



Klasifikasi Status Idle dan Kerja Wheel Loader WA350 Berbasis Akselerometer Tunggal

Dhendy Zaki Ridwan^{a)}, Panji Peksi Branjangan^{a)}, Wigo Ardi Winarko^{a)}

(Received 14 September 2025 || Revised 16 Desember 2025 || Published 23 Desember 2025)

Abstract: Conventional hour meters on heavy equipment accumulate engine-ON time without distinguishing productive working from non-productive idle, which can bias preventive maintenance scheduling. This study evaluates the feasibility of separating idle and working conditions of a Komatsu WA350 wheel loader using a single tri-axial accelerometer. Vibration data were recorded at 700, 900, 1100, and 1300 rpm under two scenarios: engine-on with bucket stationary (*idle*) and engine-on with bucket actuation without load (*working*). The main indicator is the time-domain Root Mean Square (RMS) on AccX, AccY, and AccZ to represent vibration energy per axis, supported by low-frequency spectral inspection for interpretation. For paired comparison, the analysis focuses on 700–1100 rpm because the 1300 rpm dataset does not include a verified idle counterpart. The results show that AccX provides the most consistent separation, where RMS in *working* increases by approximately 10–13% compared to *idle* at 700–1100 rpm, while AccY is less stable and AccZ changes are minimal. These findings support a simple RMS-based logic as a practical basis for smart hour-metering to better reflect operational workload and improve service notification timing. Limitations include controlled test conditions (no-load bucket cycles) and a single mounting location; broader validation under varied loads, terrains, and operators is required.

Keywords: Hour meter, accelerometer, wheel loader, RMS, condition monitoring

1. Pendahuluan

Hour meter merupakan instrumen fundamental dalam manajemen aset industri, berfungsi untuk merekam total durasi operasional sebuah mesin atau peralatan berat [1]. Data akumulasi jam operasi (*running hours*) yang dihasilkannya menjadi landasan utama dalam perencanaan jadwal perawatan preventif (*preventive maintenance*) dan evaluasi produktivitas unit [2]. Namun, *hour meter* konvensional memiliki kelemahan yang cukup signifikan yaitu hanya mengakumulasi total waktu mesin dalam kondisi menyala (*on-state*) tanpa mampu membedakan antara kondisi produktif di bawah beban kerja (*working*) dan kondisi non-produktif saat mesin hanya menyala tanpa melakukan pekerjaan (*idle*) [3].

Keterbatasan ini menghasilkan data *running hours* yang tidak merefleksikan beban kerja aktual, padahal tingkat keausan komponen mesin sangat dipengaruhi oleh intensitas dan variasi beban yang ditanggung selama beroperasi, bukan sekadar durasi menyala [4]. Akurasi data produktivitas menjadi krusial, terutama pada industri yang mengandalkan alat berat seperti *wheel loader*, karena berdampak langsung pada efisiensi biaya operasional, optimalisasi penjadwalan perawatan, dan estimasi sisa umur pakai (*remaining useful life*) komponen [5]. Oleh karena itu, penjadwalan perawatan yang efektif menuntut informasi jam kerja aktual yang mampu memisahkan kondisi beban kerja nyata dari total waktu mesin menyala.

Untuk mengatasi masalah ini, pendekatan *condition monitoring* berbasis sensor menawarkan solusi yang bisa diandalkan. Analisis sinyal, khususnya sinyal getaran dari mesin, telah terbukti cukup efektif untuk mengidentifikasi dan membedakan berbagai kondisi operasional, termasuk transisi antara kondisi *idle* dan *working* [6]. Getaran yang dihasilkan oleh mesin memiliki pola karakteristik yang unik pada setiap kondisi operasinya. Pola inilah yang dapat diekstraksi dan dianalisis untuk menjadi dasar bagi sistem pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*), yang memungkinkan deteksi anomali secara dini sekaligus meningkatkan akurasi pencatatan jam kerja efektif [7]. Dengan demikian, informasi perubahan level dan pola getaran antara kondisi *idle* dan *working* dapat dimanfaatkan sebagai dasar pengembangan *hour meter* cerdas yang hanya menambahkan jam kerja ketika unit benar-benar berada dalam kondisi bekerja secara

produktif.

Berdasarkan tinjauan tersebut, terdapat kebutuhan untuk mengembangkan sistem *hour meter* yang lebih cerdas dan akurat. Penelitian ini mengajukan desain dan implementasi sistem instrumentasi berbasis sensor getaran tunggal (akselerometer) untuk mengidentifikasi dan memvalidasi kondisi *idle* dan *working* pada *engine wheel loader* WA350-1. Dengan fokus pada analisis sinyal getaran, sistem ini dirancang untuk menghasilkan data produktivitas yang lebih akurat dibandingkan metode konvensional, serta menyediakan input data yang valid untuk mendukung strategi perawatan prediktif di lingkungan industri. Berbagai studi kelayakan awal, penelitian ini dibatasi pada satu unit WA350-1 yang dioperasikan pada lintasan relatif datar dengan skenario *working* yang didefinisikan sebagai penggerakan bucket tanpa beban material, sehingga pembahasan masih berfokus pada pemisahan kondisi *idle* dan *working* dan belum mencakup klasifikasi jam kerja kontinu dalam operasi harian armada. Berbagai pendekatan monitoring alat berat telah memanfaatkan sensor dan analisis data untuk membedakan kondisi operasi. Namun, pada konteks *hour-meter* di lapangan, masih dibutuhkan metode yang murah, mudah dipasang, mudah dijelaskan, dan ringan dihitung pada perangkat edge agar dapat memisahkan jam *idle* dan jam kerja produktif secara praktis. Celaht tersebut mendorong penelitian ini untuk mengevaluasi akselerometer tunggal dengan indikator sederhana RMS sebagai dasar pemisahan kondisi *idle* vs *working* pada *wheel loader* WA350. Kontribusi utama artikel ini adalah menunjukkan pola perubahan RMS pada AccX, AccY, dan AccZ di beberapa RPM dan menilai kelayakannya sebagai logika awal smart hour-metering.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi respons getaran sistem engine pada empat tingkat putaran mesin (700, 900, 1100 dan 1300 rpm) dalam dua kondisi operasi (*idle* dan *bucket digerakkan*) dan kondisi OFF sebagai acuan. Analisis dilakukan pada domain waktu dan frekuensi untuk mengidentifikasi perubahan energi getaran total secara keseluruhan.

2.1 Perangkat, Instrumen dan Skenario Uji Coba

Perangkat yang digunakan di penelitian ini antara lain:

*Korespondensi: dhendy@akabi.ac.id

a) Akademi Teknik Alat Berat Indonesia, Malang, Jawa Timur

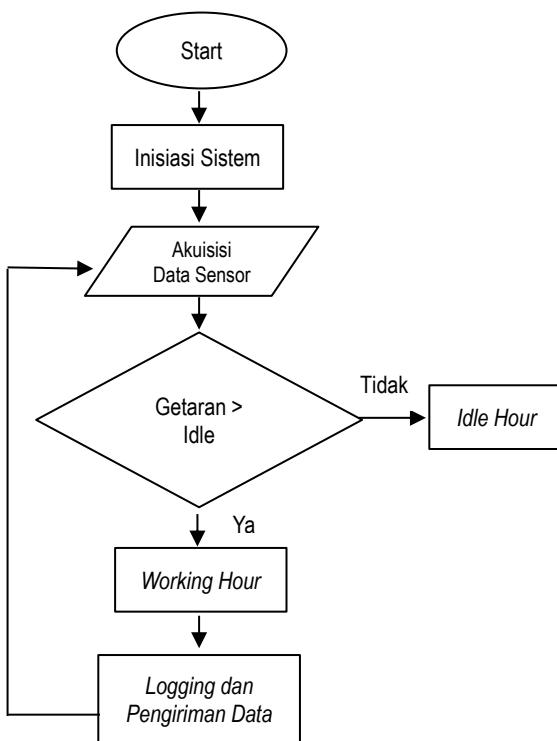
- Sensor Inersia/Accelerometer 3 aksis (AccX, AccY, AccZ) dan giroskop 3 aksis (GyroX, GyroY, GyroZ)
- Mikrokontroller (ESP32) dan penyimpanan microsd
- Frekuensi sampling = 40 Hz

Tabel 2.1 menunjukkan rancangan skenario uji coba untuk mendapatkan data getaran dengan beberapa kondisi. *Engine on* artinya engine hidup dan *bucket on* artinya kondisi *bucket* unit sedang bekerja.

TABEL 2.1 TABEL SKENARIO UJI COBA

RPM	Kondisi Unit
0	Off
700	Engine On (idle)
700	Engine On (working)
900	Engine On (idle)
900	Engine On (working)
1100	Engine On (idle)
1100	Engine On (working)
1300	Engine On (working)

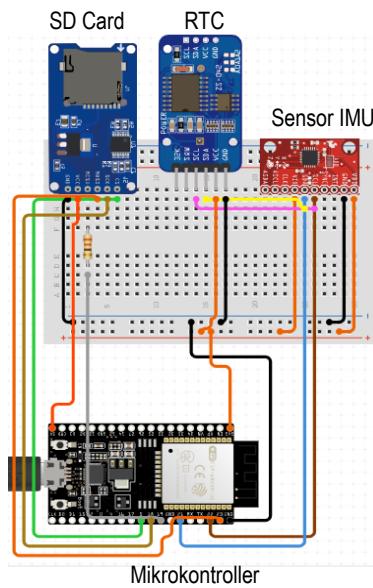
Dua kondisi operasi didefinisikan sebagai: (1) Idle, yaitu engine hidup pada RPM target dengan bucket tidak digerakkan (tanpa siklus kerja); dan (2) Working, yaitu engine hidup pada RPM yang sama dengan bucket dioperasikan secara siklik (raising-lowering-tilting) tanpa muatan material untuk meminimalkan pengaruh payload. Akuisisi dilakukan setelah engine mencapai temperatur kerja dan RPM distabilkan pada nilai target, kemudian data direkam secara kontinu menggunakan data logger berbasis ESP32 ke SD card. Timing akuisisi diverifikasi dari interval antar-sampel dengan rata-rata sekitar 25,33 ms. Tahapan penelitian ditunjukkan di diagram alir Gambar 2.1.



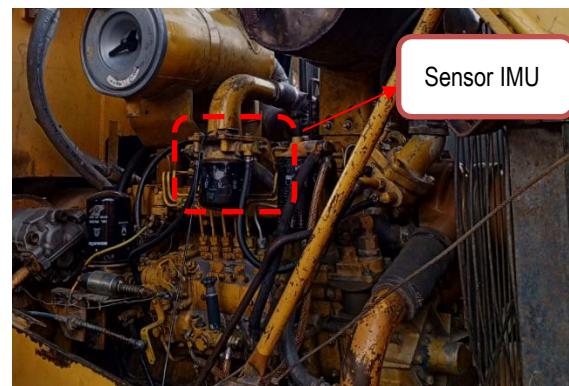
GAMBAR 2.1 FLOWCHART PENELITIAN

Desain sistem pada kasus ini dapat diilustrasikan pada Gambar

2.2. Desain ini dirancang dan diimplementasikan pada unit Wheel Loader WA350 dengan titik pemasangan sensor IMU adalah di atas *corrosion resistor* (Gambar 2.3) dengan tujuan temperature dari engine tidak mempengaruhi kinerja dari sensor (35 °C). Penentuan titik ditentukan berdasarkan lokasi terdekat dengan engine yang memiliki getaran terbesar dan mounting yang kokoh. Posisi ini dipilih sebagai kompromi antara kedekatan dengan sumber getaran engine dan perlindungan sensor khususnya dari panas yang dihasilkan engine.



GAMBAR 2.2 DESAIN SISTEM



GAMBAR 2.3 TITIK POINT SENSOR ACCELEROMETER

Prosedur pengumpulan data ada beberapa tahap, yaitu persiapan terdiri dari pemasangan sensor dan koneksi baterai, kemudian akuisisi data dengan merekam data kontinyu hingga memadai, dan menjaga rpm unit tetap stabil saat kondisi bucket diam (Off) dan bergerak (On). Estimasi laju sampling dapat ditunjukkan pada Persamaan (2-1), hasil $f_s \approx 40\text{Hz}$, sehingga frekuensi Nyquist $f_N \approx 20\text{ Hz}$, ada skenario matrik yaitu getaran pada frekuensi 0-20 Hz untuk melihat trend dari ketiga data accelerometer AccX, AccY, AccZ. Dengan $f_s \approx 40\text{ Hz}$, spektrum getaran yang diamati dibatasi hingga 20 Hz, yang mencakup komponen fundamental putaran engine namun belum menjangkau komponen harmonik frekuensi tinggi.

$$f_s = \frac{1}{\text{median}(\Delta \text{millis})_{1000}} \quad (2-1)$$

2.2 Parameter Akuisisi & Dataset

Perekaman dilakukan dengan target sampling 40 Hz, dan frekuensi sampling efektif dihitung dari interval antar-sampel dengan rata-rata sekitar 25,33 ms (setara $\pm 39,47$ Hz). Total durasi data terlabel yang dianalisis adalah sekitar 187 s (idle) dan 269 s (working), sehingga jumlah sampel yang terolah masing-masing sekitar ± 7.381 sampel (idle) dan ± 10.617 sampel (working). Analisis kuantitatif perbandingan idle–working difokuskan pada 700, 900, dan 1100 rpm karena pada 1300 rpm hanya tersedia data working (bucket on) sehingga tidak dapat dilakukan perbandingan berpasangan idle–working dan hanya dipakai sebagai referensi kualitatif.

3. Hasil dan Pembahasan

Setelah melakukan akuisisi data maka Gambar 3.1 adalah grafik *Power Spectral Density (PSD)*, data accelerometer dan gyro sensor akan ditampilkan dalam analisa spectrum untuk mengetahui frekuensi apa saja yang ada dalam data tersebut, data yang digunakan adalah AccX, AccY, AccZ, untuk melihat semua range frekuensi yang bekerja dalam kondisi tersebut, Gambar 3.1 menunjukkan bahwa sumbu AccX memiliki magnitudo yang terbesar dibandingkan sumbu AccY dan AccZ

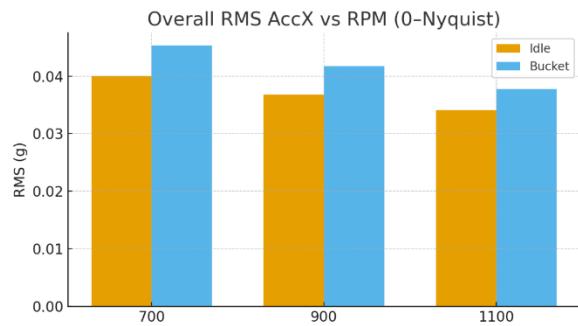
Root Mean Square (RMS) dari sinyal percepatan sumbu X untuk setiap dataset. Nilai RMS merepresentasikan kekuatan dari getaran. Analisis domain waktu RMS per sumbu adalah ukuran energi getaran per arah dapat ditunjukkan dalam Persamaan (2-2) dan RMS vektor yaitu energi getaran total 3-aksis dapat ditunjukkan dalam Persamaan (2-3) dan Persamaan (2-4)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2} \quad (2-2)$$

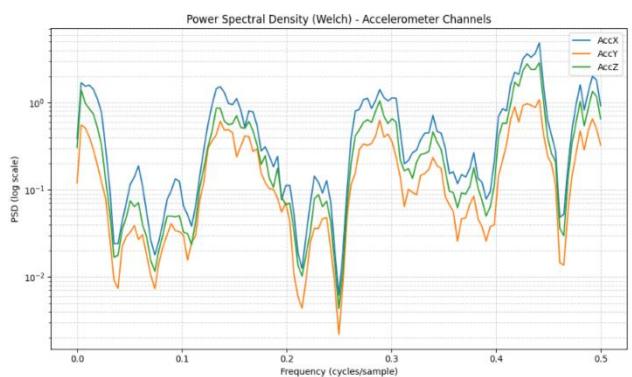
$$a_{vec}(i) = \sqrt{a^2x + a^2y + a^2z} \quad (2-3)$$

$$RMS_{vec} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum a_{vec}(i)^2} \quad (2-4)$$

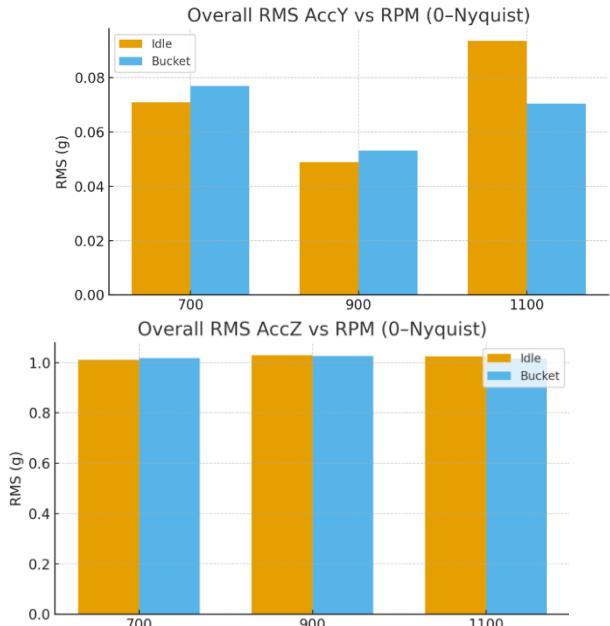
Analisis kuantitatif perbandingan idle–working difokuskan pada tiga tingkat putaran mesin (700, 900, dan 1100 rpm). Hal ini disebabkan karena pada 1300 rpm hanya tersedia dataset dengan kondisi working (bucket digerakkan) yang tervalidasi dengan baik, sedangkan pasangan data dengan kondisi idle pada rpm yang sama tidak terdokumentasi secara jelas. Oleh karena itu, 1300 rpm tidak dimasukkan dalam perhitungan persentase kenaikan RMS idle–working, dan hanya digunakan sebagai referensi tambahan secara kualitatif. Gambar 3.2 adalah hasil perbandingan nilai RMS getaran pada rpm 700, 900, dan 1100 dengan frekuensi Nyquist $f_N \approx 20$ Hz. Terlihat bahwa terdapat kenaikan kenaikan nilai getaran saat bucket digerakkan (working) pada sumbu AccX, sumbu AccY mengalami kenaikan yang lebih kecil, sedangkan sumbu AccZ relatif tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Gambar 3.2, Gambar 3.3, dan Gambar 3.4 masing-masing memperlihatkan tren overall RMS untuk sumbu AccX, AccY, dan AccZ terhadap variasi rpm dan kondisi operasi (idle vs working). Keterbatasan lain adalah tidak tersedianya pasangan data idle–working yang lengkap pada 1300 rpm, sehingga analisis kuantitatif perbandingan idle–working hanya dilakukan pada 700–1100 rpm.



GAMBAR 3.1 OVERALL RMS AccX vs RPM



GAMBAR 3.1 OVERALL RMS AccY vs RPM



GAMBAR 3.2 OVERALL RMS AccZ vs RPM

Gambar 3.1 menampilkan *Power Spectral Density (PSD)* dari sinyal percepatan pada ketiga sumbu akselerometer (AccX, AccY, dan AccZ) dalam rentang frekuensi 0–20 Hz sesuai batas frekuensi Nyquist sistem akuisisi ($fs \approx 40$ Hz). PSD digunakan untuk mengidentifikasi distribusi energi getaran terhadap frekuensi serta membandingkan dominasi respons getaran antar sumbu. Hasil PSD menunjukkan bahwa sumbu AccX memiliki magnitudo spektral paling dominan dibandingkan AccY dan AccZ, terutama pada frekuensi rendah (<10 Hz). Dominasi ini mengindikasikan

bawa arah X merupakan jalur utama transmisi getaran dari engine dan sistem hidrolik menuju titik pemasangan sensor. Sementara itu, spektrum AccY memiliki amplitudo yang lebih fluktuatif dan AccZ menunjukkan level energi yang relatif rendah di seluruh rentang frekuensi yang diamati. Karakteristik ini memperkuat indikasi awal bahwa informasi pemisahan kondisi idle–working lebih kaya pada sumbu AccX, sehingga layak dijadikan kandidat utama indikator getaran berbasis RMS pada analisis domain waktu selanjutnya.

Gambar 3.2 memperlihatkan nilai overall RMS getaran pada sumbu AccX untuk kondisi idle dan working pada variasi putaran mesin 700, 900, dan 1100 rpm. RMS digunakan sebagai representasi energi getaran total pada domain waktu yang bersifat ringkas dan mudah diimplementasikan pada sistem edge computing. Terlihat bahwa pada 700 dan 900 rpm, kondisi working (bucket digerakkan) menghasilkan kenaikan RMS sekitar 13% dibandingkan kondisi idle. Kenaikan ini relatif konsisten pada dua tingkat rpm tersebut, menunjukkan bahwa aktivasi sistem hidrolik saat bucket dioperasikan menambah eksitasi dinamis pada struktur engine dan mounting sensor. Pada 1100 rpm, RMS AccX masih menunjukkan kenaikan pada kondisi working, namun dengan persentase yang lebih kecil (sekitar 10,7%). Hal ini mengindikasikan bahwa pada rpm yang lebih tinggi, kontribusi tambahan getaran akibat gerakan bucket menjadi relatif lebih kecil dibandingkan getaran dasar engine itu sendiri. Dengan kata lain, peningkatan rpm meningkatkan baseline vibration, sehingga margin pemisahan idle–working berbasis RMS menjadi sedikit lebih sempit.

Gambar 3.3 menyajikan nilai RMS getaran pada sumbu AccY untuk kondisi idle dan working pada rpm 700–1100. Berbeda dengan AccX, respons AccY menunjukkan konsistensi yang lebih rendah. Pada 700 dan 900 rpm, RMS AccY mengalami peningkatan sekitar 9% ketika bucket digerakkan, yang masih menunjukkan adanya perbedaan energi getaran antara kondisi idle dan working. Namun, pada 1100 rpm, RMS AccY justru menurun sekitar 24,6% pada kondisi working dibandingkan idle. Fenomena ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain:

- Orientasi sensor yang menyebabkan sebagian energi getaran terdistribusi ke sumbu lain pada rpm tinggi.
- Interferensi resonansi lokal atau perubahan jalur transmisi getaran pada struktur engine.
- Dominasi getaran engine pada rpm tinggi yang menutupi kontribusi tambahan dari sistem hidrolik.

Hasil ini menunjukkan bahwa AccY kurang stabil sebagai indikator tunggal untuk pemisahan idle–working, terutama pada variasi rpm yang lebih tinggi.

Gambar 3.4 menunjukkan nilai RMS getaran pada sumbu AccZ untuk seluruh skenario rpm dan kondisi operasi. Berbeda dengan AccX dan AccY, nilai RMS AccZ relatif konstan dengan rasio Working/Idle mendekati 1,00 pada seluruh tingkat rpm yang dianalisis. Minimnya perubahan RMS pada sumbu AccZ mengindikasikan bahwa getaran vertikal pada titik pemasangan sensor tidak sensitif terhadap perbedaan kondisi idle dan working pada skenario pengujian ini. Hal ini dapat disebabkan oleh:

- Kekakuan struktural arah vertikal pada mounting engine,
- Arah dominan gaya eksitasi yang lebih banyak terjadi pada bidang lateral,
- Redaman getaran vertikal yang lebih tinggi pada struktur engine.

Dengan demikian, AccZ tidak direkomendasikan sebagai parameter utama untuk pemisahan kondisi idle–working pada konfigurasi sensor yang digunakan dalam penelitian ini.

Data pada sumbu AccX menunjukkan getaran tertinggi pada rpm 700 dan 900, kemudian menurun secara linier seiring kenaikan rpm. Secara kuantitatif, overall RMS ketika bucket digerakkan naik sekitar 13% dari nilai awal idle untuk sumbu AccX, sedangkan AccY mengalami kenaikan sekitar 9%. Kondisi ini dapat diartikan bahwa pada rpm 700–900, penggerakan bucket menambah vibrasi pada arah lateral (X, Y) tanpa banyak memengaruhi arah vertical (Z). Pada rpm 1100, nilai RMS puncak AccX meningkat sekitar 10,7% dibandingkan kondisi idle, sedangkan AccY justru mengalami penurunan sekitar 24,6%.

Hal ini mengindikasikan bahwa pada rpm 1100 efek tambahan getaran akibat pergerakan bucket tidak sekutu pada rpm 700/900, atau sebagian energi getaran sudah “terkonsumsi” oleh getaran dasar engine itu sendiri. Untuk memperjelas perbandingan antara kondisi idle dan working, Tabel 3.1 menyajikan ringkasan nilai RMS relatif (rasio Working/Idle) untuk masing-masing sumbu pada setiap skenario rpm. Nilai ini dinormalisasi terhadap RMS idle sehingga fokus pada perubahan persentase.

Konsistensi kenaikan RMS AccX sebesar ±10–13% pada 700–1100 rpm memberikan dasar yang kuat untuk merumuskan ambang sederhana berbasis RMS sebagai logika awal smart hour-metering. Pendekatan ini sejalan dengan tujuan penelitian untuk menghasilkan metode yang murah, mudah dijelaskan (interpretable), dan ringan secara komputasi, sehingga relevan untuk implementasi praktis di lapangan.

TABEL 3.1 PERBANDINGAN RMS RELATIF (WORKING/IDLE) PER SUMBU DAN RPM

RPM	AccX (Working/Idle)	AccY (Working/Idle)	AccZ (Working/Idle)
700	≈ 1,13	≈ 1,09	≈ 1,00
900	≈ 1,13	≈ 1,09	≈ 1,00
1100	≈ 1,107	≈ 0,754	≈ 1,00

Nilai RMS pada sumbu AccX menunjukkan tren yang relatif lebih tinggi pada 700–900 rpm dan cenderung menurun pada rpm yang lebih tinggi. Secara kuantitatif, ketika bucket digerakkan (working) RMS AccX meningkat sekitar 13% dibanding idle pada 700 dan 900 rpm. Pada sumbu AccY, peningkatan RMS sekitar 9% terlihat pada 700–900 rpm, sedangkan pada 1100 rpm RMS AccY justru menurun sekitar 24,6% dibanding idle. Sementara itu, RMS AccZ relatif tidak berubah (rasio mendekati 1,00), sehingga kontribusinya sebagai indikator pemisahan idle–working pada titik pemasangan ini relatif kecil. Untuk memperjelas perbandingan, Tabel 3.1 menyajikan rasio RMS (Working/Idle) per sumbu pada tiap skenario RPM. Tabel tersebut menunjukkan pola yang konsisten pada 700 dan 900 rpm, yaitu kenaikan sekitar 10–13% pada AccX dan sekitar 9% pada AccY ketika bucket digerakkan. Pola ini memberikan margin awal untuk merumuskan ambang sederhana berbasis RMS, misalnya:

$$RMS_{AccX} > RMS_{AccX, idle} \times 1,10 \quad (3-1)$$

Maka kondisi dapat diasumsikan sebagai working. Aturan ambang ini masih bersifat awal dan belum diuji sebagai skema klasifikasi formal (misalnya dengan metrik akurasi, false positive, dan false negative), namun hasil ini menunjukkan adanya

pemisahan level RMS yang dapat dimanfaatkan sebagai sinyal dasar untuk rancangan hour meter cerdas yang hanya menambah jam kerja ketika getaran melampaui batas tertentu.

Peningkatan RMS pada kondisi working dapat dijelaskan oleh aktivasi hidrolik saat bucket dioperasikan yang menambah beban dinamis dan eksitasi struktural pada kompartemen/mounting engine sehingga energi getaran meningkat. Variasi respons antar sumbu dan antar RPM kemungkinan dipengaruhi oleh orientasi sensor, jalur transmisi getaran, resonansi lokal, serta kekakuan mounting pada titik pemasangan. Secara praktis, pemisahan RMS ini relevan untuk preventive maintenance karena memungkinkan pencatatan jam kerja yang lebih merepresentasikan beban kerja aktual dibandingkan hour meter konvensional yang hanya menghitung engine-ON time. Untuk kanal gyro, tidak terlihat kenaikan yang signifikan saat bucket digerakkan. Hal ini mengindikasikan bahwa gerak bucket pada skenario pengujian ini lebih banyak menambah komponen getaran translasi yang ditangkap oleh akselerometer (percepatan linier) dibandingkan komponen rotasi yang ditangkap oleh gyro. Dengan kata lain, perubahan kondisi idle ke working pada kasus ini lebih sensitif direpresentasikan oleh kanal percepatan ($AccX/AccY$) daripada kanal kecepatan sudut, sehingga gyro kurang efektif digunakan sebagai indikator utama pemisahan idle–working pada konfigurasi pengujian yang dilakukan.

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini perlu dibaca dengan mempertimbangkan beberapa keterbatasan. Pertama, pengujian hanya dilakukan pada satu unit wheel loader WA350-1 dengan satu titik pemasangan sensor akselerometer pada blok engine. Hal ini membatasi generalisasi hasil ke tipe unit lain maupun ke posisi pemasangan sensor yang berbeda, misalnya pada frame atau kabin operator. Kedua, pengujian dilakukan pada lintasan yang relatif datar dan kondisi lingkungan yang cukup homogen, sehingga pengaruh variasi permukaan jalan (misalnya permukaan bergelombang atau berlubang) terhadap pola getaran belum dieksplorasi.

Ketiga, skenario working pada penelitian ini didefinisikan sebagai penggerakan bucket tanpa membawa muatan material. Dengan demikian, beban kerja yang diwakili masih terbatas pada kondisi “no-load” dan belum mencakup variasi beban material yang lebih realistik seperti pengambilan dan penuangan material di *stockpile*. Keempat, pada rpm 1300 terdapat keterbatasan dokumentasi label kondisi (idle vs working) pada salah satu berkas data, sehingga pasangan data idle–working yang “bersih” tidak tersedia. Akibatnya, analisis kuantitatif pemisahan idle–working difokuskan pada rentang 700–1100 rpm, sedangkan data 1300 rpm hanya dipertimbangkan sebagai referensi tambahan secara kualitatif.

Kelima, studi ini masih berfokus pada analisis dasar domain waktu menggunakan RMS dan inspeksi spektral sederhana tanpa menerapkan algoritma klasifikasi statistik maupun metrik kinerja seperti akurasi, *precision*, atau *recall*. Dengan demikian, hasil yang ditunjukkan masih berada pada tahap studi kelayakan (*feasibility study*) untuk membedakan idle dan working berbasis satu akselerometer, dan belum sampai pada implementasi sistem hour meter cerdas yang tervalidasi penuh di lingkungan operasi armada yang sesungguhnya.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa perbedaan energi getaran antara kondisi idle dan working dapat dimanfaatkan sebagai

indikator kondisi operasi alat berat. Hasil pengujian pada wheel loader WA350-1 memperlihatkan bahwa sinyal getaran dari satu akselerometer yang dipasang pada blok engine dapat membedakan kondisi idle dan working secara non-invasif. Analisis domain waktu menggunakan RMS pada beberapa tingkat putaran mesin (700, 900, dan 1100 rpm) menunjukkan adanya kenaikan level getaran yang relatif konsisten pada sumbu tertentu ketika bucket digerakkan tanpa beban material. Temuan ini mengindikasikan bahwa informasi getaran berpotensi digunakan sebagai dasar untuk memisahkan jam idle dan jam kerja produktif, sehingga running hours menjadi lebih representatif terhadap beban kerja aktual dibandingkan hour meter konvensional yang hanya menghitung durasi engine ON.

Meskipun demikian, hasil penelitian ini masih berada pada tahap studi kelayakan (*feasibility study*) dan belum dapat diklaim sebagai sistem hour meter yang sepenuhnya akurat dan siap diterapkan di lapangan. Pengujian dilakukan pada satu unit WA350-1, satu titik pemasangan sensor, lintasan yang relatif homogen, serta definisi working yang dibatasi pada penggerakan bucket tanpa muatan material. Selain itu, komparasi kuantitatif idle–working difokuskan pada 700–1100 rpm karena data pada 1300 rpm tidak memiliki pasangan idle yang tervalidasi. Analisis yang digunakan juga masih berfokus pada parameter RMS dan inspeksi spektral sederhana, tanpa evaluasi metrik klasifikasi seperti akurasi, false positive, dan false negative pada variasi operasi yang lebih luas.

Untuk menuju implementasi hour meter cerdas yang lebih aplikatif di lingkungan industri, diperlukan penelitian lanjutan sebagai berikut: (1) memperluas pengujian pada skenario working yang lebih realistik, yaitu bucket membawa muatan material dengan variasi massa dan siklus kerja yang mendekati operasi harian; (2) menguji variasi kondisi permukaan lintasan (misalnya datar, bergelombang, atau berlubang) untuk mengevaluasi ketahanan (robustness) pemisahan idle–working terhadap gangguan getaran dari lintasan; dan (3) menerapkan serta mengevaluasi metode keputusan sederhana, seperti threshold berbasis RMS maupun decision tree dangkal, untuk mengkuantifikasi kinerja pemisahan idle–working dalam bentuk metrik klasifikasi yang terukur.

5. Ucapan Terimakasih

Seluruh tim peneliti ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus dan penghargaan setinggi-tingginya kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi atas kepercayaan dan dukungan pendanaan yang telah diberikan. Bantuan finansial ini memiliki peran yang sangat krusial dan menjadi pilar utama dalam keberhasilan pelaksanaan seluruh rangkaian penelitian, mulai dari tahap perancangan sistem, pengadaan komponen dan sensor, hingga proses akuisisi dan analisis data di lapangan. Tanpa adanya dukungan ini, realisasi penelitian untuk mengembangkan sistem identifikasi kondisi engine berbasis getaran ini tidak akan mungkin dapat tercapai. Kami berharap hasil dari penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif bagi kemajuan inovasi teknologi di bidang industri dan perawatan prediktif di Indonesia.

Referensi

- [1] Komatsu, *Shop Manual Wheel Loader WA350*. Tokyo: Komatsu Ltd., [2000]

- [2] R.B. Randall, Frequency Analysis. Nærum, Denmark : Brüel & Kjær, 1987.
- [3] Y. A. Prabowo and L. E. U. M. Putra, "Perancangan hour meter berbasis Internet of Things menggunakan logika fuzzy," *JIRE*, vol. 5, no. 1, pp. 53–61, Apr. 2022.
- [4] I. Noor, "Perancangan preventive maintenance alat berat di PT Kalimantan Prima Persada," *Jurnal JIEOM*, vol. 3, no. 2, pp. 17–25, Nov. 2020.
- [5] A. Y. D. Yudanur and S. Sugiyanto, "Sistem monitoring tegangan, arus, dan suhu pada unit alat berat berbasis IoT," *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, vol. 19, no. 1, pp. 66–71, Apr. 2024.
- [6] L. Magadán, F. J. Suárez, J. C. Granda, and D. F. García, "Low-cost industrial IoT system for wireless monitoring of electric motors condition," *Mobile Networks and Applications*, vol. 28, pp. 97–106, 2023.
- [7] A. Destio, R. Hartono, and A. Umron, "Analisis efisiensi performa daya mampu mesin SWD 6TM410," *JITT*, vol. 2, no. 1, pp. 106–112, 2024.
- [8] H. Saghaei, "Design and implementation of a fleet management system using novel GPS/GLONASS tracker and web-based software," in *Proc. Int. Conf. New Research Achievements in Electrical and Computer Engineering*, 2016.
- [9] M. A. Farahpoor, O. Esparza, and M. C. Soriano, "Comprehensive IoT-driven fleet management system for industrial vehicles," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 193429–193444, 2024.
- [10] J. Linggarjati, "Design and prototyping of temperature monitoring system for hydraulic cylinder in heavy equipment using ESP32 with data logging and WiFi connectivity," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 998, p. 012042, 2022.
- [11] M. H. Mohd Ghazali and W. Rahiman, "Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review," *Shock and Vibration*, vol. 2021, Art. ID 9469318, pp. 1–25, 2021.
- [12] C. Zhang et al., "Vibration feature extraction using signal processing techniques for structural health monitoring: A review," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 177, p. 109175, Sep. 2022.
- [13] N. Islam et al., "Condition monitoring of critical industrial assets using high performance MEMS accelerometers," *Measurement*, vol. 178, p. 109379, Dec. 2021.
- [14] P. Lipinski, J. Sawicki, R. Sadowski, J. Stefanski, and M. Topolinski, "Decision tree-based classification for planetary gearbox fault diagnosis in non-stationary operating conditions," *Sensors*, vol. 20, no. 21, p. 5979, Oct. 2020.
- [15] H. Aguirre-Jofré, M. Eyre, S. Valerio, and D. Vogt, "Low-cost Internet of Things (IoT) for monitoring and optimising mining small-scale trucks and surface mining shovels," *Automation in Construction*, vol. 131, p. 103918, Nov. 2021