

PENGEMBANGAN SISTEM MONITORING GETARAN MOTOR LISTRIK BERBASIS IOT UNTUK DETEKSI DINI KERUSAKAN BEARING MENGGUNAKAN ADXL345

Yuwono Bimo Purnomo¹, Fajar Budi Setiawan², Erik Nurhidayat³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Surakarta

¹yuwonobimop@gmail.com, ²fajar.budi.s@gmail.com, ³eriknurhidayat16@gmail.com

Abstrak. Kerusakan motor listrik, khususnya pada *bearing*, dapat menyebabkan gangguan produksi dan kerugian operasional. Penelitian ini mengembangkan sistem *monitoring* getaran berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan sensor *accelerometer* ADXL345 dan mikrokontroler ESP32. Sensor mengukur percepatan getaran pada tiga sumbu, kemudian dihitung nilai resultan dan rata-rata sebagai indikator kondisi motor. Data dikirim melalui protokol MQTT setiap 5 detik dan ditampilkan pada OLED serta aplikasi *monitoring*. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi, yaitu tanpa beban, beban tidak seimbang (180°), dan beban seimbang (360°). Hasil menunjukkan nilai rata-rata getaran masing-masing sebesar $0,82 \text{ m/s}^2$, $30,94 \text{ m/s}^2$, dan $11,44 \text{ m/s}^2$. Peningkatan signifikan terjadi pada kondisi beban tidak seimbang, yang mengindikasikan potensi kerusakan dini. Sistem yang dikembangkan mampu mendeteksi perubahan kondisi motor secara efektif dan berpotensi mendukung *predictive maintenance*.

Kata kunci: *accelerometer* ADXL345, ESP32, IoT, MQTT, getaran, motor listrik, *predictive maintenance*.

Abstract. *Damage to electric motors, particularly in bearings, can cause production disruptions and operational losses. This study develops an IoT-based vibration monitoring system using an ADXL345 accelerometer and an ESP32 microcontroller. The sensor measures acceleration in three axes, and resultant and average values are calculated as indicators of motor condition. Data are transmitted every 5 seconds via MQTT and displayed on an OLED and monitoring application. Experiments were conducted under three conditions: no load, unbalanced load (180°), and balanced load (360°). The average vibration values obtained were 0.82 m/s^2 , 30.94 m/s^2 , and 11.44 m/s^2 , respectively. A significant increase occurs under unbalanced conditions, indicating potential early damage. The proposed system effectively detects changes in motor conditions and supports predictive maintenance applications.*

Keywords: *accelerometer* ADXL345, ESP32, IoT, MQTT, vibration, electric motor, *predictive maintenance*.

1. PENDAHULUAN

Motor listrik merupakan komponen utama dalam sistem penggerak mesin industri, termasuk mesin tenun di industri tekstil. Keandalan motor listrik sangat menentukan keberlangsungan proses produksi, karena kegagalan pada motor dapat menyebabkan *downtime* yang signifikan serta kerugian operasional [1]. Salah satu komponen yang paling rentan mengalami kerusakan adalah *bearing*, yang berfungsi sebagai penopang poros dan menjaga kestabilan rotasi. Kerusakan

bearing sering menjadi penyebab utama kegagalan motor listrik. Kerusakan *bearing* dapat berasal dari keausan, pelumasan yang buruk, maupun beban yang tidak seimbang [2].

Dalam praktik di industri, *monitoring* kondisi motor umumnya dilakukan melalui analisis getaran (*vibration analysis*). Getaran merupakan respon dinamis dari sistem mekanik yang dapat digunakan sebagai indikator kondisi mesin. Peningkatan amplitudo getaran sering kali menunjukkan adanya ketidakseimbangan (*unbalance*), *misalignment*, atau kerusakan

bearing [3]. Secara matematis, getaran pada sistem tiga sumbu dapat direpresentasikan dalam bentuk percepatan dan dihitung menggunakan nilai resultan sebagai berikut:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1)$$

Pendekatan ini umum digunakan dalam sistem *monitoring* berbasis *accelerometer* untuk memperoleh representasi total getaran dari berbagai arah pengukuran [4].

Standarisasi pada evaluasi getaran mesin telah diatur dalam standar internasional ISO 10816, yang mengklasifikasikan kondisi mesin berdasarkan tingkat getaran menjadi beberapa kategori, mulai dari kondisi baik hingga berbahaya. Standar ini banyak digunakan dalam praktik *predictive maintenance* untuk menentukan ambang batas operasional mesin [5].

Seiring dengan perkembangan teknologi, konsep **Internet of Things (IoT)** memungkinkan integrasi sistem *monitoring* dengan jaringan komunikasi sehingga data kondisi mesin dapat diakses secara *real-time*. IoT memungkinkan perangkat sensor untuk mengirimkan data secara berkelanjutan (*continuous*) ke server atau *cloud*, sehingga proses pemantauan tidak lagi bergantung pada inspeksi manual [6]. Salah satu protokol komunikasi yang banyak digunakan dalam sistem IoT adalah MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), yang dirancang untuk komunikasi ringan (*lightweight*) dengan konsumsi *bandwidth* rendah, sehingga cocok untuk aplikasi *monitoring* berbasis sensor [7].

Dalam implementasinya, sistem *monitoring* getaran dapat memanfaatkan sensor *accelerometer* berbasis MEMS seperti ADXL345. Sensor ini mampu mengukur percepatan dalam tiga sumbu dengan resolusi tinggi dan konsumsi daya rendah, sehingga banyak digunakan dalam aplikasi *monitoring* kondisi mesin [8]. Data dari sensor kemudian diproses menggunakan mikrokontroler, salah satunya ESP32, yang memiliki kemampuan komputasi tinggi serta konektivitas WiFi terintegrasi untuk mendukung komunikasi IoT [9].

Selain parameter getaran, perkembangan metode pemeliharaan berbasis data telah mengarah pada konsep *predictive maintenance*, yang memanfaatkan data sensor untuk memprediksi potensi kegagalan sebelum terjadi

kerusakan. Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi *downtime* pada sistem industri modern [10].

Dalam konteks industri 4.0, integrasi sensor, sistem komunikasi, dan analitik data menjadi kunci dalam membangun sistem *monitoring* cerdas. Implementasi *cyber-physical systems* memungkinkan pengumpulan data secara *continuous* dan analisis kondisi mesin secara *real-time* [9], [11].

Selain itu, perkembangan teknologi sensor MEMS telah memungkinkan penggunaan *accelerometer* berbiaya rendah untuk aplikasi *monitoring* industri. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sensor MEMS memiliki akurasi yang cukup baik untuk mendeteksi anomali getaran pada mesin berputar [12].

Berdasarkan permasalahan di lapangan, keterbatasan tenaga teknis menyebabkan proses *monitoring* motor listrik tidak dapat dilakukan secara optimal, terutama pada *shift* malam. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem *monitoring* otomatis yang mampu mendeteksi perubahan karakteristik getaran secara *real-time* dan memberikan informasi kondisi motor tanpa harus melakukan pengecekan langsung di lokasi.

Penelitian ini mengusulkan sistem *monitoring* dan mitigasi kerusakan dini motor/*bearing* berbasis sensor *accelerometer* ADXL345 dan komunikasi IoT menggunakan protokol MQTT. Sistem ini diharapkan mampu meningkatkan efektivitas pemeliharaan mesin melalui deteksi dini kerusakan, sehingga dapat mengurangi risiko kegagalan sistem dan *downtime* waktu produksi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pemanfaatan analisis getaran untuk mendeteksi kerusakan dini pada motor listrik telah banyak diteliti dalam beberapa dekade terakhir. Metode ini menjadi salah satu pendekatan utama dalam *predictive maintenance* karena mampu mengidentifikasi anomali pada sistem mekanik sebelum terjadi kegagalan total [1].

Penelitian [1] menunjukkan bahwa analisis getaran dapat digunakan untuk mendeteksi berbagai jenis kerusakan motor, seperti kerusakan *bearing*, rotor, dan stator, dengan tingkat akurasi yang tinggi. Studi tersebut menekankan pentingnya parameter getaran

sebagai indikator utama dalam diagnosis kondisi motor listrik.

Selanjutnya, pada penelitian [2] mengkaji karakteristik sinyal getaran pada *bearing* dan menunjukkan bahwa pola getaran tertentu dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis kerusakan secara spesifik. Hasil penelitian ini memperkuat bahwa *bearing* merupakan komponen kritis yang dapat dianalisis melalui sinyal vibrasi.

Seiring perkembangan teknologi, integrasi sistem *monitoring* dengan *Internet of Things* (IoT) mulai banyak diterapkan. Penelitian oleh [6] menjelaskan bahwa IoT memungkinkan pengumpulan data secara *real-time* dari berbagai perangkat industri, sehingga mendukung implementasi *smart manufacturing* dan *predictive maintenance*.

Dalam implementasi IoT, protokol MQTT menjadi salah satu solusi yang banyak digunakan karena efisiensinya dalam komunikasi data. MQTT memiliki keunggulan dalam hal penggunaan *bandwidth* yang rendah dan kemampuan komunikasi *publish-subscribe* yang sesuai untuk sistem *monitoring* sensor [7].

Beberapa penelitian terbaru juga telah mengembangkan sistem *monitoring* getaran berbasis mikrokontroler dan sensor *accelerometer*. Penggunaan sensor MEMS seperti ADXL345 memungkinkan pengukuran getaran secara tiga sumbu dengan biaya yang relatif rendah dan akurasi yang cukup baik untuk aplikasi industri ringan hingga menengah [8].

Selain itu, penggunaan mikrokontroler seperti ESP32 memberikan fleksibilitas dalam pengolahan data dan komunikasi nirkabel. ESP32 banyak digunakan dalam sistem IoT karena memiliki modul WiFi terintegrasi serta kemampuan pemrosesan yang cukup untuk aplikasi *monitoring real-time* [9].

Penelitian lain menunjukkan bahwa sistem *monitoring* berbasis IoT tidak hanya mampu menampilkan data secara *real-time*, tetapi juga dapat meningkatkan efisiensi pemeliharaan mesin dengan mengurangi kebutuhan inspeksi

manual serta mempercepat proses pengambilan keputusan [9].

Selain itu, penelitian oleh [10] menunjukkan bahwa pendekatan berbasis data mampu meningkatkan akurasi deteksi kerusakan hingga lebih dari 90% dibandingkan metode konvensional.

Penelitian lain juga mengkaji penggunaan sensor *accelerometer* dalam mendeteksi kerusakan *bearing* melalui analisis spektrum getaran. Hasilnya menunjukkan bahwa pola frekuensi tertentu dapat digunakan sebagai indikator spesifik jenis kerusakan [13].

Di sisi lain, penggunaan protokol MQTT dalam sistem *monitoring* industri telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi komunikasi data dengan latensi rendah dan konsumsi *bandwidth* yang minimal [14], [15].

3. METODE PENELITIAN

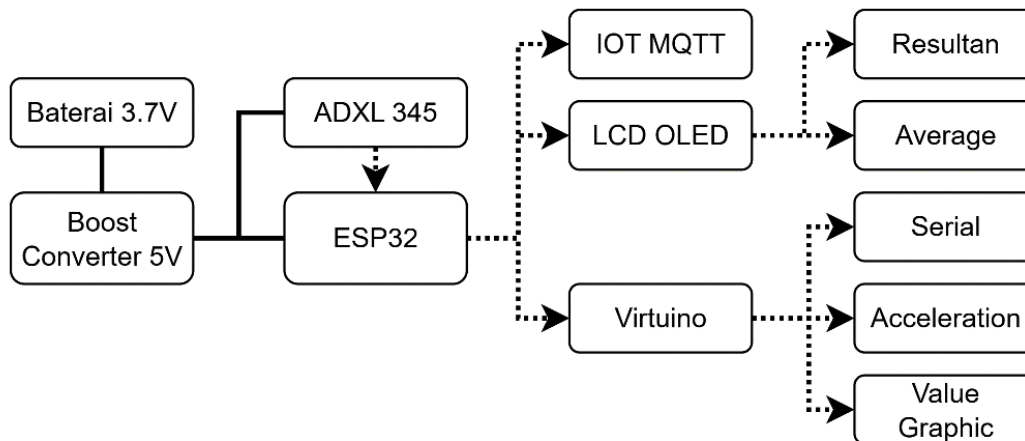
3.1. Arsitektur Sistem

Penelitian ini mengembangkan sistem *monitoring* getaran motor listrik berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem terdiri dari tiga bagian utama, yaitu akuisisi data, pemrosesan data, serta transmisi dan visualisasi data.

Pada tahap akuisisi data, sensor *accelerometer* ADXL345 digunakan untuk mengukur percepatan getaran motor dalam tiga sumbu, yaitu sumbu X, Y, dan Z. Sensor ini dipilih karena memiliki sensitivitas tinggi dan mampu mengukur getaran secara *real-time*.

Data percepatan yang diperoleh kemudian dikirimkan ke mikrokontroler ESP32 melalui komunikasi I2C. Selanjutnya, ESP32 melakukan proses pengolahan data dengan menghitung nilai resultan dan rata-rata getaran.

Setelah proses pengolahan, data dikirimkan ke server menggunakan protokol MQTT melalui koneksi WiFi. Data yang telah dikirim kemudian dapat diakses secara *real-time* melalui aplikasi *monitoring*, serta ditampilkan secara lokal menggunakan layar OLED. Diagram rangkaian secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Rangkaian

3.2. Prinsip Pengukuran dan Pengolahan Data Getaran

Pengukuran getaran dilakukan dengan menggunakan sensor *accelerometer* yang menghasilkan data percepatan dalam tiga sumbu. Untuk memperoleh nilai rerata getaran, digunakan perhitungan sebagai berikut:

$$Avg = \frac{x+y+z}{3} \quad (2)$$

Nilai resultan pada (1) digunakan sebagai indikator utama tingkat getaran, sedangkan nilai rata-rata pada (2) digunakan untuk memberikan gambaran distribusi getaran pada masing-masing sumbu. Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan standar ISO 10816 untuk mengklasifikasikan kondisi mesin ke dalam kategori normal, waspada, atau berbahaya.

3.3. Prosedur Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam mendeteksi perubahan getaran pada motor listrik. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi operasional, yaitu tanpa beban, beban tidak seimbang (180°), dan beban seimbang (360°).

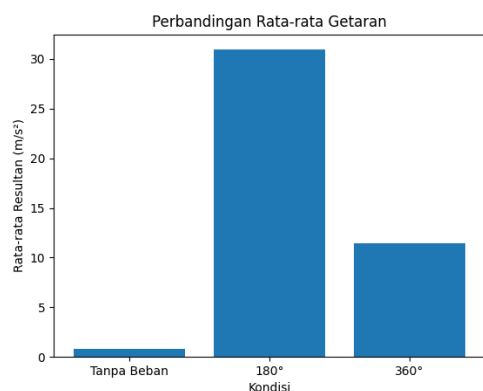
Pada kondisi tanpa beban, motor dijalankan dalam keadaan normal tanpa tambahan beban untuk mengetahui karakteristik getaran dasar. Pada kondisi beban 180°, digunakan beban tidak seimbang untuk mensimulasikan kondisi abnormal yang dapat menyebabkan peningkatan getaran. Sedangkan pada kondisi beban 360°, digunakan beban penuh yang seimbang untuk mensimulasikan kondisi kerja normal dengan beban.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setiap kondisi pengujian dilakukan sebanyak lima kali untuk memperoleh data yang representatif. Data yang diperoleh berupa nilai percepatan pada masing-masing sumbu, nilai resultan, serta nilai rata-rata getaran. Seluruh data tersebut kemudian dianalisis untuk mengevaluasi performa sistem dalam mendeteksi potensi kerusakan dini pada motor dan *bearing*.

Berdasarkan hasil pengujian pada kondisi tanpa beban, diperoleh nilai getaran yang relatif rendah dengan rentang antara 0,6 hingga 1,2 m/s² dan nilai rata-rata sebesar 0,82 m/s². Nilai ini menunjukkan bahwa motor beroperasi dalam kondisi stabil tanpa adanya gangguan mekanis yang signifikan. Jika dibandingkan dengan standar ISO 10816, kondisi ini termasuk dalam kategori baik, sehingga motor masih layak beroperasi tanpa memerlukan tindakan perbaikan.

Pada kondisi beban tidak seimbang (180°), terjadi peningkatan amplitudo getaran yang sangat signifikan. Nilai resultan getaran berada pada rentang 22,1 hingga 40,5 m/s² dengan nilai rata-rata sebesar 30,94 m/s². Peningkatan ini disebabkan oleh adanya ketidakseimbangan massa yang mengakibatkan gaya dinamis yang tidak merata pada sistem rotasi. Kondisi ini termasuk dalam kategori berbahaya berdasarkan standar ISO 10816 dan berpotensi menyebabkan kerusakan pada komponen mekanis seperti *bearing* dan poros apabila tidak segera ditangani.

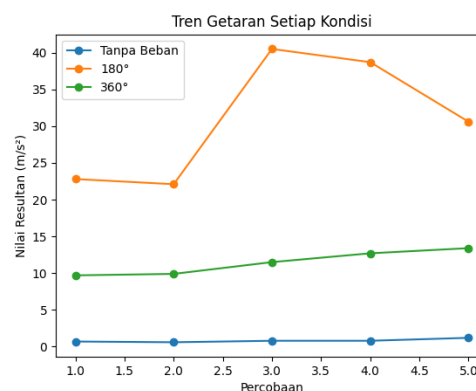


Gambar 2. Perbandingan rata-rata nilai getaran pada berbagai kondisi beban

Sementara itu, pada kondisi beban seimbang (360°), nilai getaran juga mengalami peningkatan dibandingkan kondisi tanpa beban, dengan rentang antara 9,7 hingga 13,4 m/s² dan nilai rata-rata sebesar 11,44 m/s². Meskipun respon vibrasi cukup tinggi, distribusi beban yang merata menyebabkan getaran lebih stabil dibandingkan kondisi beban tidak seimbang. Namun demikian, nilai ini tetap berada di atas batas aman sehingga memerlukan tindakan pemeliharaan untuk mencegah kerusakan lebih lanjut.

Perbandingan nilai rata-rata getaran pada ketiga kondisi pengujian ditunjukkan pada Gambar 2. Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai getaran tertinggi terjadi pada kondisi beban tidak seimbang (180°), diikuti oleh beban seimbang (360°), dan nilai terendah pada kondisi tanpa beban. Hal ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap peningkatan getaran dibandingkan besarnya beban itu sendiri.

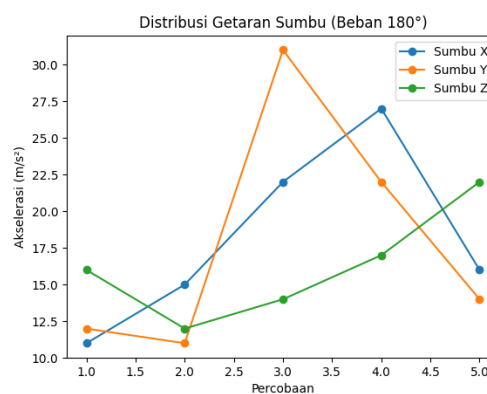
Selain itu, tren amplitudo getaran pada setiap percobaan ditunjukkan pada Gambar 3. Grafik ini menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa beban, nilai getaran cenderung stabil dengan fluktuasi yang kecil. Sebaliknya, pada kondisi beban tidak seimbang, terjadi fluktuasi yang cukup besar yang mengindikasikan ketidakstabilan sistem. Pada kondisi beban seimbang, respon vibrasi relatif lebih stabil dibandingkan beban tidak seimbang meskipun berada pada tingkat yang lebih tinggi.



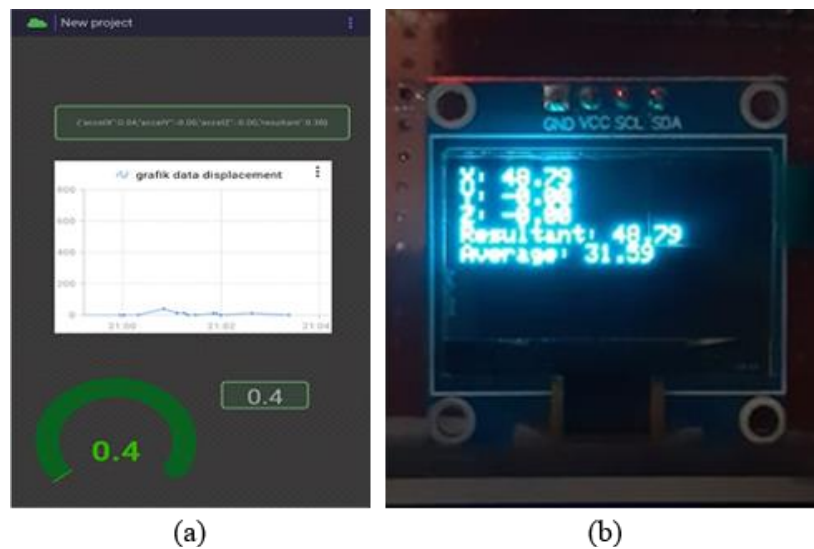
Gambar 3. Tren nilai resultan getaran pada tiap pengujian

Distribusi getaran pada masing-masing sumbu pengukuran ditunjukkan pada Gambar 3. Grafik ini menunjukkan bahwa pada kondisi beban tidak seimbang, nilai getaran pada setiap sumbu mengalami variasi yang signifikan. Hal ini menunjukkan adanya arah dominan getaran yang dipengaruhi oleh distribusi massa yang tidak merata pada sistem.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mendeteksi perubahan kondisi motor secara efektif melalui analisis getaran. Sistem dapat mengukur getaran dalam tiga sumbu, menghitung nilai resultan dan rata-rata secara *real-time*, serta mengirimkan data menggunakan protokol MQTT setiap 5 detik. Kemampuan ini memungkinkan proses *monitoring* dilakukan secara jarak jauh tanpa harus melakukan inspeksi langsung di lokasi.



Gambar 4. Distribusi getaran pada sumbu X, Y, dan Z pada kondisi beban 180°



Gambar 5. Tampilan *monitoring* getaran pada (a) aplikasi Virtuino (b) LCD OLED

Selain itu, sistem juga mampu membedakan kondisi normal dan abnormal berdasarkan nilai getaran yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki potensi untuk digunakan sebagai alat bantu dalam implementasi *predictive maintenance* pada industri.

Sistem *monitoring* yang dikembangkan juga diimplementasikan pada aplikasi *mobile* menggunakan *platform* Virtuino untuk menampilkan data secara *real-time*. Hasil pengujian pada Gambar 5 (a) menunjukkan bahwa data getaran yang dikirim melalui protokol MQTT dapat ditampilkan dengan baik dalam bentuk grafik dan indikator nilai. Selain itu, pada Gambar 5 (b) menunjukkan data juga ditampilkan secara lokal menggunakan OLED yang terhubung dengan ESP32, sehingga memungkinkan pemantauan langsung pada perangkat. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan visualisasi data baik secara lokal maupun jarak jauh.

Secara keseluruhan, dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi sensor *accelerometer* ADXL345 dengan sistem IoT berbasis ESP32 dan MQTT dapat digunakan secara efektif untuk *monitoring* kondisi motor listrik. Namun, sistem ini masih memiliki keterbatasan, seperti belum adanya fitur analisis lanjutan berbasis *machine learning* serta penggunaan sensor yang masih dalam kategori non-industri. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan akurasi dan keandalan sistem dalam aplikasi industri skala besar.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem *monitoring* getaran motor listrik berbasis sensor *accelerometer* ADXL345 dan *Internet of Things* (IoT) berhasil dikembangkan dan berfungsi dengan baik. Sistem mampu mengukur getaran dalam tiga sumbu, menghitung nilai resultan dan rata-rata, serta mengirimkan data secara *real-time* menggunakan protokol MQTT.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kondisi tanpa beban menghasilkan nilai getaran rata-rata sebesar $0,82 \text{ m/s}^2$ yang termasuk dalam kategori normal. Pada kondisi beban tidak seimbang (180°), terjadi peningkatan getaran yang signifikan hingga rata-rata $30,94 \text{ m/s}^2$, yang mengindikasikan kondisi berbahaya dan berpotensi menyebabkan kerusakan pada komponen motor, khususnya *bearing*. Sementara itu, pada kondisi beban seimbang (360°), nilai getaran rata-rata sebesar $11,44 \text{ m/s}^2$ menunjukkan kondisi tidak aman, meskipun lebih stabil dibandingkan kondisi tidak seimbang.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap peningkatan getaran dibandingkan besarnya beban itu sendiri. Sistem yang dikembangkan mampu mendeteksi perubahan karakteristik getaran secara efektif dan dapat digunakan sebagai alat bantu dalam implementasi pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak terkait yang telah memberikan dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review," *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, Dec. 2005, doi: 10.1109/TEC.2005.847955.
- [2] M. S. Patil, J. Mathew, and P. K. RajendraKumar, "Bearing Signature Analysis as a Medium for Fault Detection: A Review," *Journal of Tribology*, vol. 130, no. 1, p. 014001, Jan. 2008, doi: 10.1115/1.2805445.
- [3] R. B. Randall, *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*, 1st ed. Wiley, 2011. doi: 10.1002/9780470977668.
- [4] C. Scheffer and P. Girdhar, *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Oxford, UK: Elsevier, 2004. doi: 10.1016/B978-0-7506-6275-8.X5000-0.
- [5] *Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*, ISO 10816-3, Geneva, Switzerland., 2009. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/50528.html>
- [6] L. Da Xu, W. He, and S. Li, "Internet of things in industries: A survey," *IEEE Transactions on industrial informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, 2014.
- [7] Andrew Banks and Rahul Gupta, *MQTT Version 3.1.1*. OASIS, 2014.
- [8] Analog Devices, "ADXL345: 3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g Digital Accelerometer." Analog Devices, Inc., 2010. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf>
- [9] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems," *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18–23, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- [10] A. Rai and S. K. Upadhyay, "Machine Learning for Predictive Maintenance," in *Artificial Intelligence and Machine Learning in Business Management*, CRC Press, 2021. doi: 10.1201/9781003120612-14.
- [11] H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig, "Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group," acatech – National Academy of Science and Engineering, Apr. 2013. [Online]. Available: <https://www.din.de/resource/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>
- [12] S. Yin, X. Li, H. Gao, and O. Kaynak, "Data-Based Techniques for Fault Detection and Diagnosis in Industrial Control Systems: A Review," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 11, pp. 6446–6454, Nov. 2014.
- [13] A. Widodo and B.-S. Yang, "Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 6, pp. 2560–2574, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.ymssp.2006.12.007.
- [14] T. Yokotani and Y. Sasaki, "Comparison with HTTP and MQTT on required network resources for IoT," in *2016 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*, Bandung, Indonesia: IEEE, Sep. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCEREC.2016.7814989.
- [15] A. Wijoseno, H. Putra Uranus, and J. Pangaribuan, "PENGENDALIAN PENGISIAN AIR OTOMATIS MENGGUNAKAN ESP32, MQTT, DAN KODULAR DENGAN NOTIFIKASI WHATSAPP DAN DATA LOGGING MELALUI GOOGLE SHEETS," *JITET*, vol. 13, no. 3, Jul. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3.7139.