SINERGI *Polmed*: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

KETIDAKSEIMBANGAN ROTOR DAN INDIKASI DINI KERUSAKAN BANTALAN TURBIN MIKROHIDRO BERBASIS ANALISIS GETARAN MULTIINDIKATOR

Baso Alauddin[a]

[a]*Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pejuang Republik Indonesia, Jl. Baruga Raya Antang, Kota Makassar, 90234, Indonesia*

** Penulis korespondensi: baso.alauddin@upri.ac.id: basoalauddin84@gmail.com (Baso) Tel.: +62811466456*

INFOARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 04 Maret 2026
Direvisi pada 27 Juli 2026
Disetujui pada 09 Oktober 2026
Tersedia daring pada 31 Oktober 2026

Kata kunci:
Getaran rotor; ketidakseimbangan rotor; kerusakan bantalan; turbin mikrohidro; analisis selubung.

Keywords:
Rotor vibration; rotor imbalance; *bearing fault*; micro-hydropower turbine; *envelope analysis*.

ABSTRAK

Keandalan turbin mikrohidro tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan aliran air, tetapi juga oleh kondisi rotor dan bantalan yang menopang putaran. Penelitian ini bertujuan membandingkan karakteristik getaran akibat ketidakseimbangan rotor dan indikasi awal kerusakan bantalan pada turbin mikrohidro tipe *Archimedes screw* skala kecil. Pengujian dilakukan secara eksperimental pada tiga kondisi, yaitu normal (*baseline*), ketidakseimbangan rotor terkontrol, dan indikasi awal kerusakan bantalan. Sinyal getaran direkam menggunakan akselerometer pada titik penumpu rotor, kemudian dianalisis melalui nilai *root mean square* (RMS), amplitudo 1×RPM, kurtosis, dan analisis selubung (*envelope analysis*). Pada titik NDE-H nilai RMS meningkat dari 0,44 mm/s pada kondisi normal menjadi 1,21 mm/s saat rotor tidak seimbang, sedangkan amplitudo 1×RPM naik dari 0,16 menjadi 0,86 mm/s. Pada kondisi indikasi awal kerusakan bantalan, kurtosis meningkat dari 3,12 menjadi 5,86 dan indikator selubung BPFO dari 0,06 menjadi 0,41, sementara RMS tercatat 0,87 mm/s. Hasil ini memperlihatkan bahwa amplitudo 1×RPM lebih menonjol pada ketidakseimbangan rotor, sedangkan kurtosis dan indikator selubung membantu mengenali respons impulsif yang berkaitan dengan kerusakan bantalan. Kombinasi indikator tersebut berpotensi mendukung pemeriksaan kondisi turbin mikrohidro, meskipun penerapannya masih memerlukan validasi pada variasi operasi dan unit turbin yang lebih luas.

ABSTRACT

The reliability of micro-hydropower turbines depends not only on water availability but also on the mechanical condition of their rotors and supporting bearings. This study compares vibration characteristics associated with rotor imbalance and indications of early bearing damage in a small-scale Archimedes screw turbine. Experiments were conducted under three conditions: normal operation (baseline), controlled rotor imbalance, and a condition exhibiting early bearing-fault symptoms. Vibration signals were acquired using accelerometers at the rotor support locations and evaluated using root mean square (RMS) velocity, 1×RPM amplitude, kurtosis, and envelope analysis. The RMS value at NDE-H increased from 0.44 mm/s under baseline conditions to 1.21 mm/s under rotor imbalance, while the 1×RPM amplitude increased from 0.16 to 0.86 mm/s. Under the early bearing-fault condition, kurtosis increased from 3.12 to 5.86 and the BPFO envelope indicator from 0.06 to 0.41, with an RMS value of 0.87 mm/s. These results suggest that 1×RPM amplitude is more prominent in the imbalance condition, whereas kurtosis and envelope indicators help reveal impulsive responses associated with potential bearing damage. Combining these indicators may support condition assessment of micro-hydropower turbines, although validation across broader operating conditions and additional turbines is still needed.

1. PENGANTAR

Keandalan penyediaan listrik di wilayah terpencil bergantung pada ketersediaan sumber energi lokal dan keberlangsungan operasi peralatannya. Pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) dapat memanfaatkan aliran sungai maupun saluran irigasi untuk menghasilkan listrik pada skala kecil. Selain sumber air, keberhasilan pengoperasian PLTMH juga ditentukan oleh kondisi mekanis turbin yang bekerja secara terus-menerus (Thakur dkk., 2024).

PLTMH dapat menyediakan pasokan daya yang relatif stabil apabila debit air mencukupi sepanjang tahun. Namun, kondisi lingkungan, keterbatasan fasilitas pemeliharaan, dan gangguan pada komponen mekanis dapat menurunkan keandalannya. Oleh sebab itu, pemantauan kondisi mesin menjadi bagian penting dari pengelolaan pembangkit, selain perancangan hidrolik dan evaluasi efisiensi energi (González-González dkk., 2024).

Salah satu turbin yang digunakan pada sistem mikrohidro ber-*head* rendah adalah turbin ulir Archimedes (*Archimedes screw*). Turbin ini memiliki konstruksi yang relatif sederhana dan dapat beroperasi pada variasi debit tertentu. Aliran air menghasilkan torsi melalui interaksi dengan ulir yang terpasang pada poros. Meski konstruksinya sederhana, stabilitas putaran dan kondisi bantalan tetap perlu diperhatikan agar turbin dapat beroperasi dengan baik (Sołowiej & Łapiński, 2024).

Kajian mengenai turbin ulir Archimedes umumnya menitikberatkan pada geometri ulir, sudut kemiringan, jumlah lilitan, rasio *pitch*, dan debit aliran untuk meningkatkan daya atau efisiensi hidrolik. Aspek tersebut penting, tetapi belum sepenuhnya menjelaskan gangguan mekanis selama operasi. Untuk itu, kajian karakteristik getaran diperlukan sebagai pelengkap penilaian kinerja turbin (Mohedano-Castillo dkk., 2025).

Ketidakseimbangan massa rotor (*unbalance*) terjadi ketika distribusi massa tidak merata terhadap sumbu putar. Kondisi ini dapat dipicu oleh ketidaktepatan manufaktur, endapan sedimen, keausan yang tidak seragam, atau perubahan bentuk komponen. Ketidakseimbangan menghasilkan gaya periodik yang meningkat seiring kecepatan putar dan dapat memperbesar amplitudo getaran, terutama pada frekuensi fundamental putaran (Lamesgin & Ali, 2024).

Bantalan (*bearing*) menopang poros dan membantu mempertahankan kestabilan gerak rotor. Beban radial dan aksial, kualitas pelumasan, kontaminasi, serta ketidaktepatan pemasangan dapat mempercepat degradasi bantalan. Pada tahap awal, cacat lokal pada lintasan atau elemen gelinding dapat memunculkan impuls berulang yang sulit dikenali hanya dari nilai getaran total (Romanssini dkk., 2023).

Ketidakseimbangan rotor dan kerusakan bantalan dapat sama-sama meningkatkan getaran, tetapi menghasilkan karakteristik sinyal yang berbeda. Ketidakseimbangan biasanya berkaitan dengan dominasi komponen 1×RPM, sedangkan cacat bantalan dapat menimbulkan impuls dan respons pada frekuensi karakteristik, antara lain BPFO dan BPFI. Jika diagnosis hanya didasarkan pada kenaikan nilai getaran keseluruhan, tindakan pemeliharaan dapat diarahkan pada komponen yang kurang tepat (Kannan dkk., 2024).

Pada PLTMH yang dioperasikan dengan sumber daya pemeliharaan terbatas, metode diagnosis yang mudah diterapkan menjadi kebutuhan praktis. Pengamatan suara dan inspeksi visual tetap berguna, tetapi dapat melewatkan gejala kerusakan awal. Pengukuran *root mean square* (RMS), amplitudo 1×RPM, kurtosis, dan analisis selubung dapat memberikan informasi yang saling melengkapi mengenai kondisi rotor dan bantalan (Hassan dkk., 2024).

Ketersediaan akselerometer dan perangkat akuisisi data yang lebih terjangkau membuka peluang pemantauan getaran pada pembangkit berskala kecil. Dalam penelitian ini, sejumlah indikator getaran digunakan secara bersama untuk membandingkan respons ketidakseimbangan rotor dan indikasi awal kerusakan bantalan pada turbin ulir Archimedes (Failing dkk., 2023)(Wang dkk., 2022). Getaran turbin mikrohidro dipengaruhi oleh kondisi mekanis sekaligus gaya hidrolik selama operasi. Perubahan debit, distribusi aliran air, serta penumpukan sedimen dapat memodifikasi respons dinamis rotor. Oleh karena itu, interpretasi sinyal getaran perlu dilakukan bersama informasi kondisi operasi agar perubahan akibat gangguan mekanis tidak langsung disamakan dengan perubahan beban hidrolik (Mika dkk., 2025).

Nilai RMS lazim digunakan untuk menggambarkan tingkat getaran secara umum, tetapi belum tentu cukup peka untuk mengenali impuls yang jarang terjadi. Kurtosis dan *crest factor* dapat membantu menunjukkan perubahan sifat impulsif sinyal. Sementara itu, transformasi Fourier cepat (*FFT*) digunakan untuk mengidentifikasi komponen pada frekuensi putaran, sedangkan analisis selubung membantu menelusuri respons yang berhubungan dengan frekuensi karakteristik bantalan (Askari dkk., 2024).

Pemanfaatan beberapa indikator dalam satu alur analisis memungkinkan hasil pemantauan diterjemahkan menjadi informasi yang lebih mudah ditindaklanjuti. Namun, interpretasinya harus mempertimbangkan keterbatasan sensor, kualitas data, dan perubahan kondisi operasi. Penggabungan indikator juga belum secara otomatis membuktikan ketepatan diagnosis tanpa pengujian validasi yang memadai (Kolok dkk., 2025).

Pemisahan pola getaran menjadi penting bagi keputusan pemeliharaan. Peningkatan RMS bersama dominasi amplitudo 1×RPM dapat menjadi alasan untuk memeriksa keseimbangan rotor, sedangkan kenaikan kurtosis dan respons pada spektrum selubung dapat mengarahkan pemeriksaan ke bantalan. Kerangka interpretasi ini perlu diuji pada kondisi yang terdefinisi agar indikator tidak digunakan secara terpisah dari penyebab fisiknya (Daga & Garibaldi, 2024).

Penelitian sebelumnya telah banyak membahas kinerja hidrolik turbin ulir dan teknik diagnosis getaran pada mesin berputar. Namun, pembandingan terukur antara kondisi rotor tidak seimbang dan gejala awal kerusakan bantalan dalam konteks turbin mikrohidro masih memerlukan penguatan bukti. Kesenjangan tersebut menjadi dasar pemilihan skenario pengujian dan indikator yang digunakan pada penelitian ini (Ucar dkk., 2024).

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi perbedaan karakteristik getaran pada tiga kondisi operasi turbin mikrohidro tipe *Archimedes screw*, yaitu normal, ketidakseimbangan rotor terkontrol, dan indikasi awal kerusakan bantalan. Kontribusi utama yang dikaji adalah penerapan gabungan RMS, amplitudo 1×RPM, kurtosis, dan analisis selubung sebagai dasar interpretasi kondisi mekanis pada satu unit turbin yang diuji.

2. METODE

Penelitian menggunakan metode eksperimen komparatif pada satu unit turbin mikrohidro tipe *Archimedes screw* skala kecil. Tiga kondisi pengujian dibandingkan, yaitu kondisi normal (*baseline*), rotor dengan ketidakseimbangan terkontrol, dan kondisi yang menunjukkan indikasi awal kerusakan bantalan. Pengukuran dilakukan setelah operasi dinyatakan stabil untuk mengurangi pengaruh perubahan sesaat saat awal putaran.

Pengukuran getaran dilakukan pada sisi penggerak (*drive end*, DE) dan sisi bukan penggerak (*non-drive end*, NDE), masing-masing dalam arah radial horizontal dan vertikal. Kecepatan putar dicatat menggunakan takometer. Pada tiap kondisi, data diambil dalam sepuluh segmen berdurasi 10 s dengan frekuensi pencuplikan 12,8 kHz. Selama pengukuran, debit, *head*, dan beban listrik dijaga sedekat mungkin dengan nilai operasi yang ditetapkan.

2.1. Spesifikasi sistem dan instrumentasi

Spesifikasi sistem meliputi jenis turbin, rentang *head*, debit, sudut kemiringan ulir, dimensi, kecepatan putar, transmisi, serta jenis bantalan. Informasi tersebut dirangkum dalam Tabel 1. Tabel tersebut memberikan gambaran konfigurasi turbin, sedangkan nilai operasi aktual diringkas bersama hasil pengujian.

Tabel 1: Spesifikasi Turbin Ulir *Archimedes*

Parameter	Simbol	Nilai tipikal (bukan data uji)
Jenis Turbin	-	*Archimedes screw*
Head efektif	H	1-5 m
Debit operasi	Q	0,05–0,30 m³/s
Sudut kemiringan ulir	β	20°-35°
Diameter ulir	D	0,18-0,30 m
Panjang ulir	L	1,2-2,0 m
Kecepatan putar	n	180-260 rpm
Sistem transmisi	-	*Pulley/belt* ke generator
Jenis bantalan	-	*Deep groove ball bearing*
Lingkungan operasi	-	Kelembapan tinggi, potensi sedimen

Getaran diukur menggunakan akselerometer yang dipasang pada rumah bantalan, sedangkan takometer digunakan untuk memperoleh kecepatan putar aktual. Sinyal pengukuran direkam melalui perangkat akuisisi data (DAQ) untuk analisis statistik dan spektral. Ringkasan fungsi instrumen disajikan pada Tabel 2.

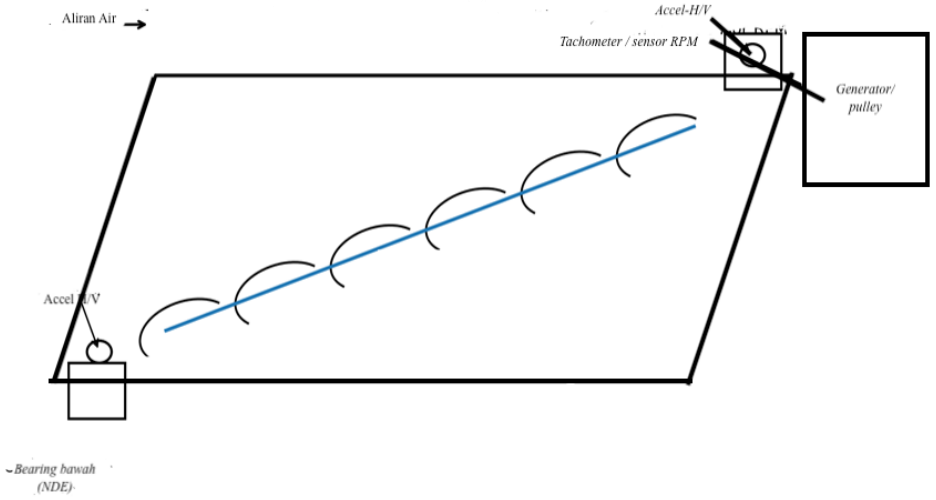
Tabel 2: Instrumen Pengukuran dan Hasil Analisis

Instrumen	Lokasi/fungsi	Karakteristik	Keluaran analisis
Akselerometer	*Housing bearing DE* dan *NDE* arah radial	*Sensor* percepatan; *resolusi* memadai untuk mesin putar kecepatan rendah	*Time waveform, RMS, peak, crest factor, kurtosis*
Takometer	*Poros/pulley*	Referensi putaran aktual	RPM, identifikasi 1×RPM dan harmonik
Perangkat akuisisi data (DAQ)	Akuisisi sinyal sinkron	Sampling 12,8 kHz; segmentasi 10 s	*FFT, band-pass, envelope analysis*
Catatan operasi	*Head,* debit, beban listrik	Data operasi selama pengujian	Konteks interpretasi tren getaran

Lokasi sensor dipilih untuk menangkap respons dinamis pada kedua sisi penumpu rotor. Posisi pengukuran mencakup rumah bantalan DE dan NDE, sedangkan pengukuran putaran dilakukan pada poros atau puli yang terhubung dengan generator.

Akselerometer dipasang pada rumah bantalan DE dan NDE untuk merekam getaran radial. Takometer ditempatkan pada poros atau puli sebagai acuan identifikasi frekuensi putaran dan harmoniknya. Titik pengukuran dipertahankan pada posisi yang sama selama seluruh skenario percobaan.

Susunan instrumen pada turbin ulir Archimedes ditunjukkan pada Gambar 1. Penempatan sensor pada kedua penumpu dimaksudkan untuk membandingkan distribusi respons getaran sepanjang rotor.



Gambar 1: Skema penempatan sensor pada turbin mikrohidro tipe *Archimedes screw*

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, pengukuran pada titik DE dan NDE memberikan informasi dari dua lokasi penumpu rotor. Data putaran digunakan untuk menentukan komponen 1×RPM dalam analisis frekuensi, sedangkan sinyal akselerometer diolah untuk memperoleh indikator pada domain waktu dan frekuensi. Dengan cara ini, perubahan getaran dapat dibandingkan pada lokasi sensor dan kondisi operasi yang sama.

2.2. Skenario pengujian

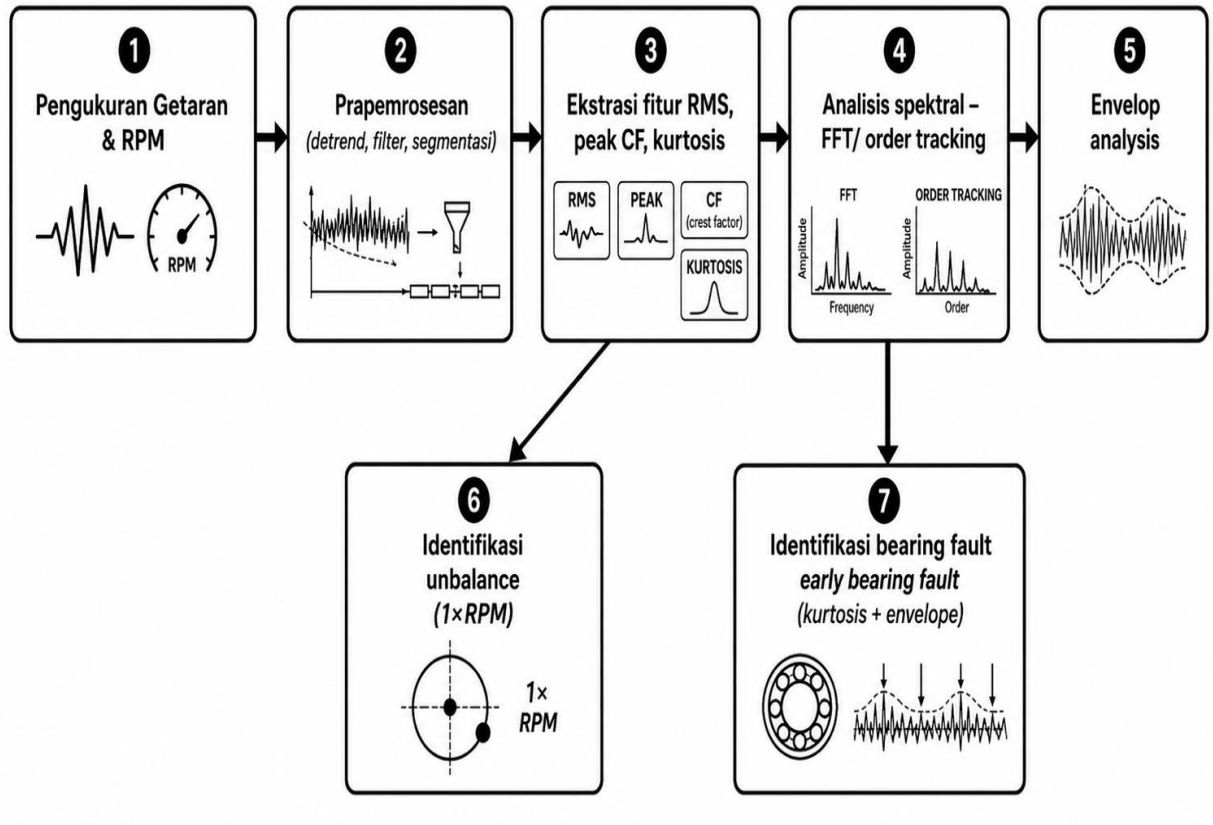
Kondisi normal (*baseline*) ditetapkan berdasarkan operasi tanpa penambahan massa uji dan tanpa gejala impulsif yang menonjol. Ketidakseimbangan rotor dibuat secara terkontrol dengan memasang massa tambahan pada bagian berputar. Kondisi ketiga dikelompokkan sebagai indikasi awal kerusakan bantalan berdasarkan munculnya respons impulsif dan komponen frekuensi yang berkaitan dengan bantalan, dibandingkan dengan kondisi normal (Duan dkk., 2025; Roshchupkin & Pavlenko, 2025)(Roshchupkin & Pavlenko, 2025)(Roshchupkin & Pavlenko, 2025; Vulovic dkk., 2025).

Untuk skenario ketidakseimbangan, massa baja sebesar 15 g dipasang dengan baut pada jari-jari 40 mm dari sumbu putar di piringan kopling sisi NDE. Kondisi indikasi awal kerusakan bantalan didasarkan pada gejala getaran yang diamati setelah pengoperasian bantalan. Karena durasi degradasi dan pemeriksaan fisik cacat belum tercatat dalam data yang disajikan, kondisi ini diperlakukan sebagai indikasi berdasarkan sinyal.

Debit aliran selama pengujian dipertahankan sekitar 0,12 m³/s dengan beban generator sekitar 0,41 kW. Kecepatan putar berada pada rentang sekitar 235–238 rpm, setara dengan frekuensi fundamental mendekati 3,9–4,0 Hz. Kondisi tersebut digunakan sebagai acuan ketika membandingkan perubahan indikator getaran antarskenario (Duan dkk., 2025)(Al-Hinai dkk., 2024; Duan dkk., 2025).

2.3. Alur pengolahan sinyal

Sinyal getaran dan kecepatan putar diolah secara bertahap, sebagaimana diringkas pada Gambar 2. Tahapan pengolahan terdiri atas pemeriksaan data awal, penyaringan dan segmentasi sinyal, perhitungan indikator statistik, analisis frekuensi dengan *FFT*, serta analisis selubung untuk menelusuri komponen yang berkaitan dengan bantalan. Alur ini diterapkan pada setiap kondisi pengujian agar hasil dapat dibandingkan secara konsisten.



Gambar 2: Tahapan pengolahan sinyal untuk membedakan ketidakseimbangan rotor dan indikasi kerusakan bantalan

Pengolahan dimulai dengan pemeriksaan sinyal getaran dan data putaran. Tahap prapemrosesan meliputi penyaringan dan segmentasi yang bertujuan mengurangi gangguan pengukuran serta menyiapkan data untuk analisis berikutnya, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada domain waktu, data digunakan untuk menghitung RMS, nilai puncak, *crest factor*, dan kurtosis. Indikator tersebut menggambarkan tingkat getaran keseluruhan serta kecenderungan munculnya impuls yang dapat berkaitan dengan gangguan mekanis

Pada domain frekuensi, *FFT* digunakan untuk menelusuri komponen 1×RPM dan harmoniknya. Dominasi amplitudo 1×RPM dapat mendukung dugaan ketidakseimbangan rotor, tetapi interpretasi tetap perlu mempertimbangkan kemungkinan pengaruh kondisi operasi dan sumber eksitasi lain.

Analisis selubung diterapkan untuk mengamati komponen sinyal yang dapat berkaitan dengan frekuensi karakteristik bantalan, termasuk *ball pass frequency outer race* (BPFO) dan *ball pass frequency inner race* (BPFI). Indikator tersebut diinterpretasikan bersama RMS, amplitudo 1×RPM, dan kurtosis, bukan sebagai bukti tunggal kerusakan bantalan.

2.4. Ringkasan data kuantitatif

Data pada Tabel 3 disajikan sebagai rerata dan ukuran sebaran dari sepuluh segmen pengukuran pada tiap kondisi. Pembahasan kuantitatif difokuskan pada titik NDE-H yang memiliki data indikator lengkap. Nilai pada tiap kondisi disajikan bersama besaran sebarannya sesuai hasil pencatatan pengukuran.

Tiga skenario yang dibandingkan meliputi kondisi normal, ketidakseimbangan rotor, dan indikasi awal kerusakan bantalan. Kecepatan putar, debit, dan beban listrik dijaga pada rentang yang berdekatan untuk mengurangi pengaruh perbedaan operasi terhadap respons getaran.

Parameter utama yang dilaporkan meliputi RMS kecepatan getaran, amplitudo 1×RPM, kurtosis, dan indikator selubung BPFO. Kombinasi parameter tersebut digunakan untuk membandingkan gejala periodik dan impulsif yang muncul pada ketiga skenario. Ringkasan hasil disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3: Kondisi Operasi dan Indikator Getaran Pada Ketiga Skenario Pengujian

Kondisi	RPM rata-rata	Debit (m^3/s)	Beban (W)	RMS NDE-H (mm/s)	1×RPM NDE-H (mm/s)	Kurtosis NDE-H	*Envelope BPFO (-)*
Normal (*baseline*)	236 ± 2	0,121	410	0,44 ± 0,04	0,16 ± 0,02	3,12 ± 0,18	0,06 ± 0,01
Ketidakseimbangan	238 ± 3	0,122	408	1,21 ± 0,09	0,86 ± 0,07	3,48 ± 0,21	0,09 ± 0,02
Indikasi kerusakan bantalan	235 ± 2	0,120	406	0,87 ± 0,08	0,24 ± 0,03	5,86 ± 0,34	0,41 ± 0,05

Tabel 3 menunjukkan bahwa kecepatan putar, debit, dan beban listrik berada dalam rentang yang berdekatan pada ketiga kondisi. Karena itu, perbedaan indikator getaran dapat dibahas dalam kaitannya dengan perubahan kondisi mekanis pada pengaturan uji ini, meskipun pengaruh faktor operasi lain tidak dapat sepenuhnya dikesampingkan.

Pada kondisi normal, RMS di titik NDE-H sebesar 0,44 ± 0,04 mm/s dan amplitudo 1×RPM sebesar 0,16 ± 0,02 mm/s. Kurtosis sebesar 3,12 ± 0,18 mendekati nilai referensi distribusi normal, sedangkan indikator selubung BPFO relatif rendah, yaitu 0,06 ± 0,01.

Pada kondisi rotor tidak seimbang, RMS meningkat menjadi 1,21 ± 0,09 mm/s dan amplitudo 1×RPM menjadi 0,86 ± 0,07 mm/s. Kenaikan komponen fundamental jauh lebih menonjol dibandingkan perubahan kurtosis, yang tercatat sebesar 3,48 ± 0,21. Pola ini sejalan dengan respons periodik yang umumnya berkaitan dengan ketidakseimbangan massa rotor.

Pada kondisi indikasi awal kerusakan bantalan, RMS tercatat 0,87 ± 0,08 mm/s, sedangkan kurtosis mencapai 5,86 ± 0,34 dan indikator selubung BPFO sebesar 0,41 ± 0,05. Perubahan ini menunjukkan respons yang lebih impulsif dibandingkan kondisi normal. Berdasarkan rancangan pengujian ini, pola tersebut ditafsirkan sebagai indikasi awal gangguan bantalan dan bukan konfirmasi tunggal kerusakan fisik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian memperlihatkan pola getaran yang berbeda pada kondisi normal, rotor tidak seimbang, dan indikasi awal gangguan bantalan. Pembahasan berikut mengaitkan nilai RMS, amplitudo 1×RPM, kurtosis, dan hasil analisis spektrum untuk memahami perbedaan respons pada masing-masing skenario.

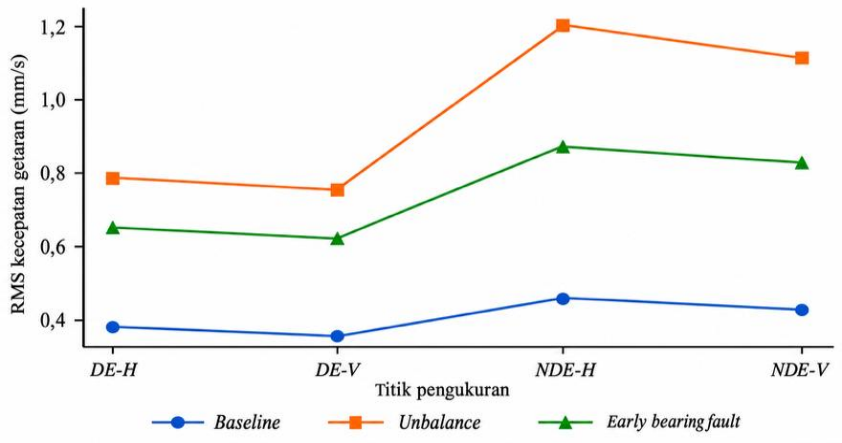
3.1. Karakteristik baseline (kondisi normal)

Pada kondisi normal, RMS pada titik pengukuran berada pada kisaran 0,33–0,44 mm/s. Komponen 1×RPM tetap teramati karena merupakan bagian dari respons periodik sistem berputar, tetapi amplitudonya relatif rendah dibandingkan skenario gangguan.

Nilai kurtosis yang mendekati 3 juga menunjukkan bahwa respons impulsif tidak mendominasi sinyal pada kondisi acuan. Data ini dapat digunakan sebagai pembanding untuk pengukuran lanjutan pada turbin yang sama, dengan tetap memperhatikan kesamaan kondisi operasi.

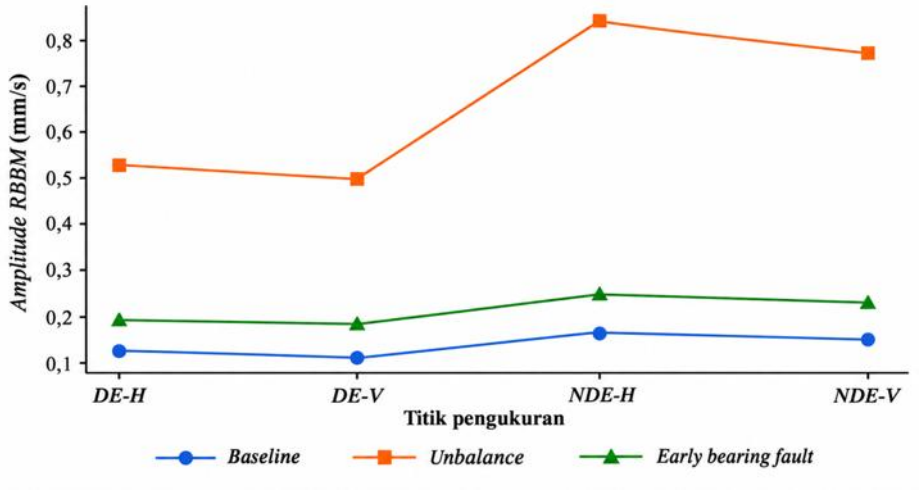
3.2. Dampak unbalance pada distribusi RMS dan amplitudo 1×RPM

Gambar 3 memperlihatkan kenaikan RMS pada seluruh titik sensor ketika rotor diberi massa tambahan. Peningkatan terbesar terjadi di NDE-H, dari 0,44 menjadi 1,21 mm/s atau sekitar 2,75 kali nilai pada kondisi normal. Letak massa uji di sisi NDE dapat menjadi salah satu faktor yang memengaruhi besarnya respons di lokasi tersebut.



Gambar 3: Distribusi RMS kecepatan getaran pada empat titik *sensor* untuk tiga kondisi operasi

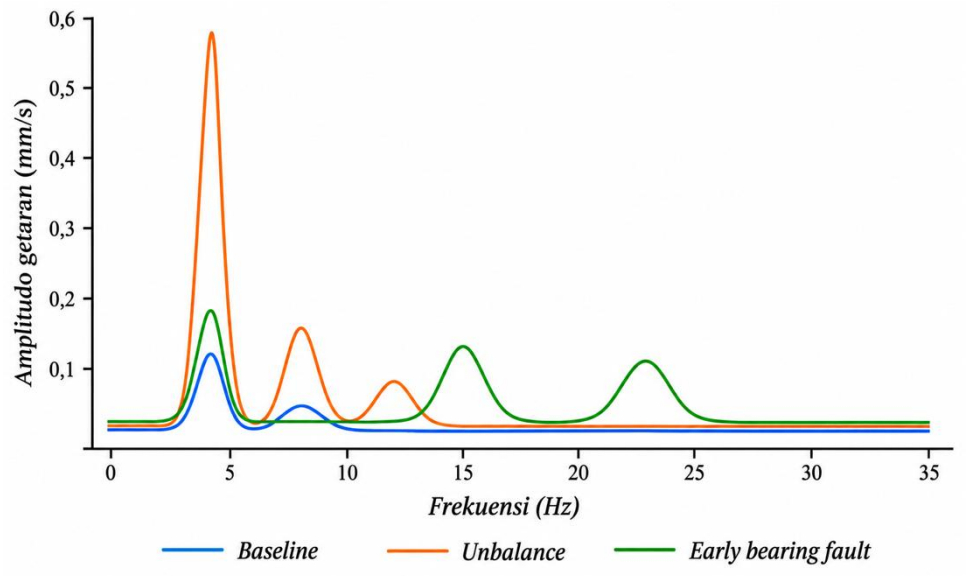
Kenaikan RMS akibat *unbalance* diikuti oleh pertumbuhan amplitudo 1×RPM yang sangat jelas sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4 pada titik NDE-H, amplitudo 1×RPM naik dari 0,16 mm/s menjadi 0,86 mm/s. Pola ini merupakan *signature* klasik *unbalance* rotor karena energi vibrasi terkonsentrasi pada frekuensi putar dasar. Pada kondisi *early bearing fault*, amplitudo 1×RPM hanya meningkat ringan, sehingga perbedaannya dengan *unbalance* dapat diamati dengan cukup jelas.



Gambar 4: Perbandingan amplitudo 1×RPM pada empat titik *sensor* untuk tiga kondisi operasi

3.3. Signature spektral pada domain frekuensi

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, amplitudo 1×RPM di NDE-H meningkat dari 0,16 mm/s pada kondisi normal menjadi 0,86 mm/s saat rotor tidak seimbang. Dominasi komponen pada frekuensi putar dasar mendukung interpretasi ketidakseimbangan massa. Pada kondisi indikasi awal kerusakan bantalan, amplitudo 1×RPM lebih rendah, yaitu 0,24 mm/s. Spektrum *FFT* pada Gambar 5 menunjukkan puncak yang dominan di sekitar 3,95 Hz pada skenario ketidakseimbangan, sesuai dengan frekuensi 1×RPM pada putaran pengujian. Beberapa harmonik juga terlihat dengan amplitudo lebih rendah. Pada skenario indikasi awal kerusakan bantalan, respons frekuensi terlihat lebih tersebar dibandingkan kondisi rotor tidak seimbang. Perbedaan pola spektrum tersebut menunjukkan bahwa peningkatan nilai RMS saja belum cukup untuk menentukan sumber gangguan. Dominasi komponen putaran dapat membantu mengarahkan inspeksi rotor, sedangkan perubahan sifat impulsif sinyal perlu diperiksa bersama indikator yang lebih spesifik terhadap bantalan.



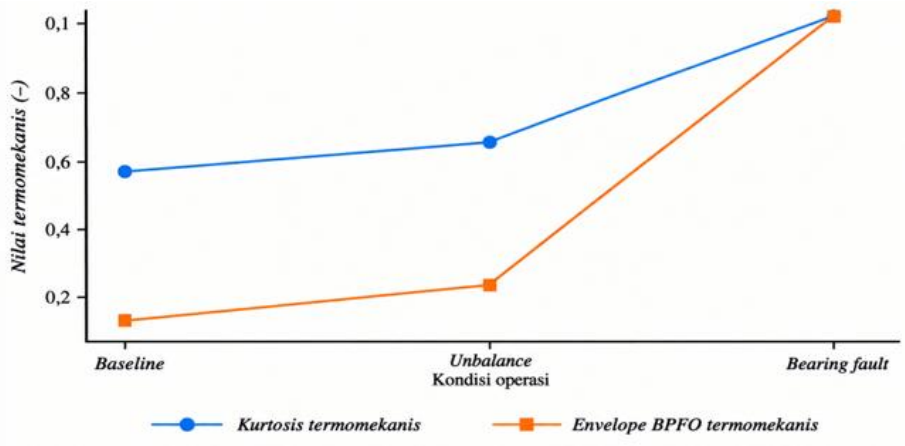
Gambar 5: Spektrum FFT representatif yang membandingkan *baseline, unbalance, dan early bearing fault*

3.4. Indikasi awal kerusakan bearing melalui kurtosis dan envelope spectrum

Gambar 6 membandingkan indikator kurtosis dan selubung BPFO yang telah dinormalisasi. Pada kondisi normal, keduanya relatif rendah. Perubahan pada masing-masing skenario menunjukkan bahwa tidak semua gangguan mekanis meningkatkan indikator periodik dan impulsif dalam besaran yang sama. Pada kondisi ketidakseimbangan, kurtosis meningkat dari 3,12 menjadi 3,48, sedangkan indikator selubung BPFO berubah dari 0,06 menjadi 0,09. Peningkatan tersebut lebih kecil daripada perubahan amplitudo 1×RPM. Dengan demikian, ciri yang paling menonjol pada skenario ini tetap berada pada komponen frekuensi fundamental.

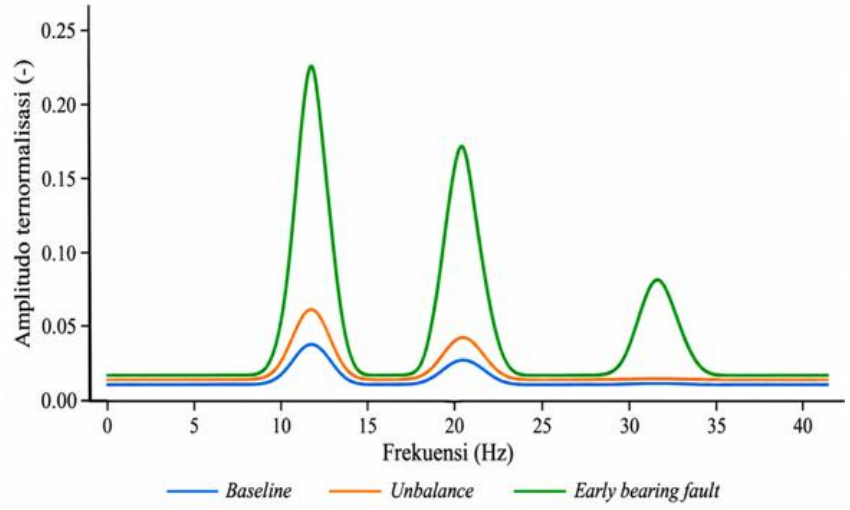
Pada kondisi indikasi awal kerusakan bantalan, kurtosis meningkat menjadi 5,86 dan indikator selubung BPFO menjadi 0,41. Kedua nilai tersebut memperlihatkan respons yang lebih impulsif dibandingkan kondisi normal dan ketidakseimbangan. Hasil ini mendukung penelusuran lebih lanjut terhadap kemungkinan gangguan lokal pada bantalan. Penggunaan kurtosis dan analisis selubung secara bersama memberikan sudut pandang tambahan terhadap pemeriksaan RMS dan amplitudo 1×RPM. Hasil tersebut menggambarkan perbedaan respons pada skenario pengujian, tetapi belum menyediakan ukuran akurasi klasifikasi atau sensitivitas diagnostik secara kuantitatif (Iunusova dkk., 2024).

Nilai kurtosis di NDE-H sebesar 3,12 pada kondisi normal, 3,48 pada ketidakseimbangan, dan 5,86 pada indikasi awal kerusakan bantalan. Perbedaan tersebut mengarah pada peningkatan impuls yang lebih jelas pada skenario ketiga, meskipun penyebab pastinya masih perlu didukung verifikasi kondisi bantalan.



Gambar 6: Perbandingan indikator kurtosis dan selubung BPFO yang dinormalisasi

Gambar 7 memperlihatkan komponen spektrum selubung di sekitar 11,2 Hz dan 20,8 Hz, yang dalam naskah diidentifikasi sebagai BPFO dan BPFI. Puncak-puncak tersebut lebih menonjol pada skenario indikasi awal kerusakan bantalan. Penafsiran komponen tersebut bergantung pada kecocokannya dengan frekuensi teoritis yang ditentukan oleh geometri dan spesifikasi bantalan (Iunusova dkk., 2024; Mishra, 2026).



Gambar 7: Spektrum selubung representatif yang menunjukkan komponen BPFO dan BPFI

3.5 Pemisahan gejala unbalance dan early bearing fault

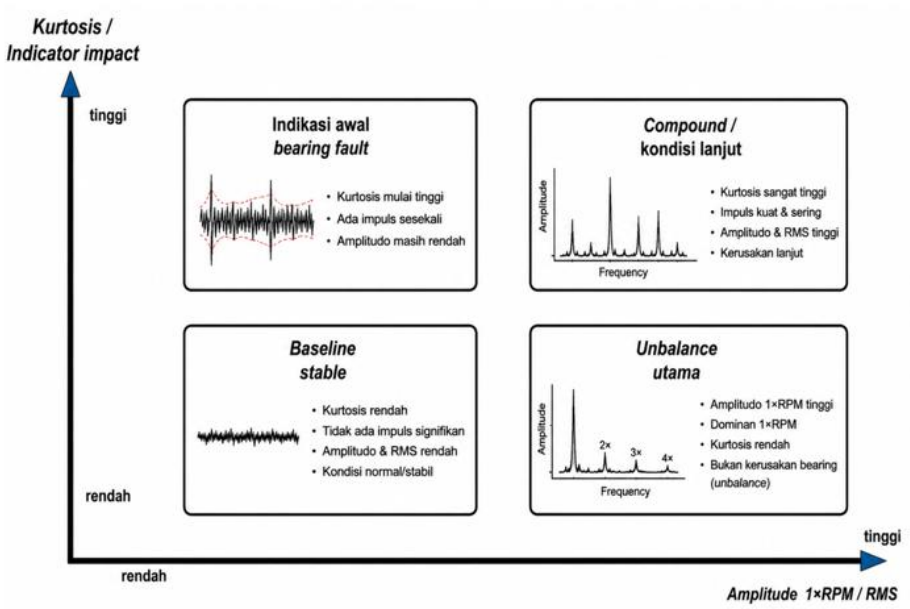
Dalam praktik pemeliharaan, hasil pengukuran perlu diterjemahkan menjadi langkah pemeriksaan yang sederhana. RMS, amplitudo 1×RPM, kurtosis, dan indikator selubung dapat dipakai secara bertahap untuk membantu mengidentifikasi komponen yang perlu diperiksa lebih dahulu.

Setiap indikator memiliki kegunaan yang berbeda. Kenaikan RMS membantu mendeteksi perubahan kondisi umum, amplitudo 1×RPM mengarahkan perhatian pada keseimbangan rotor, sedangkan kurtosis dan spektrum selubung membantu mengenali respons impulsif. Ringkasan pola indikator pada ketiga kondisi disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4: Perbandingan Indikator Getaran Pada Tiga Kondisi Pengujian

Indikator	Normal	Ketidakseimbangan rotor	Indikasi kerusakan bantalan
RMS	Rendah dan stabil	Meningkat konsisten	Meningkat ringan hingga sedang
Amplitudo 1×RPM	Kecil	Sangat dominan	Tidak selalu dominan
Harmonik putaran	Terbatas	Muncul saat keparahan naik	Bukan ciri utama awal
Kurtosis	Sekitar 3	Naik ringan	Naik jelas *(>4,5)*
Envelope BPFO/BPFI	Sangat kecil	Kecil	Meningkat nyata
Interpretasi dominan	Kondisi sehat	Gangguan distribusi massa rotor	Gangguan lokal pada elemen/lintasan bearing

Tabel 4 menunjukkan bahwa pemisahan gejala sebaiknya mempertimbangkan beberapa indikator sekaligus. RMS berguna untuk pemeriksaan awal, sedangkan amplitudo 1×RPM lebih relevan untuk menilai kemungkinan ketidakseimbangan. Kenaikan kurtosis dan indikator BPFO/BPFI menjadi alasan untuk melakukan pemeriksaan lanjutan pada bantalan.



Gambar 8: Peta interpretasi getaran berdasarkan indikator periodik dan impulsif

Gambar 8 menyajikan peta interpretasi berdasarkan dominasi indikator getaran periodik dan impulsif. Peta tersebut dapat membantu menentukan arah pemeriksaan awal, tetapi belum dapat diperlakukan sebagai model klasifikasi yang tervalidasi tanpa ambang batas dan evaluasi kesalahan diagnosis.

3.6. Implikasi terhadap operasi mikrohidro pedesaan

Hasil penelitian dapat dimanfaatkan sebagai dasar pemantauan bertingkat pada PLTMH skala kecil. Pemantauan dimulai dengan pencatatan kondisi normal, diikuti pengamatan berkala nilai RMS dan amplitudo 1×RPM. Jika komponen 1×RPM meningkat, pemeriksaan dapat diarahkan pada rotor, puli, serta kemungkinan endapan sedimen. Apabila kurtosis dan indikator selubung meningkat, perhatian dapat dialihkan ke bantalan dan sistem pelumasannya. Tabel 5 merangkum langkah pemeriksaan yang disarankan berdasarkan perubahan indikator tersebut.

Tabel 5: Indikator Pemantauan Dan Tindak Lanjut Pemeriksaan Komponen

Indikator pemantauan	Makna praktis	Tindakan yang disarankan
Tren RMS	Screening awal kenaikan getaran total	Periksa perubahan debit, fondasi, kekencangan, dan kondisi umum rotor
Amplitudo 1×RPM	Indikator utama *unbalance* rotor	Lakukan *inspeksi balancing, pulley, poros,* dan deposisi sedimen
Kurtosis/crest factor	*Screening* impulsif untuk cacat dini	Evaluasi pelumasan dan inspeksi visual *bearing*
Envelope BPFO/BPFI	Konfirmasi gejala kerusakan *bearing*	Jadwalkan penggantian *bearing* atau pembongkaran inspeksi

Sebagaimana dirangkum pada Tabel 5, peningkatan RMS dapat menjadi tanda awal perubahan kondisi operasi atau gangguan mekanis. Pemeriksaan lanjutan perlu mencakup kondisi aliran, fondasi, pengencangan komponen, dan perubahan karakteristik rotor.

Peningkatan amplitudo 1×RPM dapat menjadi dasar untuk memeriksa keseimbangan rotor, pemasangan puli, kondisi poros, serta kemungkinan pengendapan material yang tidak merata. Pemeriksaan tersebut diperlukan sebelum tindakan penyeimbangan dilakukan.

Kurtosis dan *crest factor* digunakan untuk melihat kecenderungan impuls pada sinyal, sedangkan spektrum selubung membantu menelusuri komponen yang berkaitan dengan karakteristik bantalan. Jika indikator-indikator tersebut meningkat secara konsisten, evaluasi pelumasan dan inspeksi fisik bantalan perlu diprioritaskan. Penggantian bantalan sebaiknya diputuskan setelah bukti kerusakan memadai

Penggunaan beberapa indikator secara bersamaan dapat memperkaya dasar pengambilan keputusan pemeliharaan. Meski demikian, ketepatan penilaian pada kondisi lapangan masih harus dibuktikan melalui pengujian berulang, variasi beban dan debit, serta pembandingan hasil sinyal dengan kondisi fisik komponen.

3.7. Diskusi terhadap penelitian terdahulu

Pola peningkatan amplitudo 1×RPM pada ketidakseimbangan dan indikator impulsif pada dugaan gangguan bantalan selaras dengan konsep pemantauan kondisi mesin berputar yang telah dibahas dalam literatur. Nilai tambah penelitian ini terletak pada penerapannya secara komparatif pada satu unit turbin mikrohidro tipe *Archimedes screw*, bukan pada pengembangan metode analisis sinyal yang sepenuhnya baru (Almutairi dkk., 2025; Iunusova dkk., 2024).

Acuan standar getaran seperti ISO 20816 dapat membantu memberi konteks pada tingkat getaran total, tetapi penerapannya harus mempertimbangkan kategori mesin yang sesuai. Pada turbin mikrohidro yang diuji, interpretasi RMS perlu dilengkapi spektrum frekuensi dan indikator impulsif agar gangguan yang berbeda tidak disimpulkan hanya dari satu ukuran (Khan dkk., 2022).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa analisis getaran multiindikator dapat digunakan untuk membedakan karakteristik respons ketidakseimbangan rotor dan indikasi awal gangguan bantalan pada turbin mikrohidro tipe *Archimedes screw*. Pada kondisi normal, nilai root mean square (RMS) di titik NDE-H sebesar 0,44 mm/s, amplitudo 1×RPM sebesar 0,16 mm/s, dan kurtosis sebesar 3,12. Ketidakseimbangan rotor meningkatkan RMS menjadi 1,21 mm/s dan amplitudo 1×RPM menjadi 0,86 mm/s, masing-masing sekitar 2,75 dan 5,38 kali dibandingkan kondisi normal. Sementara itu, pada kondisi indikasi awal gangguan bantalan, RMS mencapai 0,87 mm/s, kurtosis meningkat menjadi 5,86, dan indikator selubung BPFO mencapai 0,41. Hasil tersebut menunjukkan bahwa amplitudo 1×RPM lebih menonjol dalam mengidentifikasi respons ketidakseimbangan rotor, sedangkan kurtosis dan analisis selubung memberikan informasi tambahan mengenai respons impulsif yang berpotensi berkaitan dengan gangguan bantalan. Penggabungan keempat indikator memberikan dasar awal untuk menentukan prioritas pemeriksaan komponen dalam pemeliharaan turbin mikrohidro. Namun, penelitian ini masih terbatas pada satu unit turbin dengan rentang kondisi operasi yang sempit, sedangkan indikasi kerusakan bantalan belum diverifikasi melalui pemeriksaan fisik. Oleh karena itu, diperlukan pengujian lanjutan dengan variasi debit, beban, dan kondisi bantalan yang terverifikasi untuk mengevaluasi keandalan metode dalam pemantauan kondisi dan diagnosis gangguan mekanis.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat memengaruhi penelitian, analisis, atau penyusunan artikel ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

KONTRIBUSI PENULIS

Baso Alauddin : Konseptualisasi, Metodologi, Pelaksanaan Eksperimen, Pengolahan dan Analisis Data, Visualisasi, Penulisan Draf Awal, Peninjauan dan Penyuntingan Naskah.

Penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan. Seluruh penulis juga bertanggung jawab atas integritas, keakuratan, dan keabsahan isi artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Al-Hinai, A. H., Varaprasad, K. C., & Kumar, V. V. (2024). Comprehensive review of vibration-based analysis for wind turbine condition monitoring. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, *4*(3), 570–605.

Almutairi, K., Wen, H., & Sinha, J. K. (2025). Standardisation of Vibration-based Parameters for Rotor and Bearing for Machine Faults Detection Using Machine Learning Model. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, *13*(7), 504.

Askari, A. R., Gelman, L., King, R., Hickey, D., & Ball, A. D. (2024). A Novel Diagnostic Feature for a Wind Turbine Imbalance Under Variable Speed Conditions. *Sensors*, *24*(21), 7073.

Daga, A. P., & Garibaldi, L. (2024). Diagnostics of Rotating Machinery through Vibration Monitoring: Signal Processing and Pattern Analysis. *Applied Sciences*, *14*(20), 9276.

Duan, J., Peng, Z., Chen, L., & Zeng, Y. (2025). A review of OMA parameter identification for hydro-turbine unit: Challenges in condition monitoring. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *217*, 115724.

Failing, J. M., Abellán-Nebot, J. V., Benavent Nácher, S., Rosado Castellano, P., & Romero Subirón, F. (2023). A Tool Condition Monitoring System Based on Low-Cost Sensors and an IoT Platform for Rapid Deployment. *Processes*, *11*(3), 668.

González-González, F., Barbón, A., Bayón, L., & Georgious, R. (2024). An Experimental Investigation of Various Control Systems for an Archimedes Screw Turbine in a Micro-Hydropower Plant. *Applied Sciences*, *14*(2), 512.

Hassan, I. U., Panduru, K., & Walsh, J. (2024). An In-Depth Study of Vibration Sensors for Condition Monitoring. *Sensors*, *24*(3), 740.

Iunusova, E., Gonzalez, M. K., Szipka, K., & Archenti, A. (2024). Early fault diagnosis in rolling element bearings: comparative analysis of a knowledge-based and a data-driven approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *35*(5), 2327–2347.

Kannan, V., Zhang, T., & Li, H. (2024). A Review of the Intelligent Condition Monitoring of Rolling Element Bearings. *Machines*, *12*(7), 484.

Khan, M. A., Asad, B., Kudelina, K., Vaimann, T., & Kallaste, A. (2022). The Bearing Faults Detection Methods for Electrical Machines—The State of the Art. *Energies*, *16*(1), 296.

Kolok, P., Hodoň, M., Ševčík, P., Hotz, L., & Remy, N. (2025). Low-Cost IoT-Based Predictive Maintenance Using Vibration. *Sensors*, *25*(21), 6610.

Lamesgin, H. B., & Ali, A. N. (2024). Optimization of screw turbine design parameters to improve the power output and efficiency of micro-hydropower generation. *Cogent Engineering*, *11*(1).

Mika, D., Józwik, J., & Ruggiero, A. (2025). Vibration-Based Diagnostics of Rolling Element Bearings Using the Independent Component Analysis (ICA) Method. *Sensors*, *25*(23), 7371.

Mishra, R. (2026). A robust multi-class bearing fault diagnosis framework using envelope analysis, cepstrum prewhitening and machine learning. *Journal of Engineering and Applied Science*, *73*(1), 342.

Mohedano-Castillo, M. F., Díaz-Delgado, C., López-Rebollar, B. M., Salinas-Tapia, H., Posadas-Bejarano, A., & Rojas Valdez, D. (2025). Micro-Hydropower Generation Using an Archimedes Screw: Parametric Performance Analysis with CFD. *Fluids*, *10*(10), 264.

Romanssini, M., de Aguirre, P. C. C., Compassi-Severo, L., & Girardi, A. G. (2023). A Review on Vibration Monitoring Techniques for Predictive Maintenance of Rotating Machinery. *Eng*, *4*(3), 1797–1817.

Roshchupkin, O., & Pavlenko, I. (2025). Modern Methods for Diagnosing Faults in Rotor Systems: A Comprehensive Review and Prospects for AI-Based Expert Systems. *Applied Sciences*, *15*(11), 5998.

Sołowiej, P., & Łapiński, K. (2024). Recent Progress in Research on the Design and Use of an Archimedes Screw Turbine: A Review. *Sustainability*, *17*(1), 201.

Thakur, R., Kashyap, T., Kumar, R., Saini, R. K., Lee, D., Kumar, S., & Singh, T. (2024). Potential of the Archimedes screw to generate sustainable green energy for mini, micro, and pico hydro Turbine power stations: An extensive analysis. *Energy Strategy Reviews*, *55*, 101514.

Ucar, A., Karakose, M., & Kırımça, N. (2024). Artificial Intelligence for Predictive Maintenance Applications: Key Components, Trustworthiness, and Future Trends. *Applied Sciences*, *14*(2), 898.

Vulovic, M., Prvulovic, S., Tolmac, J., Radisic, B., Bajic, D., Josimovic, M., Sarenac, U., & Vulovic, S. (2025). Dynamic Balancing and Vibration Analysis of Rotor Turbines: Methodologies and Applications in Predictive Maintenance. *Symmetry*, *17*(5), 743.

Wang, S., Wang, Q., Xiao, Y., Liu, W., & Shang, M. (2022). Research on rotor system fault diagnosis method based on vibration signal feature vector transfer learning. *Engineering Failure Analysis*, *139*, 106424.