

INTEGRASI *FUEL CONSUMPTION RATE* (FCR) DAN *FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS* (FMEA) UNTUK EVALUASI EFISIENSI *EXCAVATOR* PADA PENAMBANGAN BATU GAMPING

Yelli Fitri^{1*}, Noor Oktova Fajriyah², Sri Wahyuni³

¹ Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Kota Mataram, Indonesia

² Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Kota Mataram, Indonesia

³ Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Cordova, Sumbawa Barat, Indonesia

* email Koredpondensi : yellifitri@staff.unram.ac.id

INFO ARTIKEL

Article history:

Received: 13-10-2025

Accepted: 05-12-2025

Kata Kunci:

Fuel Consumption Rate

FMEA

Efisiensi Energi

Excavator

Pertambangan Batugamping

ABSTRAK

Efisiensi energi pada *excavator* menjadi faktor strategis dalam menekan biaya operasional dan mendukung keberlanjutan pertambangan. Penelitian ini dilakukan di PT. XYZ sebuah tambang batugamping di Sumatera Barat dan bertujuan mengevaluasi efisiensi penggunaan bahan bakar pada *excavator*. Metode yang digunakan melalui pendekatan *Fuel Consumption Rate* (FCR) dan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Data dikumpulkan selama 30 hari operasional penambangan batugamping berupa jam kerja harian dan konsumsi bahan bakar. Hasil perhitungan menunjukkan total konsumsi bahan bakar sebesar 4.560 liter dengan total waktu operasi 231 jam, sehingga diperoleh rata-rata FCR sebesar 19,31 liter/jam. Analisis FMEA mengidentifikasi lima mode kegagalan utama, di mana nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi adalah 288 yang disebabkan oleh ketidaksesuaian jam kerja dengan kebutuhan lapangan. Faktor manajerial dan teknis terbukti paling memengaruhi variasi efisiensi energi. Rekomendasi perbaikan meliputi penjadwalan ulang jam kerja agar stabil 8–9 jam, program pelatihan operator, pemantauan kondisi mesin secara periodik, serta implementasi sistem monitoring bahan bakar digital. Integrasi analisis FCR dan FMEA memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi operasional *excavator* serta menjadi dasar strategi pengendalian konsumsi energi, peningkatan produktivitas, dan pengurangan risiko operasional pada industri pertambangan batugamping.

PENDAHULUAN

Dalam dunia pertambangan dan industri penggunaan alat berat sangat diperlukan karena dengan menggunakan alat berat tersebut efisiensi tenaga lebih besar sehingga mempersingkat waktu suatu pekerjaan. Penambangan batugamping di Indonesia menerapkan metode tambang terbuka (*quarry*). Dalam metode ini, kegiatan produksi utama meliputi pembersihan lahan (*stripping*), pemuatan (*loading*), dan pengangkutan (*hauling*). PT XYZ merupakan tambang batugamping yang beroperasi di Sumatera Barat. Dalam rangkaian kegiatan penambangan, *excavator* memegang peranan yang sangat penting sebagai alat gali

muat utama. Suatu pekerjaan yang menggunakan alat berat diperlukan perencanaan yang akurat agar bisa mencapai suatu target dengan biaya dan waktu yang optimal. Oleh karena itu, diperlukan suatu analisis terhadap pemakaian alat berat yang akan digunakan, sehingga dapat menghasilkan efisiensi kerja yang efisien (Sarmidi et al., 2023).

Dalam struktur biaya operasional perusahaan tambang, konsumsi bahan bakar sering kali mendominasi, hanya kalah dari biaya tenaga kerja atau bahkan menjadi komponen tertinggi. Seiring dengan fluktuasi harga komoditas global dan meningkatnya tekanan regulasi lingkungan, efisiensi energi tidak lagi menjadi pilihan tambahan, tetapi kebutuhan strategis untuk menjaga daya saing dan keberlanjutan operasi tambang. Studi Aramendia et al. (2023) melaporkan bahwa sektor pertambangan menyumbang sekitar 1,7% dari konsumsi energi akhir global, yang sebagian besar berasal dari penggunaan bahan bakar diesel pada alat angkut, *excavator* dan peralatan bergerak lainnya.

Aktivitas pertambangan identik dengan penggunaan alat berat yang memiliki jam operasional panjang dan konsumsi energi tinggi. *Fuel price* adalah komponen biaya terbesar dengan kontribusi relatif antara 38,2%- 48,5% pada periode yang diamati (Patyk & Bodziony, 2024). Oleh karena itu, upaya pengendalian konsumsi bahan bakar melalui analisis produktivitas dan efisiensi energi menjadi aspek penting dalam menekan biaya operasional sekaligus mendukung keberlanjutan proses penambangan. Beberapa peneliti menjelaskan bahwa *fuel consumption* adalah biaya operasi utama pada truk tambang dan menjelaskan kontribusi energi sekitar 40% disebutkan dalam konteks *surface mining*. Berguna untuk konteks teknis konsumsi bahan bakar alat berat (Noriega et al., 2024).

Menurut Alamsyah et al. (2024) yang menyatakan bahwa yang perlu diperhatikan, bahan bakar adalah zat yang dapat dibakar dengan cepat bersama udara dan akan menghasilkan daya dorong yang akan menggerakkan. Perawatan atau *maintenance* alat membuat komponen mesin lebih tahan lama, meningkatkan kinerjanya, dan memperpanjang umur alat. Perawatan ini juga dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan menguntungkan bagi perusahaan (Yunita & Harsiga, 2023).

Operasi penambangan modern dicirikan oleh penggunaan alat berat seperti *haul truck* dan *excavator* secara intensif, menjadikannya sektor dengan konsumsi energi yang sangat besar. Penelitian tentang pengaruh kondisi lingkungan operasi dan parameter siklus pada *haul trucks* dan *excavator* menunjukkan bahwa kemiringan dan karakteristik siklus kerja dapat menaikkan konsumsi bahan bakar dengan proporsi material. Optimasi kondisi jalan/operasi dapat memangkas konsumsi energi (Bodziony & Patyk, 2024). Oleh karena itu, optimalisasi penggunaan energi melalui analisis produktivitas menjadi salah satu strategi utama peningkatan efisiensi di sektor pertambangan.

Permasalahan yang dihadapi dalam kegiatan penambangan terkait bahan bakar adalah karena rendahnya produktivitas akan mengakibatkan *fuel ratio* yang tinggi dan melebihi standar yang ditetapkan perusahaan (Falih et al., 2021). Konsumsi bahan bakar sebagai salah satu input, dan bagaimana jam kerja efektif memengaruhi pemborosan bahan bakar karena waktu tunggu, pengoperasian tidak optimal, dll. Produktivitas aktual lebih kecil dari target karena banyak waktu tidak produktif (*waiting time*) sehingga penggunaan bahan bakar dan jam kerja tidak sepenuhnya menghasilkan output sesuai harapan. Hal tersebut menunjukkan bahwa produktivitas alat muat dan angkut sangat dipengaruhi oleh faktor seperti *cycle time* (waktu

siklus), *match factor* antara alat muat dan alat angkut, waktu tunggu, jarak angkut, dan waktu pulang kembali (Taufiq et al., 2024).

Dalam konteks teknik industri, pengukuran efisiensi energi dan produktivitas tidak hanya bertujuan untuk menurunkan biaya operasional, tetapi juga berkontribusi pada strategi keberlanjutan rantai suplai pertambangan (Heizer et al., 2020). Evaluasi hubungan jam kerja dan konsumsi bahan bakar merupakan bagian dari *work measurement* dan *operations analysis*, yang bertujuan mengidentifikasi ketidakefisienan, merancang perbaikan, serta meningkatkan efektivitas sistem kerja. *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dalam manajemen peralatan tambang berfungsi sebagai alat sistematis untuk mengidentifikasi, menilai, dan memprioritaskan kegagalan yang berpotensi mengurangi reliabilitas, meningkatkan *downtime*, serta menurunkan efisiensi energi alat berat. Dengan demikian, FMEA mendukung strategi pemeliharaan preventif sekaligus menjadi dasar pengendalian risiko operasional tambang (Odeyar et al., 2022).

Selain aspek efisiensi, reliabilitas dan risiko kegagalan operasional alat tambang juga berpengaruh signifikan terhadap performa keseluruhan. Kegagalan tak terduga dapat menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar per jam operasi, serta penurunan produktivitas alat. Untuk itu, metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) menjadi alat penting dalam mengidentifikasi potensi kegagalan, menilai dampaknya, dan menentukan prioritas tindakan perbaikan (Stamatis, 2003).

Penelitian-penelitian terkini menunjukkan bahwa penggabungan metode statistik dan FMEA atau dikenal sebagai data-driven FMEA, dapat meningkatkan objektivitas penilaian risiko dan efektivitas strategi perawatan (Filz et al., 2021). Dalam konteks pertambangan, kombinasi analisis produktivitas dan FMEA menawarkan pendekatan komprehensif. Tidak hanya menilai performa kuantitatif seperti rasio liter/jam dan utilisasi, tetapi juga mengidentifikasi faktor-faktor risiko yang memicu inefisiensi energi.

Efisiensi penggunaan bahan bakar pada *excavator* sering kali hanya dinilai dari besarnya konsumsi tanpa mempertimbangkan pengaruh jam operasi dan potensi risiko yang dapat menurunkan kinerja energi. Padahal, hubungan antara durasi kerja, tingkat konsumsi bahan bakar, dan risiko operasional penting untuk dipahami guna mendukung efisiensi dan keberlanjutan tambang batugamping. Mengingat hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara jam kerja dan konsumsi bahan bakar menggunakan *Fuel Consumption Rate* (FCR) pada *excavator* sebagai dasar evaluasi efisiensi energi, sekaligus mengidentifikasi potensi risiko operasional menggunakan pendekatan FMEA. Integrasi kedua pendekatan ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah untuk meningkatkan efisiensi operasional tambang batugamping, mengurangi pemborosan energi, serta mendukung keberlanjutan operasional dalam rantai suplai pertambangan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan memadukan pengumpulan data lapangan dan studi literatur. Fokus penelitian adalah menghitung *Fuel Consumption Rate* (FCR) sebagai indikator konsumsi bahan bakar per jam kerja, hasil analisis ini dapat dijadikan dasar untuk mengidentifikasi potensi kegagalan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) dalam operasi alat tambang (*excavator*) pada kegiatan penambangan batugamping PT. XYZ.

1. Pengumpulan Data

Data primer diperoleh secara langsung di lokasi operasi tambang melalui pencatatan jam kerja *excavator* dan jumlah konsumsi bahan bakar selama 30 hari kerja. Pencatatan dilakukan berdasarkan *logbook* operator, slip pengisian bahan bakar, serta pengamatan langsung pada aktivitas operasional alat. Data dikumpulkan selama periode tertentu. Data sekunder diperoleh dari studi literatur diambil berdasarkan jurnal-jurnal ataupun penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini.

2. Data Penelitian : Data diperoleh dari catatan operasional alat tambang berupa:

- Tanggal operasi.
- Jam mulai dan jam akhir kerja.
- Total jam kerja per hari.
- Konsumsi bahan bakar (liter).

3. Analisis Data

a. *Fuel Consumption Rate* (FCR)

FCR adalah perbandingan antara penggunaan bahan bakar (*fuel*) yang digunakan untuk kegiatan penambangan dengan jam kerja (Riswan., 2020):

$$FCR = \frac{\text{Konsumsi Bahan Bakar (liter)}}{\text{Jam Kerja (jam)}} \quad (1)$$

b. *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)

Pada penelitian ini digunakan metode FMEA dengan menentukan mode kegagalan, penyebab, dan juga efek dari kegagalan yang terjadi. Kemudian terdapat rating nilai *Severity* (S), *Occurance* (O), dan *Detection* (D) yang jika dikalikan akan menghasilkan nilai RPN (*Risk Priority Number*). Perhitungan nilai RPN tersebut sebagai berikut (Damayanti et al., 2025):

$$RPN = \text{Severity (S)} \times \text{Occurance (O)} \times \text{Detection (D)} \quad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan data dilakukan di lokasi penambangan batugamping melalui pencatatan jam kerja *excavator* dan jumlah konsumsi bahan bakar selama 30 hari kerja. Pada Tabel 1 berisi data jam kerja dan konsumsi bahan bakar *excavator*.

Tabel 1. Data Operasional *Excavator*

No	Hari/ Tanggal	Jam Kerja Alat		Bahan Bakar (Liter)	Keterangan (jam)
		Awal	Akhir		
1	03 Juni	08.00	16.00	150	8
2	04 Juni	08.00	16.00	200	8
3	05 Juni	08.00	16.00	150	8
4	06 Juni	09.00	13.00	95	4
5	07 Juni	08.00	16.00	150	8
6	08 Juni	08.00	16.00	150	8
7	09 Juni	08.00	13.00	95	5
8	10 Juni	08.00	13.00	95	5
9	11 Juni	09.00	17.00	150	8
10	12 Juni	09.00	19.00	200	10
11	13 Juni	09.00	17.00	150	8
12	14 Juni	09.00	18.00	180	9
13	15 Juni	09.00	18.00	150	9
14	16 Juni	09.00	17.00	150	8
15	17 Juni	09.00	17.00	150	8
16	18 Juni	09.00	17.00	150	8
17	19 Juni	09.00	17.00	150	8
18	22 Juni	09.00	18.00	180	9
19	23 Juni	09.00	18.00	180	9
20	24 Juni	09.00	18.00	150	9
21	25 Juni	09.00	18.00	180	9
22	26 Juni	09.00	18.00	180	9
23	27 Juni	09.00	18.00	180	9
24	01 Juli	08.00	16.00	150	8
25	02 Juli	08.00	17.00	200	9
26	03 Juli	08.00	16.00	150	8
27	04 Juli	08.00	16.00	150	8
28	05 Juli	08.00	17.00	150	9
29	06 Juli	08.00	17.00	150	9
30	07 Juli	08.00	18.00	200	10

Berdasarkan data operasional alat selama 30 hari (Juni–Juli), dengan variasi jam kerja: 4–10 jam/hari, konsumsi bahan bakar 95–200 liter/hari. Konsumsi bahan bakar tidak selalu meningkat seiring dengan jam kerja. Hari dengan jam kerja tinggi tidak selalu menunjukkan konsumsi bahan bakar tinggi, yang menandakan adanya variasi efisiensi operasional.

Analisis awal menunjukkan terdapat ketidaksesuaian antara peningkatan jam kerja dengan efisiensi konsumsi bahan bakar. Beberapa periode menunjukkan konsumsi bahan bakar

tinggi dengan output jam kerja yang relatif sama, menandakan adanya potensi pemborosan energi.

Hasil perhitungan total konsumsi bahan bakar sebanyak 4.560 liter dan durasi waktu kerja 231 jam, sehingga didapatkan hasil dari rata-rata FCR selama periode 03 Juni – 07 Juli adalah sekitar 19,31 liter/jam. Untuk menilai tingkat efisiensi nilai tersebut, dilakukan perbandingan dengan standar atau *benchmark* industri alat berat untuk *excavator* Kobelco tipe SK200, yang memiliki kapasitas kerja sekitar 20 ton. Berdasarkan data dari Kobelco Construction Machinery Global (2021), serta brosur teknis Dayakobelco (2020) konsumsi bahan bakar normal *excavator* Kobelco SK200-10 berada pada kisaran 12–15 liter per jam dalam kondisi operasi standar (*standard mode*). Dengan demikian, nilai FCR yang diperoleh dalam penelitian ini sebesar 19,31 liter/jam menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar berada pada batas atas bahkan cenderung meningkat melebihi kisaran efisien yang direkomendasikan oleh pabrikan.

Nilai FCR yang cenderung meningkat dapat menunjukkan adanya gejala awal terjadinya mode kegagalan pada sistem operasi alat. Misalnya, peningkatan FCR sering kali disertai indikasi kerusakan sistem hidrolis atau kesalahan manajemen waktu kerja alat. Dengan demikian, FCR dapat dijadikan indikator kuantitatif dalam penilaian risiko FMEA, dimana perubahan nilai FCR mencerminkan tingkat keparahan (*severity*) atau peluang kejadian (*occurrence*) dari mode kegagalan tertentu. Setelah analisis FCR dilakukan, tahap berikutnya adalah analisis FMEA, untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan mode kegagalan berdasarkan rating *Severity* (S), *Occurance* (O), dan *Detection* (D). Ketiga nilai tersebut dikalikan untuk memperoleh *Risk Priority Number* (RPN), yang menjadi dasar dalam menentukan prioritas tindakan perbaikan terhadap faktor-faktor penyebab inefisiensi.

Tabel 2. Data *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) pada *Excavator*

N o	Failure Mode	Efek Potensial (Effect)	Penyebab Potensial (Cause)	Dampak terhadap Efisiensi Energi	S	O	D	RPN
1	Waktu operasi tidak optimal (jam kerja terlalu singkat)	Produksi rendah, konsumsi bahan bakar tinggi	Penjadwalan tidak efisien, alat <i>standby</i>	Menurunkan produktivitas energi	7	6	5	210
2	Konsumsi bahan bakar berlebih per jam	Pemborosan energi, biaya operasi meningkat	Operator tidak efisien, kondisi mesin menurun	Menurunkan efisiensi energi operasional	9	5	4	180
3	Ketidaksesuaian jam kerja dengan kebutuhan lapangan	Alat sering menunggu material	Kurangnya koordinasi shift dan <i>supply material</i>	Konsumsi bahan bakar tidak sebanding output	8	6	6	288
4	Kondisi mesin tidak optimal	Pembakaran tidak sempurna, konsumsi meningkat	Perawatan tidak terjadwal	Meningkatkan konsumsi bahan bakar per jam	8	4	5	160
5	Cuaca ekstrem / kondisi jalan tambang buruk	Alat bekerja lebih berat, efisiensi menurun	Drainase jalan tidak baik	Meningkatkan beban mesin	7	5	5	175

Variasi efisiensi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kondisi alat yang tidak optimal menyebabkan konsumsi bahan bakar lebih tinggi. Faktor eksternal seperti kondisi jalan atau cuaca memengaruhi kebutuhan energi. Keterampilan operator dalam mengoperasikan alat berperan penting terhadap konsumsi bahan bakar. Nilai RPN tertinggi (288) terdapat pada ketidaksesuaian jam kerja dengan kebutuhan lapangan. Artinya, faktor manajerial dan koordinasi operasi paling berpengaruh terhadap efisiensi energi. Dengan demikian, integrasi analisis produktivitas dan FMEA menunjukkan bahwa pengaturan waktu operasi dan pemeliharaan mesin merupakan area prioritas untuk meningkatkan efisiensi energi alat tambang.

Adanya risiko operasional yang tidak selalu terlihat jelas. Sering kali, penyebabnya adalah serangkaian masalah kecil yang terakumulasi, seperti kondisi mesin yang kurang prima, kebiasaan operator yang boros, atau penjadwalan yang tidak optimal. Masalah-masalah ini merupakan risiko operasional yang perlu diidentifikasi dan dikelola. Penggunaan bahan bakar lebih besar daripada biasanya bisa dikarenakan beberapa hal seperti *land clearing*, pekerjaan general (pindah dari satu tempat ke tempat lain) ataupun adanya kerusakan excavator seperti, *low power* karena injektor dan filter kotor/rusak, *hose* pecah, silinder bocor ataupun masalah teknis lainnya.

Hasil FMEA membantu menjelaskan penyebab spesifik di balik variasi nilai FCR. Misalnya, jika FCR meningkat secara tiba-tiba, FMEA dapat menunjukkan apakah hal ini kemungkinan disebabkan oleh mode kegagalan pada sistem bahan bakar (misalnya nozzle tersumbat atau tekanan bahan bakar tidak stabil). Bila FCR tinggi namun jam kerja efektif rendah, maka kemungkinan besar terdapat mode kegagalan operasional, seperti idle time berkepanjangan atau perencanaan kerja tidak sinkron dengan kondisi lapangan. Pendekatan terpadu FCR dan FMEA memberikan dasar ilmiah bagi manajemen operasional tambang. Melalui analisis data FCR harian, inefisiensi energi dapat terdeteksi lebih awal. Mode kegagalan dominan digunakan untuk mendukung pemeliharaan prediktif, sementara pengendalian konsumsi bahan bakar pada titik operasi kritis membantu mengoptimalkan rantai suplai energi. Dengan demikian, keandalan alat berat meningkat, *downtime* berkurang, dan produktivitas dapat dicapai dengan penggunaan bahan bakar yang lebih efisien.

Dari beberapa analisis kegagalan yang telah dilakukan rekomendasi perbaikan hasil identifikasi risiko tinggi dari FMEA yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Solusi Perbaikan Hasil Identifikasi Risiko Tinggi dari FMEA

Prioritas	Rekomendasi	Kategori	Dampak pada Efisiensi
1	Penjadwalan ulang operasi agar jam kerja stabil 8–9 jam	Manajerial	↑ Efisiensi hingga 10–15%
2	Program pelatihan operator efisiensi bahan bakar	SDM	↓ Konsumsi liter/jam
3	Pemantauan kondisi mesin secara periodik (filter, injektor dll)	Teknis	↑ Pembakaran sempurna
4	Implementasi sistem monitoring bahan bakar digital	Teknologi	↑ Deteksi dini anomali konsumsi

Secara keseluruhan, keempat rekomendasi ini menegaskan bahwa efisiensi energi excavator dapat dicapai melalui kombinasi aspek manajerial, peningkatan kompetensi SDM, pemeliharaan teknis, serta dukungan teknologi digital. Integrasi keempat strategi ini diharapkan mampu menekan konsumsi bahan bakar, mengurangi biaya operasional, serta mendukung keberlanjutan pertambangan.

Tuntutan keberlanjutan (*sustainability*) saat ini tidak lagi sekadar terkait faktor biaya, melainkan juga menjadi respon atas tekanan global agar industri pertambangan beroperasi secara lebih ramah lingkungan. Dengan demikian, pengurangan konsumsi bahan bakar tidak hanya memberikan keuntungan finansial, tetapi juga berkontribusi pada penurunan emisi karbon serta sejalan dengan prinsip operasional berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa analisis hubungan jam kerja dengan konsumsi bahan bakar dapat menjadi indikator penting dalam mengukur produktivitas dan efisiensi operasional alat tambang. Hasil menunjukkan rata-rata *Fuel Consumption Rate* (FCR) excavator sebesar 19,31 liter/jam. Analisis FMEA mengidentifikasi bahwa faktor manajerial, khususnya ketidaksesuaian jam kerja dengan kebutuhan lapangan, memberikan nilai RPN tertinggi (288). Hal ini menegaskan bahwa pengelolaan jadwal kerja lebih berpengaruh dibandingkan faktor teknis tunggal. Kebaruan penelitian ini adalah integrasi metode FCR dan FMEA, FCR menyediakan ukuran kuantitatif efisiensi energi, FMEA menjelaskan akar penyebab teknis dan operasional dari inefisiensi tersebut. Integrasi keduanya tidak hanya memperkuat evaluasi performa alat, tetapi juga memberikan dasar untuk pengambilan keputusan berbasis risiko dan diharapkan dapat menjadi referensi bagi perusahaan tambang dalam merancang strategi penghematan bahan bakar, menurunkan biaya operasional, serta mendukung keberlanjutan rantai suplai pertambangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alamsyah, M. I., Franto, F., & Andini, D. E. (2024). Analisis Konsumsi Bahan Bakar Alat Muat dan Angkut pada Pengupasan Overburden di PT Putra Maga Nanditama Bengkulu Utara. *MINERAL*, 9(2), 75–81.
- Aramendia, E., Brockway, P. E., Taylor, P. G., & Norman, J. (2023). Global Energy Consumption of The Mineral Mining Industry: Exploring The Historical Perspective and Future Pathways to 2060. *Global Environmental Change*, 83, 102745.
- Bodziony, P., & Patyk, M. (2024). The Influence of The Mining Operation Environment on The Energy Consumption and Technical Availability of Truck Haulage Operations in Surface Mines. *Energies*, 17(11), 2654.
- Damayanti, F. R., Prabaswari, A., Phadil, A., & Kurnia, R. D. (2025). Analisis Potensi Kegagalan pada Kiln Menggunakan FMEA (Studi Kasus: PT Xyz Tbk Pabrik Cilacap). *Journal of Industrial Engineering and Innovation*, 2(01), 39–46.
- Dayakobelco. (2020). *SCOOP_20: Kobelco SK200-10 Brochure* [PDF brochure]. Dayakobelco. https://www.dayakobelco.com/media/magazine/fn1v630000000516att/SCOOP_20.pdf
- Falih, R. N., Marwanza, I., & Herdyanti, M. K. (2021). Analisis Penggunaan Bahan Bakar Alat Muat dan Alat Angkut dalam Kegiatan Pengupasan Overburden. *Indonesian Mining and Energy Journal*, 4(2), 101–108.
- Filz, M.-A., Langner, J. E. B., Herrmann, C., & Thiede, S. (2021). Data-Driven Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) to Enhance Maintenance Planning. *Computers in Industry*, 129, 103451.
- Heizer, J., Render, B., Munson, C. L., & Griffin, P. (2020). *Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management*.
- Kobelco Construction Machinery Global. (2021). *SK200 / SK210LC-10 Product Catalog* [PDF]. Kobelco Construction Machinery Global. https://www.kobelcocm-global.com/products/excavators/ame/pdf/SK200_SK210LC-10.pdf
- Noriega, I. I., Gutiérrez, A. S., & Eras, J. J. C. (2024). Energy and Exergy Assessment of Heavy-Duty Mining Trucks. Discussion of Saving Opportunities. *Heliyon*, 10(3).
- Odeyar, P., Apel, D. B., Hall, R., Zon, B., & Skrzypkowski, K. (2022). A Review of Reliability and Fault Analysis Methods for Heavy Equipment and Their Components Used in Mining. *Energies*, 15(17), 6263.
- Patyk, M., & Bodziony, P. (2024). Empirical Analysis of Mining Costs Amid Energy Price Volatility for Secondary Deposits in Quarrying. *Energies*, 17(3), 718.
- Riswan, R. (2020). Analisis Kegiatan Produktivitas terhadap Fuel Ratio Alat Angkut dan Alat Gali Muat pada Pit 2 di PT Pro Sarana Cipta. *Jurnal Himasapta*.
- Sarmidi, S., Mases, Y., & Kesuma, A. P. (2023). Analisis Efisiensi Jam Kerja Excavator CAT 345 GC di Area Penambangan Pit E Banko Barat PT. Rifansi Dwi Putra. *Jurnal Ilmiah Teknik Dan Sains*, 1(1), 11–18.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis*. Quality Press.
- Taufiq, M. R., Putri, F. A. R., & Fanani, Y. (2024). Productivity Analysis of Digging, Loading, and Hauling Equipment in Overburden Removal Activities at PT. Anugrah Borneo Sinergy in Keramat Mina Field, South Kalimantan, Indonesia. *Journal of Earth and Marine Technology (JEMT)*, 5(1), 66–79.
- Yunita, Y., & Harsiga, E. (2023). Analisis Fuel Ratio pada Project Penambangan di Pit 1 PT Cahaya Riau Mandiri Jobsite PT Duta Alam Sumatera. *MINERAL*, 8(1), 39–46.