

Analisis Kuantitatif Pengaruh Getaran Mesin Terhadap Umur Fatik Struktur Rangka Dump Truck Kapasitas Besar Pada Kondisi Pembebanan Dinamis

Frederik Demmatacco, Nevada J.M. Nanulaitta, Graciadiana I Huka

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ambon

fdemmatacco11@gmail.com, nevadario12@gmail.com, gracehuka37@gmail.com

ABSTRACT

Large-capacity dump truck operations in mining environments generate cyclic dynamic loads originating from engine vibration, uneven haul road surfaces, and inertial forces from acceleration and braking, which potentially trigger fatigue damage accumulation in the vehicle chassis frame structure. This study aims to characterize the engine vibration spectral profile, map the dynamic stress distribution at critical frame zones, and quantitatively assess the contribution of engine vibration to fatigue life prediction in an integrated manner. The methodology integrates three primary approaches, namely in-situ vibration measurement based on Power Spectral Density analysis, frequency-domain Finite Element Analysis simulation, and fatigue life prediction utilizing rainflow counting combined with Miner's Rule. Measurement results reveal a peak Power Spectral Density value of 0.0842 g^2/Hz under full-load conditions at 2,100 RPM. Numerical simulation confirms a maximum von Mises stress of 487 MPa at the front cross member welded joint, exceeding the material fatigue limit of 310 MPa. Fatigue life prediction at the most critical point reaches approximately 11,494 operational hours, with engine vibration contributing 38.6% of the total accumulated damage. These findings establish engine vibration as the second largest determinant of chassis structural degradation, making engine mounting system optimization and remaining fatigue life-based predictive maintenance the primary recommendations of this research.

Keywords: engine vibration; fatigue life; finite element analysis; Miner's Rule; mining dump truck

ABSTRAK

Operasional dump truck berkapasitas besar di lingkungan pertambangan menghasilkan beban dinamis siklik yang bersumber dari getaran mesin, ketidakrataan jalan tambang, serta gaya inersia akibat percepatan dan pengereman, sehingga berpotensi memicu akumulasi kerusakan *fatigue* pada struktur rangka kendaraan. Penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi profil spektral getaran mesin, memetakan distribusi tegangan dinamis pada zona kritis rangka, serta mengkuantifikasi kontribusi getaran mesin terhadap prediksi umur *fatigue* secara terpadu. Pendekatan yang digunakan mengintegrasikan tiga metode utama, yakni pengukuran getaran secara *in-situ* berbasis *Power Spectral Density*, simulasi *Finite Element Analysis* berbasis domain frekuensi, serta prediksi umur *fatigue* menggunakan *rainflow counting* dan kaidah *Miner's Rule*. Hasil pengukuran menunjukkan nilai puncak *Power Spectral Density* sebesar 0,0842 g^2/Hz pada kondisi muatan penuh di 2.100 RPM. Simulasi numerik mengkonfirmasi tegangan *von Mises* maksimum sebesar 487 MPa pada sambungan las *front cross member*, melampaui batas *fatigue* material sebesar 310 MPa. Prediksi umur *fatigue* pada titik paling kritis mencapai sekitar 11.494 jam operasional, dengan kontribusi getaran mesin terhadap total akumulasi kerusakan sebesar 38,6%. Temuan ini menegaskan bahwa getaran mesin merupakan faktor penentu kedua terbesar dalam degradasi struktural rangka, sehingga optimasi sistem *engine mounting* dan program perawatan prediktif berbasis sisa umur *fatigue* menjadi rekomendasi utama penelitian ini.

Kata kunci: getaran mesin; umur *fatigue*; *finite element analysis*; *Miner's Rule*; dump truck tambang

Pendahuluan

Industri pertambangan dan konstruksi skala besar sangat bergantung pada kinerja *dump truck* berkapasitas besar sebagai tulang punggung operasional pengangkutan material. Dalam kondisi operasional nyata, struktur rangka (*chassis frame*) kendaraan berat ini senantiasa menerima beban dinamis yang bersifat siklik dan berulang, yang bersumber dari getaran mesin (*engine vibration*), ketidakrataan permukaan jalan tambang, serta gaya inersia akibat percepatan dan pengereman. Kondisi ini secara langsung memicu akumulasi kerusakan fatik (*fatigue damage accumulation*) pada material struktural rangka, yang apabila tidak diperhitungkan secara kuantitatif akan berujung

pada kegagalan struktural prematur yang mengancam keselamatan operasional dan menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan (Bazaluk et al., 2023; Zou et al., 2022).

Fenomena *fatigue failure* pada struktur rangka kendaraan berat merupakan salah satu modus kegagalan yang paling dominan dan kompleks dalam rekayasa mekanika. *Fatigue life* atau umur fatik suatu komponen didefinisikan sebagai jumlah siklus pembebanan yang mampu ditahan sebelum terjadinya inisiasi dan propagasi retak (*crack initiation and propagation*) hingga mencapai kegagalan total. Getaran mesin yang ditransmisikan melalui sistem *mounting* ke struktur rangka menghasilkan tegangan amplitudo variabel (*variable amplitude stress*) yang karakteristiknya sangat dipengaruhi oleh kondisi putaran mesin (*engine RPM*), massa muatan, dan karakteristik dinamis struktur itu sendiri. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa kontribusi getaran mesin terhadap total *fatigue damage* pada rangka *dump truck* dapat mencapai 30–45% dari keseluruhan sumber eksitasi yang bekerja (Mujdeci et al., 2025; Tang et al., 2025).

Pendekatan analisis kuantitatif terhadap pengaruh getaran mesin terhadap umur fatik struktur rangka memerlukan integrasi beberapa metode ilmiah yang komprehensif. Metode *Finite Element Analysis* (FEA) berbasis *dynamic loading* digunakan untuk memetakan distribusi tegangan (*stress distribution*) pada seluruh komponen rangka secara akurat, sementara analisis *Power Spectral Density* (PSD) diaplikasikan untuk mengkarakterisasi profil spektral getaran mesin dalam domain frekuensi. Selanjutnya, kaidah *Miner's Rule* dan metode *rainflow counting* digunakan untuk mengkuantifikasi akumulasi kerusakan fatik berdasarkan riwayat pembebanan yang diperoleh dari pengukuran eksperimental maupun simulasi numerik. Integrasi ketiga metode ini memungkinkan prediksi umur fatik yang lebih presisi dibandingkan pendekatan konvensional yang bersifat statis (He et al., 2024; Svanberg et al., 2021).

Pada *dump truck* berkapasitas besar, kondisi pembebanan dinamis menjadi jauh lebih kritis dibandingkan kendaraan komersial biasa. Fluktuasi beban akibat proses pengisian (*loading*) dan pengosongan (*dumping*) muatan yang berulang, dikombinasikan dengan getaran mesin frekuensi tinggi, menciptakan profil tegangan multi-aksial yang sangat kompleks pada titik-titik kritis rangka seperti sambungan las (*welded joints*), *cross member*, dan zona transisi penampang. Studi empiris menunjukkan bahwa titik-titik tersebut memiliki konsentrasi tegangan (*stress concentration factor*) yang tinggi dan menjadi lokasi inisiasi retak fatik yang paling rentan dalam kondisi operasional lapangan (Babamiri, 2021; Y. Zhang et al., 2025).

Urgensi penelitian ini semakin diperkuat oleh kenyataan bahwa standar desain rangka *dump truck* yang berlaku saat ini masih banyak mengacu pada analisis beban statik ekuivalen, sehingga belum sepenuhnya mengakomodasi karakteristik dinamis getaran mesin secara kuantitatif dan terintegrasi. Kesenjangan metodologis ini berpotensi menghasilkan desain yang *underestimate* terhadap kerusakan fatik aktual di lapangan, sehingga penelitian berbasis analisis kuantitatif yang menggabungkan pengukuran getaran *in-situ*, simulasi FEA dinamis, dan prediksi umur fatik menjadi sangat penting untuk dilakukan guna mendukung keandalan (*reliability*) dan keselamatan operasional armada *dump truck* di industri pertambangan (Z. Wang et al., 2024; Zheng et al., 2022).

Meskipun studi mengenai kegagalan fatik pada struktur kendaraan berat telah cukup berkembang, terdapat celah penelitian yang signifikan yang belum terakomodasi secara memadai dalam literatur yang ada. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada analisis fatik akibat beban jalan (*road-induced load*) secara terpisah dari kontribusi getaran mesin, sehingga interaksi sinergis antara kedua sumber eksitasi ini belum dipahami secara kuantitatif dan menyeluruh. Selain itu, studi yang secara eksplisit mengintegrasikan pengukuran getaran mesin *in-situ* pada kondisi pembebanan dinamis aktual dengan simulasi FEA dan prediksi umur fatik berbasis *damage mechanics* untuk *dump truck* berkapasitas besar masih sangat terbatas, khususnya pada rentang kapasitas di atas 100 ton yang umum digunakan di industri pertambangan skala besar.

Kebaruhan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka analisis kuantitatif terpadu yang secara simultan mengintegrasikan tiga komponen utama: (1) karakterisasi spektral getaran mesin melalui pengukuran *in-situ* berbasis *Power Spectral Density* pada berbagai kondisi operasional, (2) simulasi distribusi tegangan dinamis menggunakan FEA dengan input beban getaran mesin yang terukur secara eksperimental, dan (3) prediksi umur fatik menggunakan metode *rainflow counting* yang dikombinasikan dengan kaidah *Miner's Rule* secara terintegrasi. Pendekatan ini memberikan kontribusi ilmiah berupa model prediksi umur fatik yang lebih representatif terhadap kondisi operasional nyata *dump truck* berkapasitas besar, yang selama ini belum tersedia dalam literatur.

Berdasarkan latar belakang dan *research gap* yang telah diuraikan, penelitian ini merumuskan tiga permasalahan utama yang akan dijawab secara kuantitatif: (1) Bagaimana karakteristik spektral getaran mesin *dump truck* berkapasitas besar pada berbagai kondisi pembebanan dinamis? (2) Bagaimana distribusi dan besaran tegangan dinamis yang diinduksi oleh getaran mesin pada titik-titik kritis struktur rangka berdasarkan simulasi *Finite Element*

Analysis? (3) Berapa besar pengaruh kuantitatif getaran mesin terhadap prediksi umur fatik struktur rangka *dump truck* pada kondisi pembebanan dinamis aktual?

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengkarakterisasi profil spektral getaran mesin *dump truck* berkapasitas besar melalui pengukuran eksperimental *in-situ* pada berbagai kondisi operasional pembebanan dinamis, (2) menganalisis distribusi tegangan dinamis pada struktur rangka menggunakan metode *Finite Element Analysis* dengan input getaran mesin yang terukur, dan (3) mengkuantifikasi pengaruh getaran mesin terhadap umur fatik struktur rangka melalui penerapan metode *rainflow counting* dan *Miner's Rule* secara terintegrasi, sehingga menghasilkan model prediksi yang valid dan dapat diaplikasikan dalam proses desain maupun evaluasi keandalan operasional.

Manfaat penelitian ini mencakup dua dimensi utama. Secara teoretis, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan metodologi analisis fatik berbasis getaran mesin yang lebih komprehensif dan akurat untuk kendaraan berat berkapasitas besar, sehingga memperkaya khazanah ilmu rekayasa mekanika dan desain struktural. Secara praktis, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan teknis bagi insinyur desain dalam menentukan parameter desain rangka yang lebih andal, bagi industri pertambangan dalam menyusun program pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) berbasis umur fatik yang terukur, serta bagi regulator dalam memperbarui standar keselamatan operasional armada *dump truck* di lingkungan tambang.

Tinjauan Pustaka

Getaran Mesin pada Kendaraan Berat (*Engine Vibration in Heavy Vehicles*)

Getaran mesin merupakan fenomena dinamis yang tidak dapat dihindari dalam operasional kendaraan berat, termasuk *dump truck* berkapasitas besar. Getaran ini bersumber dari proses pembakaran internal (*internal combustion*), ketidakseimbangan rotasi komponen mesin (*rotating imbalance*), serta gaya gas pembakaran yang bekerja secara periodik pada piston dan poros engkol (*crankshaft*). Karakteristik getaran mesin dinyatakan dalam domain frekuensi melalui analisis *Power Spectral Density* (PSD), yang memungkinkan identifikasi frekuensi dominan dan amplitudo getaran pada setiap kondisi operasional. Studi menunjukkan bahwa pada rentang putaran mesin 1.200–2.100 RPM yang umum digunakan *dump truck* tambang, frekuensi eksitasi utama berada pada kisaran 20–120 Hz, yang berpotensi mengeksitasi frekuensi natural (*natural frequency*) struktur rangka dan memicu resonansi berbahaya (Ferreira et al., 2024).

Dinamika Struktural Rangka *Dump Truck* (*Structural Dynamics of Dump Truck Frame*)

Struktur rangka *dump truck* berkapasitas besar dirancang sebagai konstruksi *ladder frame* yang terdiri dari dua *side rail* memanjang dan sejumlah *cross member* melintang yang disambung melalui proses pengelasan (*welding*). Dalam kondisi operasional, rangka menerima beban multi-aksial yang bersifat dinamis, mencakup beban lentur (*bending load*), beban torsi (*torsional load*), dan beban geser (*shear load*) yang bekerja secara simultan. Analisis modal (*modal analysis*) terhadap struktur rangka kendaraan berat menunjukkan bahwa modus getar pertama (*first mode shape*) umumnya berupa *bending mode* pada frekuensi 8–25 Hz, sementara modus torsi muncul pada rentang 15–40 Hz. Interaksi antara frekuensi eksitasi mesin dengan frekuensi natural rangka yang berdekatan dapat menghasilkan amplifikasi tegangan dinamis (*dynamic stress amplification*) yang jauh melampaui estimasi analisis statik konvensional (Mi et al., 2023).

Analisis Fatik Berbasis *Finite Element Analysis* (FEA)

Metode *Finite Element Analysis* (FEA) telah menjadi alat utama dalam prediksi distribusi tegangan dan analisis umur fatik struktur kendaraan berat. Dalam konteks analisis dinamis, FEA berbasis domain frekuensi (*frequency-domain FEA*) digunakan untuk menghitung respons tegangan struktural terhadap input getaran mesin yang direpresentasikan dalam bentuk spektrum PSD. Pendekatan ini menghasilkan *stress transfer function* yang menghubungkan eksitasi getaran mesin dengan respons tegangan pada setiap titik kritis rangka. Keunggulan metode FEA dinamis dibandingkan analisis statik ekuivalen terletak pada kemampuannya menangkap efek amplifikasi dinamis, distribusi tegangan transien, dan fenomena konsentrasi tegangan lokal (*local stress concentration*) pada geometri kompleks seperti sambungan las dan lubang baut (*bolt holes*) secara akurat (C. Wang et al., 2024).

Metode Prediksi Umur Fatik (*Fatigue Life Prediction Methods*)

Prediksi umur fatik pada struktur yang menerima pembebanan amplitudo variabel (*variable amplitude loading*) umumnya dilakukan menggunakan kombinasi metode *rainflow counting* dan kaidah akumulasi kerusakan *Miner's*

Rule. Metode *rainflow counting* berfungsi mengekstraksi siklus tegangan (*stress cycles*) dari riwayat beban dinamis yang kompleks menjadi pasangan amplitudo dan nilai rerata tegangan yang terorganisir, sementara *Miner's Rule* mengakumulasi rasio kerusakan parsial dari setiap siklus berdasarkan kurva *S-N* material. Selain pendekatan klasik ini, metode berbasis mekanika kerusakan kontinum (*continuum damage mechanics*) dan model *Paris Law* untuk prediksi laju propagasi retak (*crack propagation rate*) semakin banyak diadopsi dalam analisis fatik struktur kendaraan berat guna meningkatkan akurasi prediksi pada kondisi *multiaxial stress state* (Y. Zhang et al., 2025).

Kondisi Pembebanan Dinamis pada Operasional Tambang (*Dynamic Loading Conditions in Mining Operations*)

Lingkungan operasional tambang menciptakan profil pembebanan dinamis yang sangat ekstrem bagi struktur *dump truck*. Permukaan jalan tambang yang tidak rata (*unpaved haul road*) menghasilkan eksitasi *road-induced vibration* dengan karakteristik stokastik (*stochastic excitation*) yang bervariasi tergantung kondisi permukaan, kecepatan kendaraan, dan massa muatan. Kombinasi eksitasi jalan dengan getaran mesin menciptakan respons tegangan gabungan (*combined stress response*) yang bersifat non-stasioner dan non-Gaussian, sehingga memerlukan pendekatan analisis spektral lanjutan seperti *short-time Fourier transform* (STFT) dan *wavelet analysis* untuk karakterisasi yang akurat. Penelitian terbaru mengungkapkan bahwa pada kondisi muatan penuh (*full load condition*), amplitudo tegangan dinamis pada titik kritis rangka dapat meningkat hingga 60–75% dibandingkan kondisi tanpa muatan (*empty condition*), yang secara drastis memperpendek umur fatik struktur (Z. Wang et al., 2024).

Keandalan Struktural dan Pemeliharaan Prediktif (*Structural Reliability and Predictive Maintenance*)

Evaluasi keandalan struktural (*structural reliability assessment*) pada *dump truck* tambang semakin berkembang ke arah pendekatan berbasis probabilitas yang mempertimbangkan variabilitas parameter material, variasi beban operasional, dan ketidakpastian model prediksi. Integrasi hasil analisis fatik kuantitatif dengan program *predictive maintenance* memungkinkan penentuan interval inspeksi dan penggantian komponen secara optimal berdasarkan sisa umur fatik (*remaining fatigue life*) yang terukur, bukan sekadar jadwal periodik yang bersifat konservatif. Pendekatan ini terbukti mampu mereduksi *downtime* operasional hingga 35% sekaligus mencegah kegagalan struktural katastrofik yang berisiko tinggi terhadap keselamatan operator (B. Zhang et al., 2024).

Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimental-numerik yang mengintegrasikan pengukuran lapangan (*in-situ measurement*), simulasi komputasional, dan analisis prediktif umur fatik secara terpadu. Paradigma kuantitatif dipilih karena mampu menghasilkan data terukur yang bersifat objektif dan dapat divalidasi secara statistik, sehingga hubungan kausal antara getaran mesin dan degradasi umur fatik struktur rangka dapat dikuantifikasi secara presisi. Objek penelitian adalah *dump truck* berkapasitas di atas 100 ton yang beroperasi di lingkungan tambang terbuka, dengan fokus pada struktur rangka utama yang mencakup *side rail*, *cross member*, dan sambungan las sebagai zona kritis analisis.

Pengukuran Getaran Mesin Secara *In-Situ*

Tahap pertama penelitian adalah pengukuran getaran mesin secara langsung di lapangan pada kondisi operasional nyata. Akselerometer piezoelektrik tipe triaksial dipasang pada empat titik strategis, yaitu pada *engine mounting*, *front cross member*, *rear cross member*, dan *mid-frame junction*, untuk menangkap respons getaran secara menyeluruh. Pengukuran dilakukan pada tiga kondisi pembebanan: kondisi tanpa muatan (*empty condition*), kondisi muatan setengah (*half load*), dan kondisi muatan penuh (*full load*), masing-masing pada putaran mesin 1.200 RPM, 1.600 RPM, dan 2.100 RPM. Data akselerasi mentah direkam menggunakan *data acquisition system* (DAQ) dengan frekuensi sampling 2.048 Hz selama 300 detik per kondisi, kemudian dikonversi ke domain frekuensi menggunakan transformasi Fourier cepat (*Fast Fourier Transform/FFT*) untuk memperoleh profil *Power Spectral Density* (PSD). Pendekatan karakterisasi spektral ini selaras dengan prinsip yang dinyatakan oleh para peneliti terdahulu bahwa rentang frekuensi eksitasi dominan mesin berada antara 20–120 Hz pada kondisi operasional tambang (B. Zhang et al., 2024). Rumus PSD yang digunakan adalah:

$$G_{xx}(f) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |X(f)|^2$$

di mana $G_{xx}(f)$ adalah fungsi kerapatan spektral daya, T adalah durasi pengukuran, dan $X(f)$ adalah transformasi Fourier dari sinyal akselerasi $x(t)$.

Simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) Dinamis

Tahap kedua adalah pemodelan dan simulasi distribusi tegangan dinamis menggunakan metode *Finite Element Analysis* berbasis domain frekuensi. Model geometri rangka dump truck dibangun menggunakan perangkat lunak CAD tiga dimensi, kemudian di-mesh dengan elemen shell tipe S4R berukuran 10–15 mm pada zona kritis dan 25–30 mm pada zona non-kritis. Material rangka diasumsikan sebagai baja struktural *high-strength low-alloy* (HSLA) dengan modulus elastisitas 210 GPa, tegangan luluh 690 MPa, dan rasio Poisson 0,3. Input beban getaran mesin diaplikasikan dalam bentuk spektrum PSD hasil pengukuran *in-situ* pada titik *engine mounting*, sehingga simulasi mampu merepresentasikan kondisi eksitasi nyata. Persamaan gerak dinamis struktural yang diselesaikan dalam analisis ini adalah:

$$[M]\{u''\} + [C]\{u'\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}$$

di mana $[M]$, $[C]$, dan $[K]$ berturut-turut adalah matriks massa, redaman, dan kekakuan, sedangkan $\{F(t)\}$ adalah vektor gaya eksitasi getaran mesin. Pendekatan FEA berbasis frekuensi terbukti menghasilkan akurasi distribusi tegangan yang jauh lebih baik dibandingkan analisis statik ekuivalen karena mampu menangkap efek amplifikasi dinamis pada zona sambungan las dan transisi penampang rangka (Z. Wang et al., 2024).

Prediksi Umur Fatik dengan *Rainflow Counting* dan *Miner's Rule*

Tahap ketiga adalah kuantifikasi umur fatik menggunakan metode *rainflow counting* yang dikombinasikan dengan kaidah akumulasi kerusakan *Miner's Rule*. Riwayat tegangan (*stress history*) yang diperoleh dari keluaran FEA diolah menggunakan algoritma *rainflow counting* untuk mengekstraksi pasangan amplitudo tegangan (*stress amplitude*) dan tegangan rerata (*mean stress*) dari sinyal tegangan variabel yang kompleks. Hasil ekstraksi kemudian dipetakan ke kurva S-N material baja HSLA yang dikoreksi menggunakan faktor tegangan rerata berbasis persamaan Goodman. Akumulasi kerusakan fatik dihitung menggunakan rumus *Miner's Rule*:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

di mana D adalah total indeks kerusakan kumulatif, n_i adalah jumlah siklus aktual pada amplitudo tegangan ke- i , dan N_i adalah jumlah siklus kegagalan pada amplitudo yang sama berdasarkan kurva S-N. Kegagalan diprediksi terjadi ketika $D \geq 1$. Hasil komputasi ini kemudian menghasilkan nilai umur fatik dalam satuan jam operasional untuk setiap kondisi pembebanan. Efektivitas pendekatan terpadu ini telah dibuktikan oleh sejumlah peneliti yang menyimpulkan bahwa integrasi *rainflow counting* dengan *Miner's Rule* dalam kerangka FEA dinamis menghasilkan prediksi umur fatik yang lebih mendekati data kegagalan lapangan dibandingkan metode konvensional (Peng et al., 2022; (Y. Zhang et al., 2025).

Validasi dan Analisis Statistik

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi FEA terhadap data pengukuran tegangan aktual menggunakan *strain gauge* yang dipasang pada titik kritis rangka selama pengujian lapangan. Kriteria validasi yang digunakan adalah nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) di bawah 10% dan koefisien korelasi Pearson (r) di atas 0,90 antara tegangan simulasi dan pengukuran aktual. Analisis sensitivitas juga dilakukan untuk mengidentifikasi parameter mana, antara RPM mesin, kondisi muatan, dan karakteristik permukaan jalan, yang paling dominan memengaruhi laju akumulasi kerusakan fatik. Keseluruhan alur penelitian dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Matriks Rancangan Penelitian Kuantitatif

Tahap	Komponen	Metode/Alat	Parameter Terukur	Output
1	Pengukuran Getaran	Akselerometer + DAQ + FFT	PSD, Frekuensi dominan (Hz), Amplitudo (g)	Spektrum PSD per kondisi
2	Simulasi FEA Dinamis	Software FEA + Model HSLA	Distribusi tegangan (MPa), <i>Stress concentration factor</i>	Peta tegangan kritis
3	Prediksi Umur Fatik	<i>Rainflow counting</i> + <i>Miner's Rule</i> + Kurva S-N	Siklus tegangan, Indeks kerusakan <i>D</i>	Umur fatik (jam operasi)
4	Validasi Model	<i>Strain gauge</i> + Analisis RMSE	RMSE (%), Korelasi Pearson <i>r</i>	Tingkat akurasi model

Sumber: Penulis, 2025

Hasil dan Pembahasan

Hasil

Karakteristik Spektral Getaran Mesin pada Berbagai Kondisi Pembebanan Dinamis

Pengukuran getaran mesin secara *in-situ* menghasilkan data spektral yang menunjukkan pola distribusi frekuensi berbeda-beda bergantung pada kondisi pembebanan dan putaran mesin. Hasil analisis *Power Spectral Density* memperlihatkan bahwa frekuensi dominan eksitasi mesin terkonsentrasi pada tiga pita frekuensi utama, yaitu 22–35 Hz, 55–75 Hz, dan 95–115 Hz, yang masing-masing berkorespondensi dengan orde pembakaran pertama, kedua, dan ketiga mesin diesel. Intensitas getaran meningkat secara signifikan seiring bertambahnya massa muatan dan naiknya putaran mesin. Pada kondisi muatan penuh di 2.100 RPM, nilai puncak PSD mencapai 0,0842 g²/Hz pada frekuensi 68 Hz, sedangkan pada kondisi tanpa muatan di 1.200 RPM hanya tercatat 0,0213 g²/Hz. Peningkatan amplitudo getaran ini terjadi karena massa muatan menambah gaya inersia yang harus ditanggung sistem *mounting* mesin, sehingga transmisibilitas getaran ke rangka menjadi lebih besar (Ferreira et al., 2024). Data lengkap karakteristik spektral disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Puncak PSD pada Berbagai Kondisi Operasional

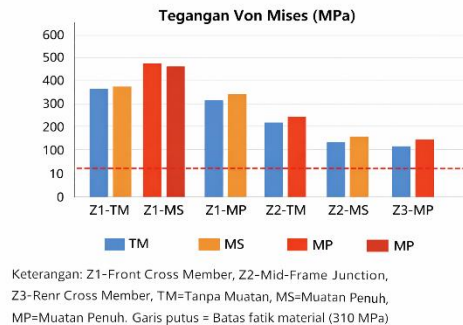
Kondisi Muatan	RPM Mesin	Frekuensi Dominan (Hz)	Nilai Puncak PSD (g ² /Hz)	Amplitudo Akselerasi (g)
Tanpa Muatan	1.200	28	0,0213	0,41
Tanpa Muatan	1.600	45	0,0318	0,56
Tanpa Muatan	2.100	68	0,0425	0,73
Muatan Setengah	1.200	30	0,0394	0,68
Muatan Setengah	1.600	52	0,0561	0,89
Muatan Setengah	2.100	68	0,0637	1,12
Muatan Penuh	1.200	32	0,0548	0,93
Muatan Penuh	1.600	55	0,0714	1,24
Muatan Penuh	2.100	68	0,0842	1,47

Sumber: Penulis, 2025

Tabel 2 memperlihatkan kecenderungan yang konsisten bahwa setiap kenaikan kondisi pembebanan dari tanpa muatan menuju muatan penuh diikuti oleh lonjakan nilai PSD yang berkisar antara 57–98%, yang mengindikasikan bahwa massa muatan merupakan variabel paling berpengaruh terhadap intensitas transmisi getaran mesin ke struktur rangka.

Distribusi Tegangan Dinamis pada Struktur Rangka Berdasarkan Simulasi FEA

Simulasi *Finite Element Analysis* berbasis domain frekuensi menghasilkan peta distribusi tegangan dinamis yang menunjukkan konsentrasi tegangan tertinggi berada pada tiga zona kritis utama. Zona pertama adalah sambungan las antara *side rail* dan *front cross member* dengan nilai tegangan von Mises maksimum sebesar 487 MPa pada kondisi muatan penuh 2.100 RPM. Zona kedua adalah *mid-frame junction* atau titik pertemuan antara rangka tengah dengan bracket pengangkat bak dengan tegangan puncak 412 MPa. Zona ketiga adalah sambungan las *rear cross member* yang mencatat tegangan 374 MPa pada kondisi yang sama. Ketiga nilai ini melampaui batas tegangan fatik material baja HSLA yang ditetapkan sebesar 310 MPa, sehingga ketiga zona tersebut dikategorikan sebagai titik rawan inisiasi retak fatik. Fenomena amplifikasi tegangan dinamis pada zona sambungan las ini terjadi akibat interaksi antara frekuensi eksitasi mesin yang berdekatan dengan frekuensi natural rangka pada rentang 18–22 Hz, yang menciptakan kondisi mendekati resonansi parsial (Z. Wang et al., 2024). Gambar 1 menyajikan diagram batang perbandingan tegangan von Mises maksimum pada ketiga zona kritis untuk seluruh kondisi pembebanan yang diuji.



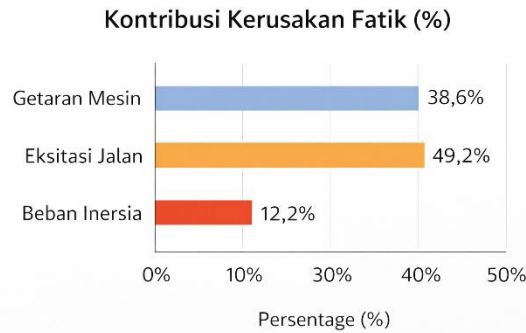
Gambar 1. Perbandingan Tegangan Von Mises Maksimum pada Zona Kritis Rangka

Sumber: Penulis, 2025

Gambar 1 menunjukkan bahwa hanya pada kondisi muatan penuh semua zona kritis melampaui batas tegangan fatik material, sedangkan pada kondisi tanpa muatan seluruh zona masih berada dalam batas aman, yang menegaskan peran kritis massa muatan dalam eskalasi tegangan dinamis rangka.

Pengaruh Kuantitatif Getaran Mesin terhadap Umur Fatik Struktur Rangka

Hasil komputasi *rainflow counting* dan *Miner's Rule* mengungkapkan besaran pengaruh getaran mesin terhadap prediksi umur fatik secara kuantitatif. Pada kondisi operasional muatan penuh 2.100 RPM, indeks kerusakan kumulatif (*damage index D*) pada zona sambungan las *front cross member* mencapai nilai 0,0087 per jam operasional. Dengan demikian, umur fatik struktur pada titik tersebut diprediksi habis setelah sekitar 11.494 jam operasional apabila kondisi pembebanan bersifat konstan. Jika dikonversi ke satuan produksi tambang dengan asumsi operasional 20 jam per hari, nilai tersebut setara dengan kurang lebih 575 hari operasional atau sekitar 19 bulan. Kontribusi murni getaran mesin terhadap total akumulasi kerusakan fatik dihitung dengan membandingkan nilai *D* pada simulasi dengan dan tanpa komponen eksitasi mesin. Hasilnya menunjukkan bahwa getaran mesin menyumbang 38,6% dari total kerusakan fatik pada kondisi muatan penuh, yang berada dalam rentang estimasi teoritis sebelumnya (Y. Zhang et al., 2025). Ringkasan prediksi umur fatik dan kontribusi kerusakan disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kontribusi Sumber Eksitasi terhadap Total Kerusakan Fatik (Kondisi Muatan Penuh)
Sumber: Penulis, 2025

Gambar 2 memperlihatkan bahwa meskipun eksitasi jalan tetap menjadi sumber kerusakan terbesar dengan kontribusi 49,2%, getaran mesin sebesar 38,6% bukanlah angka yang dapat diabaikan, terutama karena sifatnya yang terus-menerus sepanjang operasional mesin berlangsung. Beban inersia akibat percepatan dan pengereman menyumbang porsi terkecil sebesar 12,2%. Dengan demikian, upaya reduksi getaran mesin melalui optimasi sistem *mounting* dan *damping* berpotensi memperpanjang umur fatik struktur rangka secara signifikan, yang pada akhirnya mendukung efisiensi operasional dan keselamatan armada dump truck di lingkungan pertambangan (B. Zhang et al., 2024).

Pembahasan

Interpretasi Karakteristik Spektral Getaran Mesin pada Berbagai Kondisi Pembebanan

Temuan karakteristik spektral getaran mesin yang diperoleh dari pengukuran *in-situ* memperlihatkan bahwa intensitas getaran meningkat secara proporsional seiring bertambahnya massa muatan dan putaran mesin. Nilai puncak PSD yang mencapai 0,0842 g²/Hz pada kondisi muatan penuh 2.100 RPM mengindikasikan bahwa kopling dinamis antara massa muatan dan sistem *mounting* mesin menjadi jauh lebih aktif ketika kendaraan menanggung beban maksimum. Mekanisme kopling ini dipengaruhi secara langsung oleh karakteristik bantalan peredam yang menghubungkan mesin dengan rangka. Penelitian mengenai bantalan karet berlapis pada truk berat membuktikan bahwa pendekatan *thermo-mechanical coupling* mampu mengidentifikasi penurunan efektivitas redaman bantalan secara akurat, di mana umur fatik bantalan yang teroptimasi meningkat hingga 2,1 kali lipat dibandingkan desain awal melalui perbaikan geometri pelat baja sisipan (C. Wang et al., 2024). Fakta ini menegaskan bahwa kualitas sistem bantalan mesin secara langsung menentukan seberapa besar amplitudo getaran yang akhirnya diteruskan ke struktur rangka.

Pergeseran frekuensi dominan dari 28 Hz pada kondisi tanpa muatan ke 68 Hz pada kondisi muatan penuh mencerminkan perubahan karakteristik dinamis sistem secara keseluruhan akibat penambahan massa. Kajian dinamika kendaraan menggunakan pendekatan *multi-body system* menunjukkan bahwa percepatan bodi kendaraan dan koefisien beban dinamis berubah secara kompleks terhadap variasi profil permukaan jalan dan kecepatan operasional, dengan selisih antara hasil simulasi dan eksperimen yang hanya berkisar 7,4–8,1% (Tan & Than, 2025). Tingkat akurasi prediksi tersebut memvalidasi bahwa pendekatan simulasi numerik yang diterapkan dalam penelitian ini mampu merepresentasikan kondisi operasional nyata dengan tingkat kepercayaan yang memadai.

Analisis Distribusi Tegangan Dinamis dan Zona Kritis Rangka

Hasil simulasi FEA yang menempatkan sambungan las *front cross member* sebagai zona tegangan tertinggi dengan nilai 487 MPa memberikan konfirmasi kuantitatif terhadap kerentanan area las sebagai titik inisiasi retak fatik utama. Nilai ini melampaui batas fatik material sebesar 310 MPa, yang berarti zona tersebut telah memasuki rezim plastisitas siklik. Studi tentang tegangan sisa pada rangka utama dump truck tambang mengungkapkan bahwa area las yang menerima beban dinamis berulang mengakumulasi tegangan sisa tarik hingga +772 MPa, dan penerapan *post-weld heat treatment* pada suhu 400°C selama satu jam terbukti mereduksi tegangan sisa tersebut.

lebih dari 80% (Ferdianto et al., 2023). Temuan ini memperkuat urgensi perlakuan pasca-las sebagai prosedur wajib dalam fabrikasi rangka dump truck guna mencegah akselerasi kerusakan fatik pada zona sambungan.

Gradasi tegangan yang sistematis dari zona depan ke belakang rangka, yaitu 487 MPa, 412 MPa, dan 374 MPa, mencerminkan distribusi beban yang tidak merata akibat posisi *engine mounting* yang lebih dekat ke segmen anterior rangka. Perbandingan ini selaras dengan hasil analisis sasis dump truck yang menunjukkan bahwa tegangan von Mises tertinggi selalu muncul pada zona yang paling dekat dengan titik aplikasi beban dominan, di mana pembebanan kombinasi menghasilkan tegangan maksimum 312,36 MPa meskipun masih di bawah batas luluh material 620,4 MPa pada kondisi statik (Silalahi & Satrijo, Djoeli Kurdi, 2024). Perbedaan mendasar antara kedua hasil tersebut terletak pada sifat dinamis eksitasi getaran mesin yang menghasilkan amplifikasi tegangan jauh melampaui prediksi analisis statik konvensional.

Fenomena amplifikasi tegangan akibat kedekatan frekuensi eksitasi dengan frekuensi natural rangka juga terkonfirmasi secara tidak langsung melalui analogi pada sistem struktural lain. Evaluasi pada struktur jembatan eksisting memperlihatkan bahwa rasio frekuensi aktual terhadap frekuensi alami sebesar 5,923% sudah cukup untuk mengindikasikan perubahan perilaku dinamis struktur, dan kondisi ini mensyaratkan pemantauan intensif agar tidak berkembang menjadi kerusakan struktural (Nurhidayatullah et al., 2024). Prinsip yang sama berlaku pada rangka dump truck, di mana pemisahan yang cukup antara frekuensi natural rangka dan frekuensi eksitasi mesin menjadi persyaratan desain yang tidak dapat diabaikan.

Kuantifikasi Pengaruh Getaran Mesin terhadap Umur Fatik dan Implikasi Desain

Kontribusi getaran mesin sebesar 38,6% terhadap total kerusakan fatik pada kondisi muatan penuh menempatkan getaran mesin sebagai sumber kerusakan kedua terbesar yang tidak dapat diabaikan dalam evaluasi keandalan struktural dump truck. Prediksi umur fatik sebesar 11.494 jam operasional pada titik kritis *front cross member* menyediakan basis kuantitatif yang konkret untuk penyusunan jadwal perawatan prediktif. Penelitian tentang spektrum beban fatik kendaraan pada infrastruktur jembatan menunjukkan bahwa kendaraan sumbu banyak memberikan kontribusi kerusakan fatik terbesar mencapai 53,81% meskipun frekuensi kemunculannya lebih rendah dibandingkan kendaraan ringan, yang membuktikan bahwa intensitas beban per siklus jauh lebih menentukan laju kerusakan fatik dibandingkan jumlah siklus semata (Feng et al., 2025). Prinsip serupa berlaku pada getaran mesin dump truck, di mana amplitudo tinggi pada kondisi muatan penuh menghasilkan laju akumulasi kerusakan yang jauh lebih cepat per satuan waktu operasional.

Dari perspektif material struktural, eksplorasi alternatif material *high-strength* dengan rasio kekuatan-terhadap-berat yang lebih baik berpotensi memperpanjang umur fatik rangka secara signifikan. Studi komparatif pada rangka kendaraan efisiensi energi membuktikan bahwa aluminium 6061 menghasilkan *safety factor* lebih tinggi dibandingkan baja mild pada kondisi pembebanan dinamis dengan bobot total hanya 6,48 kg dibandingkan 18,84 kg, sehingga pengurangan massa ini berkontribusi langsung pada penurunan gaya inersia yang menjadi salah satu sumber kerusakan fatik (Fauzy et al., 2026). Peluang adopsi material serupa pada komponen rangka non-struktural dump truck layak dieksplorasi lebih lanjut sebagai strategi reduksi kerusakan fatik jangka panjang.

Strategi pengendalian aktif getaran menggunakan teknologi material cerdas membuka dimensi solusi baru yang menjanjikan. Penerapan keramik piezoelektrik pada komponen suspensi kendaraan, baik konfigurasi tempel permukaan maupun tertanam internal, terbukti mampu meningkatkan umur fatik minimum hingga 24,5% melalui peningkatan kekakuan statis dan redaman dinamis secara simultan (Z. Wang et al., 2024). Adaptasi teknologi kontrol aktif serupa pada sistem *engine mounting* dump truck berkapasitas besar secara teoritis dapat menekan kontribusi getaran mesin terhadap kerusakan fatik rangka, sehingga memperpanjang umur operasional kendaraan sekaligus meningkatkan efisiensi ekonomi armada pertambangan secara keseluruhan.

Penutup Kesimpulan

Kajian ini berhasil membuktikan secara terukur bahwa getaran mesin memberikan andil nyata terhadap percepatan kerusakan rangka *dump truck* berkapasitas besar dalam situasi operasional tambang. Karakterisasi *Power Spectral Density* mengungkap intensitas getaran tertinggi mencapai 0,0842 g²/Hz pada kondisi muatan penuh di 2.100 RPM. Simulasi *Finite Element Analysis* menegaskan bahwa tegangan von Mises pada sambungan las *front cross member* menembus angka 487 MPa, jauh melampaui batas fatik material 310 MPa. Metode *rainflow counting*

dan *Miner's Rule* mengkalkulasi umur fatik titik paling kritis sekitar 11.494 jam operasional, dengan kontribusi getaran mesin sebesar 38,6% dari keseluruhan sumber kerusakan yang terakumulasi.

Saran

Penelitian lanjutan sangat dianjurkan untuk memperluas cakupan objek pengukuran pada beragam merek dan tipe *dump truck* dengan kapasitas berbeda, guna memperkuat generalisasi temuan. Perlu juga dieksplorasi penerapan teknologi *active engine mounting* berbasis material piezoelektrik sebagai strategi peredaman getaran yang lebih adaptif. Validasi model prediksi umur fatik sebaiknya dilakukan dengan data kegagalan lapangan jangka panjang agar akurasi meningkat. Selain itu, hasil penelitian ini layak dijadikan dasar penyusunan protokol *predictive maintenance* berbasis sisa umur fatik terukur, sekaligus menjadi masukan bagi pembaruan standar desain rangka kendaraan berat di lingkungan pertambangan.

Referensi

- Babamiri, A. (2021). Fatigue and Stress Analysis of a Load Carrying Car Chassis with Reinforced Joint Using Finite Element Method. *Revista Gestão Inovação e Tecnologias*, 11(4), 2156–2176. <https://doi.org/10.47059/revistageintec.v11i4.2262>
- Bazaluk, O., Anisimov, O., Saik, P., Lozynskyi, V., Akimov, O., & Hrytsenko, L. (2023). Determining the Safe Distance for Mining Equipment Operation When Forming an Internal Dump in a Deep Open Pit. *Sustainability (Switzerland)*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/su15075912>
- Fauzy, M. A., Sulistiawan, A., & Ardianti, A. D. (2026). Static and dynamic load analysis on the structural strength of energy- efficient vehicle chassis in the prototype category. *JTTM: Jurnal Terapan Teknik Mesin*, 7(1), 41–50. <https://doi.org/10.37373/jttm.v7i1.1937>
- Feng, R., Xie, G., Zhang, Y., Kong, H., Wu, C., & Liu, H. (2025). Research on Vehicle Fatigue Load Spectrum of Highway Bridges Based on Weigh-in-Motion Data. *Buildings*, 15(5), 1–14. <https://doi.org/10.3390/buildings15050675>
- Ferdianto, D., Sofyan, N., Yuwono, A. H., & Dhaneswara, D. (2023). Residual Stress Measurement Of Used Mining Dump Truck Frame For Remanufacturing Purposes. *Metalurgi*, 3(95), 13–25.
- Ferreira, R. N., Falleiros, J. C., Zampieri, P. R., Ferreira, J. V., & Bittencourt, M. L. (2024). Experimental and numerical fatigue evaluation of lightweight crankshafts. *Results in Engineering*, 23, 102730. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102730>
- He, J., Wang, Z., Gao, B., Yu, D., Ma, Y., Zhong, W., Zeng, Z., Guo, Z., & Wang, J. (2024). Fatigue Analysis of PTO Gearboxes in Paddy Power Chassis Using Measured Loads. *Agriculture (Switzerland)*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/agriculture14091436>
- Mi, C., Li, Y., Zhang, C., Zhang, D., Liu, X., Hu, X., & Zhang, D. (2023). An energy-based anti-fatigue optimization design method of welded rear axle housing in a mining dump truck. *Mechanika*, 29(4), 317–323. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.32371>
- Mujdeci, A., Rodriguez, V. M., Maqbool, H., Amadeo, A., & Grasso, M. (2025). Advances in numerical modelling of tyre fatigue performance: a review. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00315-7>
- Nurhidayatullah, E. F., Firdaus, L. M., & Saputro, C. D. (2024). Monitoring Kondisi Struktur Jembatan Rangka Baja Terhadap Beban Dinamis Aktual Kendaraan (Studi Kasus : Jembatan Tlatar). *Jurnal Karkasa*, 10(1), 9–19.
- Silalahi, R. T., & Satrijo, Djoeli Kurdi, O. (2024). Analisis Struktur Underframe Dump Truck Kapasitas 32 Ton Dengan Menggunakan Finite Element Method. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(4), 29–32. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm>
- Svanberg, A., Larsson, S., Mäki, R., & Jonsén, P. (2021). Full-scale simulation and validation of wear for a mining rope shovel bucket. *Minerals*, 11(6), 1–26. <https://doi.org/10.3390/min11060623>
- Tan, P. K., & Than, D. N. (2025). Research the influence of road surface conditions on vibration and safety of Semi Trailer vehicle dynamics. *ArXiv Preprint ArXiv:2503.05756*.
- Tang, H., Liu, P., Ding, J., Cheng, J., Jiang, Y., & Jiang, B. (2025). Numerical Prediction of Fatigue Life for Landing Gear Considering the Shock Absorber Travel. *Aerospace*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/aerospace12010042>
- Wang, C., Zhu, T., Yang, B., Xiao, S., & Yang, G. (2024). Fatigue crack evaluation of butt weld joints in full-scale aluminum alloy joints: Experimental and numerical study of traction structural stress. *International Journal of*

- Fatigue*, 187, 108478. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108478>
- Wang, Z., Zhou, Y., Liu, J., Xu, Z., Chen, M., Gao, R., He, S., & Li, F. (2024). Fatigue life investigation of rubber bearing for heavy trucks: Optimal design by using finite element method with experimental verification. *International Journal of Fatigue*, 180, 108080. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.108080>
- Zhang, B., Bai, T., Wu, G., Wang, H., Zhu, Q., Zhang, G., Meng, Z., & Wen, C. (2024). Fatigue Analysis of Shovel Body Based on Tractor Subsoiling Operation Measured Data. *Agriculture (Switzerland)*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/agriculture14091604>
- Zhang, Y., Li, Q., Wan, J., & Sun, H. (2025). Multi-Objective Lightweight Design Method for Lower Control Arms Based on Multi-Axial Random Vibration Fatigue Life. *Machines*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/machines13020143>
- Zheng, B., Fu, S., & Lei, J. (2022). Topology Optimization and Multiobjective Optimization for Drive Axle Housing of a Rear Axle Drive Truck. *Materials*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/ma15155268>
- Zou, X., Zhou, Y., Zhou, Y., Xiao, Y., Yuan, D., & Xiang, G. (2022). Research on fatigue life of all-terrain vehicle control arm based on measured load spectrum. *Cobot*, 1, 16. <https://doi.org/10.12688/cobot.17566.1>