i>menghindari kontaminasi</i>)
4	Bearings	Retak pada raceway akibat pelumasan buruk (retak = kerusakan mikro karena tekanan dan gesekan berulang)	Gesekan meningkat, suhu tinggi, potensi kerusakan merambat ke gear	8	Tekanan kontak yang berulang antara gigi membuat permukaan gigi terkelupas dan menghasilkan kerusakan serius.	7	Spalling sering tidak terlihat langsung; pemeriksaan harus dilakukan secara menyeluruh melalui tes non-destruktif (NDT).	4	124	8	3	2	48	Tambah sensor suhu (<i>memantau panas berlebih</i>) dan gunakan filter oli (<i>menghindari partikel kasar masuk</i>)
5	Planetary Gear	Spalling pada permukaan gigi akibat kelelahan logam (spalling = pengelupasan karena tekanan kontak berulang)	Putaran terganggu, potensi macet dan kehilangan tenaga	8	Pelumasan yang buruk dan beban kerja yang berat menyebabkan retakan kecil yang sulit terlihat pada lintasan bola bearing.	6	Retakan dikenali melalui suara kasar saat beroperasi dan peningkatan suhu yang terpantau oleh sensor suhu.	3	144	8	3	2	48	mbatas torsi (<i>mencegah kelebihan beban</i>), dan inspeksi NDT (<i>deteksi retakan mikro lebih awal</i>)
6	Planetary Carrier	Retak struktural akibat getaran tinggi (retak = pecah sebagian pada rangka penopang)	Kegagalan total sistem final drive, bulldozer tidak bisa beroperasi	10	Getaran tinggi yang terus menerus dan desain struktur yang tidak cukup kuat menimbulkan retakan perlahan.	3	Pemeriksaan visual ditambah pengujian non-destruktif (NDT) efektif mendeteksi retakan tersembunyi.	6	180	10	2	2	40	Desain ulang struktur (<i>meningkatkan rigiditas</i>) dan kontrol vibrasi (<i>mengurangi beban kejutan dinamis</i>)
7	Seals	Kebocoran oli akibat deformasi dan usia pakai (kebocoran = oli keluar dari seal yang aus atau rusak)	Oli habis, pelumasan terganggu, komponen cepat rusak	6	Seal yang sudah aus atau pemasangan tidak sempurna membuat oli keluar dari sistem, mengurangi pelumasan.	4	Saat perawatan berkala, kebocoran bisa dikenali melalui noda oli atau perubahan volume oli dalam tangki.	7	168	6	2	2	24	Penggantian seal berkala (<i>mencegah kerusakan pelumasan</i>) dan pelatihan teknisi (<i>memastikan pemasangan presisi</i>)
8	Housing	Retak akibat tekanan tinggi (retak = kerusakan casing dari tegangan lokal atau cacat casting)	Oli bocor, menyebabkan kerusakan internal sistem final drive	8	Proses pengecoran yang kurang sempurna dan tekanan internal yang tinggi memicu retakan struktur luar housing.	5	Pemeriksaan visual menyeluruh dan uji tekanan sistem dapat mengungkap retakan kecil sebelum menjadi parah.	3	120	8	2	2	32	Uji tekanan (<i>mendeteksi potensi keretakan sebelum digunakan</i>) dan kontrol kualitas casting (<i>menghindari cacat sejak awal</i>)

Analisis Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) dilakukan terhadap delapan komponen utama final drive bulldozer untuk menentukan prioritas risiko kegagalan berdasarkan nilai Risk Priority Number (RPN). Hasil pengolahan data menunjukkan variasi tingkat risiko pada tiap komponen, dengan rentang RPN antara 270 (tinggi) hingga 32 (rendah). Komponen dengan RPN tinggi menjadi fokus utama strategi mitigasi risiko untuk menekan potensi downtime dan biaya perawatan.

Komponen dengan Risiko Tinggi

Komponen Sun Gear (RPN = 270) memiliki risiko tertinggi akibat fraktur gigi karena kelelahan material dan beban kejutan berulang. Kegagalan ini berdampak langsung pada kerusakan total sistem transmisi akhir. Penyebab dominan berasal dari distribusi beban torsi yang tidak seimbang serta kondisi medan operasi berat. Upaya mitigasi dilakukan dengan penggunaan material tahan kejutan, penerapan shock damper torsional,

dan inspeksi berbasis analisis getaran. Implementasi mitigasi diharapkan mampu menurunkan RPN hingga 54, yang menandakan peningkatan reliabilitas signifikan.

Komponen dengan Risiko Sedang

Beberapa komponen berada pada kategori risiko sedang, yaitu *Sprocket* (RPN = 168), *Planetary Gear* (RPN = 144), *Ring Gear* (RPN = 150) dan *Bearing* (RPN = 124). *Sprocket* mengalami keausan abrasif akibat kontaminasi partikel keras, menyebabkan slip transmisi dan penurunan efisiensi tenaga. Mitigasi dilakukan dengan pelumasan berkala, pembersihan sistem, serta inspeksi preventif untuk menghindari abrasi langsung. *Planetary Gear* memiliki mode kegagalan *spalling* pada gigi akibat beban torsi berlebih dan pelumasan tidak memadai. Pencegahan dilakukan melalui pembatasan torsi operasi dan deteksi dini menggunakan metode NDT (Non-Destructive Testing). *Ring Gear* menunjukkan gejala *pitting* pada permukaan gigi akibat kualitas pelumasan buruk dan tekanan kontak tinggi. Mitigasi difokuskan pada peningkatan kualitas pelumas dan penerapan sistem filtrasi halus (*fine filtration*) untuk mencegah kontaminasi. Komponen *Bearing* (RPN = 124) juga menunjukkan risiko sedang akibat retak pada *raceway* yang disebabkan oleh pelumasan buruk dan tekanan. Kerusakan *bearing* sering berkembang menjadi kegagalan sekunder pada gear. Pencegahan dilakukan dengan pemasangan sensor suhu untuk memantau panas berlebih dan peningkatan filtrasi oli, yang terbukti menurunkan RPN hingga 48 setelah penerapan mitigasi.

Keempat komponen ini menunjukkan bahwa faktor dominan penyebab kegagalan berasal dari sistem pelumasan yang tidak optimal dan kondisi operasi berat [13].

Komponen dengan Risiko Rendah

Komponen *Planetary Carrier* (RPN = 120), *Seals* (RPN = 168), dan *Housing* (RPN = 120) termasuk kategori risiko rendah–menengah. *Planetary Carrier* mengalami retak struktural akibat getaran tinggi. Penguatan struktur dengan material ber-rigidity tinggi dan kontrol vibrasi terbukti menurunkan RPN menjadi 40. *Seals* rentan terhadap kebocoran akibat deformasi dan keausan. Mitigasi dilakukan melalui penggantian berkala dan peningkatan ketelitian pemasangan, menurunkan RPN menjadi 24. *Housing* menunjukkan retak akibat tekanan internal tinggi dan cacat pengecoran. Mitigasi berupa uji tekanan dan kontrol kualitas casting menurunkan RPN menjadi 32, yang menunjukkan efektivitas perbaikan proses manufaktur. [14]

Analisis Komparatif dan Evaluasi Efektivitas Mitigasi

Hasil mitigasi menunjukkan bahwa seluruh komponen mengalami penurunan nilai RPN rata-rata sebesar 70–80%, dengan penurunan tertinggi terjadi pada *Sun Gear* dan *Bearing*. Tren ini menunjukkan efektivitas metode FMEA dalam menetapkan prioritas risiko dan mengarahkan tindakan pencegahan secara terukur. Penerapan tindakan berbasis RPN terbukti meningkatkan *Mean Time Between Failure* (MTBF) dan menurunkan *Mean Time To Repair* (MTTR), yang secara langsung berkontribusi pada peningkatan ketersediaan alat (*availability*). Secara keseluruhan, penerapan FMEA dalam sistem *final drive* memberikan pendekatan preventif yang sistematis terhadap kegagalan komponen kritis. Strategi mitigasi yang dihasilkan dapat dijadikan dasar pengembangan sistem *condition-based maintenance* (CBM) pada alat berat, sejalan dengan tren *predictive reliability engineering* di industri pertambangan dan konstruksi [15][8]

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) terhadap delapan komponen utama *final drive* bulldozer, dapat disimpulkan bahwa metode ini efektif dalam mengidentifikasi, mengukur, dan memprioritaskan risiko kegagalan komponen secara sistematis. Nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi ditemukan pada Sun Gear (RPN = 270), diikuti oleh Sprocket (RPN = 168), Ring Gear (RPN = 150), dan Bearing (RPN = 124). Komponen-komponen tersebut dikategorikan sebagai elemen kritis yang berpotensi menyebabkan *downtime* signifikan serta peningkatan biaya perawatan.

Penyebab utama kegagalan berasal dari beban kejut berulang, kualitas pelumasan yang tidak optimal, dan kontaminasi partikel abrasif dalam sistem. Penerapan strategi mitigasi berbasis FMEA — seperti peningkatan kualitas material, optimasi sistem pelumasan, penerapan *vibration monitoring*, dan kontrol kualitas proses — mampu menurunkan nilai RPN rata-rata sebesar 70–80%, yang mencerminkan peningkatan keandalan dan efisiensi sistem *final drive*.

Dengan demikian, pendekatan FMEA terbukti menjadi alat analitis yang efektif dalam merancang strategi mitigasi risiko berbasis prioritas, serta mendukung penerapan *risk-based maintenance* dan *condition-based maintenance* (CBM) pada peralatan berat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Nasional Yogyakarta (ITNY) yang telah mendanai publikasi ini. Selain itu juga penulis ucapkan terima kasih atas lembaga-lembaga terkait yang telah menyediakan tempat untuk melakukan survey dan pengambilan data.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Teng, F. Feng, Y. Chen, L. Xie, and B. Wen, "Failure analysis and reliability evaluation of a planetary gear box," in *Advanced Materials Research*, 2010, pp. 464–467. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.118-120.464.
- [2] "View of ANALYSIS OF DAMAGE TO FINAL DRIVE COMPONENTS OF CATERPILLAR EXCAVATOR 329 DL".
- [3] R. Sukma and P. Kurnia, "Defilement of Oil Quality of Final Drive Rear Right Excavator in Eleven-Ton Class Heavy Equipment Due to The Component Wear and Visualization on Website," 2023.
- [4] N. A. Christy, H. Pranoto, and A. Faturrahman, "Analysis of 3516 B Engine Damage on a 793 C Truck Based on Oil Using Laboratory Test Schedule Oil Sampling (SOS) Wear Data with Failure Mode Effect Analysis Method (FMEA)-NC-SA license," *International Journal of Advanced Technology in Mechanical, Mechatronics and Materials (IJATEC)*, vol. 02, no. 2, pp. 85–96, 2022, doi: 10.37869/ijatec.v3i2.63.
- [5] "View of Analisis Efektivitas Predictive Maintenance dalam Mengoptimalkan Cost Avoidance pada Final Drive Komatsu PC200-8".
- [6] F. J. Zuo, L. Yu, J. Mi, Z. Liu, and H. Z. Huang, "Reliability analysis of gear transmission with considering failure correlation," *Eksploracja i Niezawodnosc*, vol. 17, no. 4, pp. 617–623, Sep. 2015, doi: 10.17531/ein.2015.4.19.
- [7] "View of Defilement of Oil Quality of Final Drive Rear Right Excavator in Eleven-Ton Class Heavy Equipment Due to The Component Wear and Visualization on Website".
- [8] E. R. Sophie, "FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA) IN RISK ASSESSMENT OF MECHANICAL SYSTEMS." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/392238627>
- [9] D. da S. Marques, J. G. M. Maciel, M. A. de Oliveira, G. de M. Veroneze, D. L. Reis, and J. M. Da Costa Craveiro, "Application of FMEA in an Automatic Component Insertion Equipment in an Electronic Industry," *European Journal of Business and Management Research*, vol. 6, no. 6, pp. 114–118, Dec. 2021, doi: 10.24018/ejbmr.2021.6.6.1102.
- [10] A. Kusumawati, S. Safitri, L. Amanda Putra, and G. Ramayanti, "Analisis Penyebab Kerusakan Mesin Dengan Menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Di PT. Sulfindo Adiusaha."
- [11] M. Shafiee and F. Dinmohammadi, "An FMEA-based risk assessment approach for wind turbine systems: A comparative study of onshore and offshore," *Energies (Basel)*, vol. 7, no. 2, pp. 619–642, 2014, doi: 10.3390/en7020619.
- [12] R. Fitriah, Andi Ningrat, Dwi Wahyuni Rahman, Andi Rachmianty AM, Muslihati, and Wardina Suwedy, "Rubber Tyred Gantry (RTG) Failure Analysis Using FMEA Method at PT. Kaltim Kariangau Terminal Balikpapan," *Indonesian Journal of Maritime Technology*, vol. 2, no. 2, Dec. 2024, doi: 10.35718/ismatech.v2i2.1261.
- [13] H. Lyu, S. Wang, L. Ma, X. Zhang, and M. Pecht, "Reliability modeling for planetary gear transmission system considering dependent failure processes," *Qual Reliab Eng Int*, vol. 38, no. 1, pp. 229–247, Feb. 2022, doi: 10.1002/qre.2972.
- [14] M. Oliveira, S. Batista, D. Reis, G. Veroneze, and R. Maciel, "Application of fmea for improvement in the manufacturing process of mobile phones in a factory of the industrial pole of Manaus," *International Journal for Quality Research*, vol. 13, no. 4, pp. 1021–1036, 2019, doi: 10.24874/IJQR13.04-18.
- [15] L. Alexandra, "Risk-Based Inspection and Maintenance." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/392333052>