

Rancang Bangun Modul Akuisisi Data Getaran, Suhu, Suara, dan RPM Berbasis Transmisi Seluler 2G Tanpa Gateway untuk Monitoring Real-Time Motor Tiga Fasa

Dafit Ody Endriantono¹, Ahmad Zen Ashari²

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Sarjana Terapan Teknik Elektronika, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Jl. Raya ITS – Kampus PENS, Sukolilo, Surabaya

*E-mail: dafitody118@gmail.com

Abstract

Industrial machine reliability is a cornerstone of productivity in Industry 4.0, where induction motor failure often leads to significant unplanned downtime. This research aims to develop and evaluate SIGIIO (System for Industrial Grievance Investigation through Industrial Observation), an integrated portable device for real-time condition monitoring of three-phase industrial motors. The device utilizes an ESP32-S3 microcontroller to acquire data from four critical parameters: temperature (RTD PT100), rotation speed (E180-D80NK), vibration (GY-521), and acoustic signals (INMP441). Unlike conventional systems, SIGIIO implements a gateway-less architecture using a 2G cellular network via SIM900A for direct-to-cloud transmission. Sensor validation tests showed average errors of 6.48% for temperature and 5.04% for RPM, along with consistent vibration and acoustic data acquisition stored on an SD Card. Operational testing demonstrated a battery life of 5 hours and 40 minutes and an average data latency of 2 seconds. The results indicate that SIGIIO is an effective, portable, and cost-efficient solution for early fault detection. In conclusion, the device provides a reliable tool to support predictive maintenance strategies in smart manufacturing environments.

Kata kunci: Industrial Motors; Condition Monitoring; Internet of Things; Predictive Maintenance; Gateway-less

Abstrak

Keandalan mesin produksi merupakan pilar utama produktivitas di era Industri 4.0, di mana kegagalan motor induksi seringkali menyebabkan waktu henti (*unplanned downtime*) yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji SIGIIO (*System for Industrial Grievance Investigation through Industrial Observation*), sebuah perangkat portabel terintegrasi untuk pemantauan kondisi motor industri tiga fasa secara *real-time*. Perangkat ini menggunakan mikrokontroler ESP32-S3 untuk mengakuisisi data dari empat parameter kritis: suhu (RTD PT100), kecepatan putar (E180-D80NK), getaran (GY-521), dan sinyal akustik (INMP441). Berbeda dengan sistem konvensional, SIGIIO mengimplementasikan arsitektur *gateway-less* menggunakan jaringan seluler 2G melalui SIM900A untuk transmisi *direct-to-cloud*. Hasil validasi sensor menunjukkan rata-rata error sebesar 6,48% untuk suhu dan 5,04% untuk RPM, serta akuisisi data getaran dan suara yang konsisten tersimpan pada SD Card. Pengujian operasional menunjukkan ketahanan baterai selama 5 jam 40 menit dan rata-rata latensi data sebesar 2 detik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SIGIIO merupakan solusi yang efektif, portabel, dan efisien secara biaya untuk deteksi dini kerusakan mesin. Disimpulkan, perangkat ini menjadi instrumen yang reliabel untuk mendukung strategi pemeliharaan prediktif pada lingkungan manufaktur cerdas.

Kata kunci: Motor Industri; Pemantauan Kondisi; Sistem Terkoneksi; Pemeliharaan Prediktif; Tanpa Gateway

1. Pendahuluan

Di era Industri 4.0, keandalan mesin produksi menjadi pilar utama dalam menjaga produktivitas dan efisiensi manufaktur [1]. Motor induksi tiga fasa merupakan komponen penggerak yang paling banyak digunakan di industri karena konstruksinya yang kokoh dan efisiensinya yang tinggi [2]. Namun, operasional motor yang terus-menerus dalam beban tinggi seringkali luput dari pemantauan berkala, yang berujung pada kerusakan fatal atau *unplanned downtime* [3]. Data industri menunjukkan bahwa kegagalan motor dapat menyebabkan kerugian finansial yang signifikan, di mana biaya perbaikan dan kehilangan waktu produksi bisa mencapai ribuan dolar per jam pada lini manufaktur skala besar [4, 5].

Faktor utama kegagalan motor tiga fasa umumnya diawali oleh anomali pada parameter fisik seperti kenaikan suhu yang ekstrem, getaran (*vibration*) yang tidak normal, suara bising (*noise*), serta fluktuasi RPM yang tidak stabil [6]. Kegagalan mekanis seperti kerusakan bearing menyumbang sekitar 40% dari total kerusakan motor, yang biasanya dapat dideteksi lebih awal melalui analisis getaran dan suhu [7, 8]. Sayangnya, metode pemantauan konvensional masih

banyak bergantung pada inspeksi manual menggunakan alat ukur portabel yang rawan akan kesalahan manusia (*human error*) dan tidak mampu memberikan data secara *real-time* [9].

Penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) hadir sebagai solusi untuk pemantauan kondisi mesin (*condition monitoring*) secara otomatis [10, 11]. Beberapa penelitian terdahulu berfokus pada sistem berbasis *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), *Zonal Intercommunication Global-standard* (ZigBee), atau *Long Range* (LoRa), namun arsitektur tersebut sangat bergantung pada infrastruktur gateway lokal yang rentan terhadap interferensi elektromagnetik di area pabrik yang luas [12, 13, 14]. Akibatnya, adopsi IoT pada industri menengah seringkali terhambat oleh kompleksitas integrasi jaringan lokal tersebut.

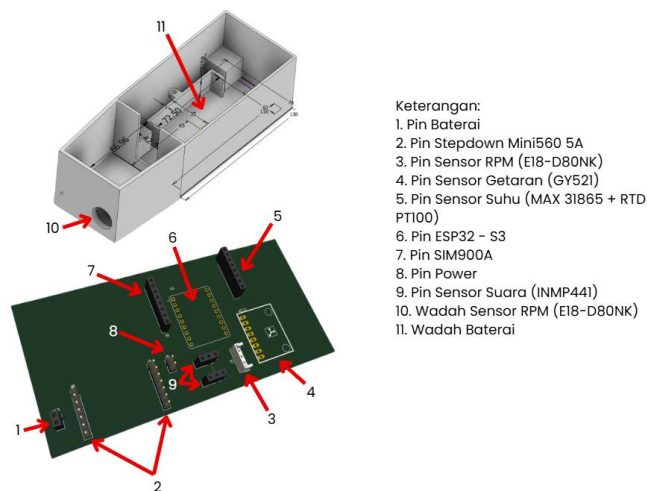
Untuk mengisi celah riset (*research gap*) tersebut, penelitian ini mengusulkan SIGIIO yang mampu mendeteksi suhu, getaran, suara, dan RPM secara simultan. Inovasi utama dari sistem ini adalah arsitektur *gateway-less*, di mana data dikirimkan secara langsung (*direct transmission*) melalui jaringan seluler 2G ke *cloud server*. Pendekatan ini dipilih untuk memastikan jangkauan transmisi yang luas dan kemudahan instalasi tanpa bergantung pada infrastruktur lokal perusahaan. Uji coba prototipe implementasi sistem ini dilakukan untuk memonitor performa motor tiga fasa pada skala laboratorium, sehingga potensi kerusakan dapat dideteksi lebih dini guna mendukung strategi *predictive maintenance* yang lebih efisien [15].

2. Metode Penelitian

Tahapan penelitian ini meliputi proses perancangan desain fisik perangkat keras, penyusunan arsitektur sistem secara menyeluruh, serta pelaksanaan prosedur pengujian. Rangkaian tahapan ini dilakukan untuk memverifikasi dan memvalidasi keandalan fungsional dari modul SIGIIO yang dikembangkan.

2.1 Prototipe Perangkat SIGIIO

Modul SIGIIO dirancang menggunakan wadah berbahan plastik dengan bentuk geometri persegi panjang yang memiliki dimensi 19,5 cm x 6,8 cm x 6,2 cm. Seluruh komponen utama sistem diintegrasikan di dalam wadah tersebut, yang meliputi unit pemroses ESP32-S3, modul komunikasi SIM900A, serta sistem catu daya berupa dua unit baterai 18650 dan regulator tegangan *step-down* Mini560 5A. Untuk akuisisi data, sistem ini menyatukan berbagai sensor spesifik, yakni sensor suhu RTD PT100 (terintegrasi dengan MAX31865), akselerometer GY-521 untuk getaran, sensor suara INMP441, serta sensor kecepatan putar E18-D80NK. Visualisasi dari rancangan fisik perangkat SIGIIO ini disajikan pada Gambar 1.



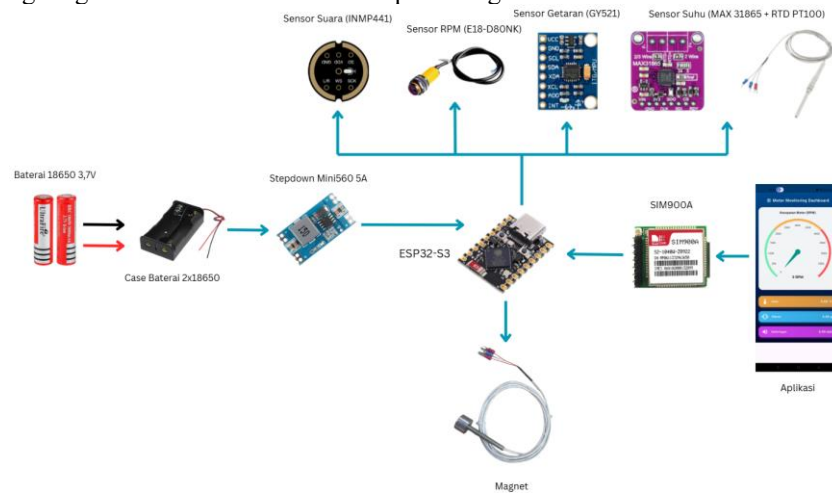
Gambar 1. Desain mekanik wadah (*enclosure*) dan tata letak komponen elektronik SIGIIO

2.2 Arsitektur dan Skema Perangkat SIGIIO

Pengembangan perangkat SIGIIO diarahkan untuk melakukan observasi parameter mekanis pada motor industri tiga fasa, meliputi akselerasi getaran, temperatur, sinyal suara, dan kecepatan putar secara *real-time*. Data tersebut dikumpulkan sebagai basis informasi bagi strategi pemeliharaan prediktif. Arsitektur sistem mengandalkan mikrokontroler ESP32-S3 sebagai otak pemrosesan pusat yang seluruh komponennya diintegrasikan ke dalam sebuah wadah ringkas (*portable*). Detail mengenai interkoneksi antar komponen disajikan melalui diagram skematik pada Gambar 2.

Instrumentasi sensor pada modul ini mencakup GY-521 untuk analisis vibrasi, E18-D80NK sebagai sensor kecepatan (*tachometer*), serta mikrofon MEMS INMP441 untuk menangkap profil akustik mesin. Guna menjamin presisi pada pengukuran suhu, sistem menggunakan sensor RTD PT100 yang dipadukan dengan modul konverter MAX31865. Seluruh jalur komunikasi data dari tiap-tiap sensor tersebut dihubungkan secara langsung menuju terminal *input-output* (I/O) pada ESP32-S3. Energi perangkat disuplai oleh dua buah baterai 18650 (3,7V) yang dirangkai dalam satu case, di mana tegangannya diturunkan menggunakan modul *step-down* Mini560 5A agar sesuai dengan kebutuhan level tegangan sistem. Untuk konektivitas, SIGIIO menggunakan modul SIM900A yang memungkinkan transmisi data

langsung ke *cloud server* melalui jaringan seluler 2G tanpa memerlukan infrastruktur *gateway* tambahan. Perangkat ini juga dilengkapi dengan magnet pada bagian bawah wadah untuk memastikan modul dapat terpasang dengan kuat dan stabil pada *casing* besi motor industri. Data yang telah dikirim kemudian ditampilkan pada aplikasi monitoring sebagai pusat informasi bagi pengguna. Semua komponen disusun secara sistematis dalam satu sistem tertutup yang dirancang untuk ketahanan di lingkungan industri serta kemudahan pemasangan.



Gambar 2. Arsitektur perangkat keras dan konektivitas SIGIIO

2.3 Perancangan Antarmuka Aplikasi SIGIIO

Guna memvisualisasikan hasil akuisisi data secara seketika (*real-time*), aplikasi SIGIIO dibangun menggunakan kerangka kerja (*framework*) Flutter. Tahap perancangan antarmuka dilakukan melalui Figma untuk menjamin tata letak yang ergonomis, responsif, serta intuitif bagi operator di sektor industri. Perangkat lunak ini mengintegrasikan monitoring parameter krusial motor tiga fasa, yang mencakup laju rotasi (RPM) melalui indikator gauge meter, serta pemantauan suhu, level getaran, dan intensitas kebisingan untuk mendukung efektivitas strategi *predictive maintenance*. Ilustrasi rancangan antarmuka aplikasi disajikan pada Gambar 3.

Halaman Utama



Gambar 3. Visualisasi rancangan antarmuka pada aplikasi pemantauan SIGIIO

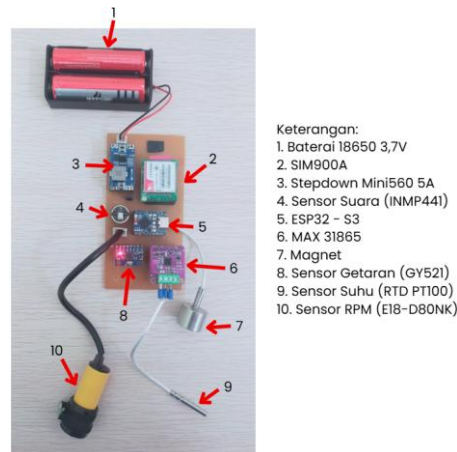
2.4 Alat Pendukung Pengujian

Prosedur verifikasi keandalan SIGIIO dilakukan melalui pendekatan komparatif, di mana hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan instrumen referensi standar untuk memastikan akurasi sistem. Sensor DHT11 digunakan sebagai pembanding untuk memvalidasi hasil pembacaan suhu dari sensor RTD PT100 dengan MAX31865. Untuk validasi kecepatan putar, sensor TCRT5000 digunakan sebagai pembanding terhadap hasil pembacaan sensor E18-D80NK guna memverifikasi akurasi nilai RPM motor. Pada parameter getaran, sensor ADXL dimanfaatkan untuk membandingkan tingkat presisi deteksi vibrasi terhadap sensor GY-521. Selain itu, modul SD Card digunakan untuk menyimpan data rekaman dari sensor suara INMP441 guna diverifikasi kualitas audionya melalui perangkat laptop. Perangkat Android juga digunakan untuk memverifikasi pengiriman data seluler dan memantau tampilan parameter pada aplikasi secara *real-time*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penelitian

Hasil perancangan perangkat keras (*hardware*) SIGIIO dengan menggunakan mikrokontroler ESP32-S3 secara keseluruhan pada bagian *Printed Circuit Board* (PCB) dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Representasi tata letak *Printed Circuit Board* (PCB) pada sistem SIGIIO

Arsitektur elektronik SIGIIO dibangun melalui integrasi fungsional berbagai komponen sensorik dan unit kendali. Pusat pemrosesan data menggunakan mikrokontroler ESP32-S3 yang mensinkronisasi input dari sensor suhu RTD PT100 (via konverter MAX31865), akselerometer GY-521 untuk getaran, sensor akustik INMP441, serta sensor kecepatan E18-D80NK. Untuk mendukung mobilitas dan transmisi data, sistem ini dilengkapi modul seluler SIM900A serta manajemen daya yang terdiri dari sepasang baterai 18650 (3,7V) dan regulator *step-down* Mini560 5A. Rangkaian ini dikonfigurasi agar mampu beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada infrastruktur *gateway* tambahan.

Seluruh rangkaian komponen tersebut diatur secara terstruktur di dalam sebuah selubung pelindung (*casing*) yang diproduksi menggunakan teknologi cetak tiga dimensi (*3D printing*) dengan dimensi fisik 19,5 cm x 6,8 cm x 6,2 cm, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil perancangan wadah (*enclosure*) modul: (a) Tampak depan, (b) Tampak dalam (unit elektronik), (c) Tampak bawah, (d) Sisi dalam bagian belakang.

Sistem perangkat keras tersebut disinergikan dengan aplikasi SIGIIO, sebuah perangkat lunak yang dirancang berbasis *framework* Flutter melalui *Integrated Development Environment* (IDE) Visual Studio Code. Aplikasi ini berfungsi sebagai pusat monitoring yang menyajikan informasi secara *real-time* terkait kecepatan putar motor (RPM), suhu operasional, tingkat vibrasi, dan intensitas kebisingan mesin, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Tampilan akhir aplikasi SIGIIO

Aplikasi SIGIIO dirancang dengan antarmuka yang intuitif di mana pengguna dapat memantau empat parameter kritis secara simultan melalui satu dashboard utama. Data yang dikirimkan oleh modul melalui jaringan seluler 2G akan langsung divisualisasikan dalam bentuk angka digital dan gauge meter untuk memudahkan *engineer* dalam melakukan analisis kondisi mesin.

Setelah seluruh sistem terintegrasi, perangkat diuji coba melalui proses implementasi langsung pada unit mesin di lapangan. Ilustrasi pemasangan perangkat SIGIIO pada unit motor industri tiga fasa disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Ilustrasi pemasangan SIGIIO dalam motor industri 3 fasa

3.2 Evaluasi Kinerja Perangkat SIGIIO

Rangkaian uji fungsionalitas diimplementasikan guna mengevaluasi performa setiap modul elektronik maupun integrasi sistem SIGIIO secara menyeluruh, dengan rincian sebagai berikut:

3.2.1 Verifikasi Ketelitian Sensor

Validasi terhadap sensor merupakan langkah fundamental dalam menjamin integritas data yang diakuisisi oleh modul SIGIIO. Prosedur ini dijalankan dengan mengomparasikan keluaran data dari tiap sensor pada perangkat terhadap instrumen ukur standar yang berfungsi sebagai referensi (*kalibrator*). Guna memperoleh tingkat presisi dan reliabilitas yang tinggi, setiap parameter diuji melalui 15 kali pengulangan dalam kondisi operasional nyata. Data hasil perbandingan untuk variabel suhu (RTD PT100) serta kecepatan rotasi motor (E180-D80NK) dirangkum dalam Tabel 1. Sementara itu, karakteristik getaran pada sensor GY-521 dan ADXL dalam skenario tanpa beban dapat dicermati pada Tabel 2.

Tabel 1. Data komparatif validasi sensor suhu dan rotasi motor (RPM)

No.	Sensor Suhu RTD PT100 dengan MAX31865 (°C)	DHT 11 (°C)	Error (°C)	No	Sensor RPM E180- D80NK (RPM)	TCRT5000 (RPM)	Error (RPM)
1.	24,52	25,8	1,28	1.	1622,18	1544,25	77,93
2.	24,52	25,9	1,38	2.	1614,42	1423,76	190,66
3.	24,48	25,9	1,42	3.	1609,37	1485,44	123,93
4.	24,52	26,1	1,58	4.	1466,09	1525,54	59,45
5.	24,52	26,1	1,58	5.	1512,96	1551,6	38,64
6.	24,52	26,2	1,68	6.	1403,42	1428,54	25,12
7.	24,55	26,2	1,65	7.	1472,23	1488,55	16,32
8.	24,55	26,2	1,65	8.	1376,95	1527,56	150,61
9.	24,55	26,2	1,65	9.	1315,02	1412,91	97,89
10.	24,52	26,2	1,68	10.	1554,76	1478,39	76,37
11.	24,52	26,2	1,68	11.	1430,59	1520,96	90,37
12.	24,55	26,2	1,65	12.	1629,89	1548,62	81,27
13.	24,55	26,2	1,65	13.	1479,43	1426,6	52,83
14.	24,58	26,2	1,62	14.	1521,63	1487,29	34,34
15.	24,55	26,2	1,65	15.	1549,06	1526,74	22,32
Rata-rata	24,53	26,12	1,59	-	1505,89	1494,65	75,87

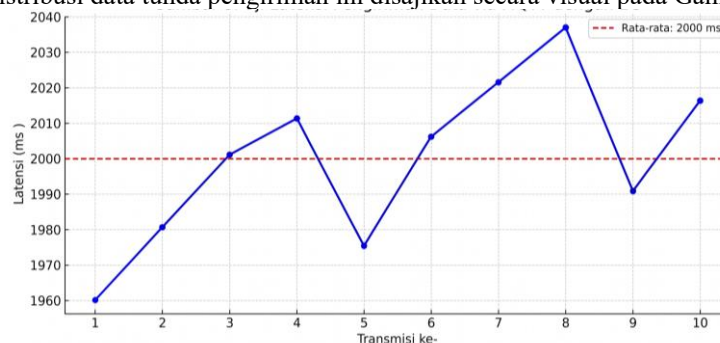
Tabel 2. Hasil pengujian validasi sensor getaran pada kondisi tanpa getaran dan ada getaran

No.	Sensor Getaran GY-521 (Tidak Ada Getaran)	ADXL (Tidak Ada Getaran)	Error	No	Sensor Getaran GY-521 (Jika Ada Getaran)	ADXL (Jika Ada Getaran)	Error
1.	0,0087	0,0033	0,0054	1.	0,2895	0,3375	0,0480
2.	0,0038	0,0054	0,0016	2.	0,2628	0,4412	0,1784
3.	0,0087	0,0058	0,0029	3.	0,2934	0,4855	0,1921
4.	0,0052	0,0056	0,0004	4.	0,1563	0,3485	0,1922
5.	0,0052	0,0045	0,0007	5.	0,2057	1551,6	0,1354
6.	0,0039	0,0044	0,0005	6.	0,1737	0,3411	0,2494
7.	0,0038	0,0055	0,0017	7.	0,2717	0,4231	0,0958
8.	0,0028	0,0012	0,0016	8.	0,2918	0,1759	0,3524
9.	0,0061	0,0073	0,0012	9.	0,2877	0,6442	0,1409
10.	0,0071	0,0012	0,0059	10.	0,1873	0,1468	0,3385
11.	0,0034	0,0056	0,0022	11.	0,2199	0,5258	0,0175
12.	0,0046	0,0033	0,0013	12.	0,1573	0,2374	0,3256
13.	0,0092	0,0065	0,0027	13.	0,4127	0,4829	0,0599
14.	0,0036	0,0034	0,0002	14.	0,3026	0,3528	0,0145
15.	0,0038	0,0032	0,0006	15.	0,2311	0,2881	0,4795
Rata-rata	0,0053	0,0044	0,0019	-	0,2496	0,3961	0,1880

Berdasarkan data yang disajikan, seluruh instrumen sensor pada modul SIGIIO menunjukkan deviasi minimal dengan galat rata-rata suhu 1,59 °C (6,4%) dan kecepatan putar 75,87 RPM (5,04%). Analisis getaran juga stabil dengan selisih 0,0019 (statis) dan 0,1880 (beroperasi). Hasil ini mengonfirmasi bahwa akurasi perangkat telah memenuhi standar awal aplikasi *condition monitoring* industri.

3.2.2 Evaluasi Transmisi Data melalui Aplikasi

Evaluasi koneksi seluler 2G (SIM900A) pada SIGIIO menunjukkan keberhasilan pengiriman data ke *broker Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) sebesar 100% tanpa *packet loss*. Uji latensi dari ESP32-S3 ke server selama 10 kali percobaan menghasilkan waktu tunda stabil berkisar antara 1960 ms hingga 2037 ms, dengan nilai rata-rata 2000 ms (2 detik). Distribusi data tunda pengiriman ini disajikan secara visual pada Gambar 8.

**Gambar 8.** Karakteristik latensi pengiriman data berbasis MQTT menggunakan jaringan 2G

Seperti yang disajikan pada Gambar 8, meskipun rata-rata latensi 2 detik memadai untuk pemantauan industri, fluktuasi sinyal seluler berisiko memicu delay. Untuk mengatasi keterbatasan jaringan 2G ini, pengembangan mendatang disarankan bermigrasi ke teknologi 4G guna menjamin transmisi data yang lebih cepat dan stabil.

3.3 Diskusi

Validasi sensor SIGIIO menunjukkan galat rata-rata suhu 6,48% (1,59 °C) dan kecepatan putar 5,04% (75,87 RPM). Nilai ini berada di bawah batas toleransi kritis motor induksi, karena identifikasi tren anomali lebih esensial dibanding presisi absolut [16]. Stabilitas getaran terkonfirmasi melalui selisih 0,0019 (tanpa beban) dan 0,1880 (beroperasi), didukung kejelasan akustik INMP441 untuk deteksi dini *bearing defect* atau *unbalance*. Integrasi ini membuktikan keandalan sistem dalam mengolah data multi-parameter secara simultan pada skala simulasi pemantauan motor industri.

Secara operasional, perangkat aktif hingga 5 jam 40 menit dengan rata-rata latensi transmisi 2G (SIM900A) 2 detik. Tunda ini memadai untuk *predictive maintenance* mengingat degradasi mekanis motor umumnya berkembang secara bertahap (*gradual*) [17]. Pendekatan *gateway-less* juga terbukti meningkatkan reliabilitas transmisi data untuk

target area yang terisolasi. Secara ekonomi, dengan HPP Rp 500.000 dan proyeksi pasar Rp 1.000.000, SIGIIO hadir sebagai solusi *all-in-one* yang kompetitif dan adaptif untuk pemantauan mesin berbasis ponsel pintar.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa implementasi modul SIGIIO telah berhasil memenuhi standar presisi dalam pemantauan parameter krusial motor induksi secara *real-time*. Keandalan sensor dibuktikan dengan deviasi suhu 6,48% dan RPM 5,04%, serta parameter vibrasi dan akustik yang konsisten untuk kebutuhan diagnostik mesin. Transmisi seluler 2G terbukti mumpuni dengan waktu tunda 2 detik, didukung daya operasional baterai hingga 5 jam 40 menit. Secara ekonomi, efisiensi biaya produksi (Rp 500.000) menjadikan perangkat ini solusi *all-in-one* yang kompetitif dibandingkan instrumen konvensional, guna memperkuat strategi *predictive maintenance* pada ekosistem industri cerdas.

Daftar Pustaka

- [1] D. Ramanujan, W. Z. Bernstein, N. Diaz-Elsayed, and K. R. Haapala. 2023. "The Role of Industry 4.0 Technologies in Manufacturing Sustainability Assessment," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 145(1):010801. <https://doi.org/10.1115/1.4055661>
- [2] V. G. d. Araújo, A. O.-S. Bissiriu, J. M. M. Villanueva, E. R. L. Villarreal, A. O. Salazar, R. d. A. Teixeira, and D. A. d. M. Fonsêca. 2024. "Monitoring and Diagnosing Faults in Induction Motors' Three-Phase Systems Using NARX Neural Network," *Energies*. 17(18):4609. <https://doi.org/10.3390/en17184609>
- [3] J. C. O. Ojeda, J. G. B. de Moraes, C. V. d. S. Filho, M. d. S. Pereira, J. V. d. Q. Pereira, I. C. P. Dias, E. C. M. da Silva, M. G. M. Peixoto, and M. C. Gonçalves. 2025. "Application of a Predictive Model to Reduce Unplanned Downtime in Automotive Industry Production Processes: A Sustainability Perspective," *Sustainability*. 17(9):3926. <https://doi.org/10.3390/su17093926>
- [4] M. Achouch, M. Dimitrova, K. Ziane, S. S. Karganroudi, R. Dhoub, H. Ibrahim, and M. Adda. 2022. "On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges," *Applied Sciences*. 12(16):8081. <https://doi.org/10.3390/app12168081>
- [5] F. L. Aires, G. D. Galeno, F. N. Belchior, A. M. Oliveira, and J. D. Hunt. 2025. "Enhancing three-phase induction motor reliability with health index and artificial intelligence-driven predictive maintenance," *Royal Society Open Science*. 12(5):241946. <https://doi.org/10.1098/rsos.241946>
- [6] D. Long, H. Zheng, and F. Hong. 2020. "Condition Monitoring of Industrial Equipment Based on Multi-Variables State Estimate Technique," *Applied Sciences*. 10(16):5637. <https://doi.org/10.3390/app10165637>
- [7] K. Hamani, M. Kuchar, M. Kubatko, and S. Kirschner. 2025. "Advancements in Induction Motor Fault Diagnosis and Condition Monitoring: A Comprehensive Review," *Sensors*. 25(19):5942. <https://doi.org/10.3390/s25195942>
- [8] L. Martiri, P. Esmaili, A. Moschetti, and L. Cristaldi. 2025. "Deep-Learning-Based Bearing Fault Classification Using Vibration Signals Under Variable-Speed Conditions," *Instruments*. 9(4):33. <https://doi.org/10.3390/instruments9040033>
- [9] S. H. Abdulhussain, B. M. Mahmmod, A. Alwhelat, D. Shehada, Z. I. Shihab, H. J. Mohammed, T. H. Abdulameer, M. Alsabab, M. H. Fadel, S. K. Ali, G. H. Abbood, Z. A. Asker, and A. Hussain. 2025. "A Comprehensive Review of Sensor Technologies in IoT: Technical Aspects, Challenges, and Future Directions," *Computers*. 14(8):342. <https://doi.org/10.3390/computers14080342>
- [10] T. Bányai and Á. Bányai. 2025. "Real-Time Maintenance Optimization with Industrial Internet of Things," *Applied Sciences*. 15(10):5640. <https://doi.org/10.3390/app15105640>
- [11] E. E. Etomi, N. Obi, and D. U. Onyishi. 2026. "Development and Evaluation of a Multi-Sensor IoT System for Real-Time Condition Monitoring and Fault Classification of an Industrial Electric Motor," *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*. 11(8): 1579-1598. <https://doi.org/10.51584/IJRIAS.2026.11080119>
- [12] D. Kandris and E. Anastasiadis. 2024. "Advanced Wireless Sensor Networks: Applications, Challenges and Research Trends," *Electronics*. 13(12):2268. <https://doi.org/10.3390/electronics13122268>
- [13] G. Beniwal and A. Singhrova. 2022. "A systematic literature review on IoT gateways," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. 34(10):9541-9563. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.11.007>
- [14] T. Prabhakara Rao, B. Vikas, K. Venkatesh Sharma, B. M. Parashiva Murthy, and M. Elangovan. 2025. "IoT-Based Wireless Sensor Network Architecture for Industrial Fault Monitoring," *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 12(8):295-306. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V12I8P126>
- [15] B. K. Ram, N. Sharma, A. S. Joshi, and A. Vermani. 2024. "Predictive Maintenance and Production Analysis in Smart Manufacturing," *Lecture Notes in Networks and Systems*. 1027:234-244. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61891-8_23
- [16] Y. Gu, Y. Zhang, M. Yang, and C. Li. 2023. "Motor On-Line Fault Diagnosis Method Research Based on 1D-CNN and Multi-Sensor Information," *Applied Sciences*. 13(7):4192. <https://doi.org/10.3390/app13074192>
- [17] J. M. Jakaria, J. Sabir, M. Z. Rahman, and M. F. Ali. 2025. "Hybrid deep learning framework for real-time fault detection in squirrel-cage induction motors," *PLOS ONE*. 20(11):e0336323. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0336323>