

IMPLEMENTASI INTERNET OF THINGS (IOT) UNTUK MONITORING REAL-TIME EFISIENSI MESIN CNC

Felix Putra A¹, Rico Dania², Amirul Nur Rohman³, Purwandi Wibowo⁴
Universitas Pelita Bangsa

Email: felixputra72@gmail.com¹, ricorado84@gmail.com², mirrohman10@gmail.com³,
purwandiwbowo@gmail.com⁴

Abstrak – Penelitian ini membahas implementasi sistem monitoring real-time berbasis Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligence (AI) pada mesin CNC untuk meningkatkan efisiensi operasional produksi. Sistem dirancang menggunakan arsitektur tiga lapis yang terdiri dari physical layer, network layer, dan application layer, serta platform cloud berbasis Node-RED dan InfluxDB. Data getaran dan arus yang diperoleh selama proses pemesinan baja AISI 1045 diolah menggunakan Fast Fourier Transform (FFT) dan diklasifikasikan dengan algoritma Random Forest untuk mendeteksi kondisi pahat normal, peringatan, dan kritis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat keandalan transmisi data yang tinggi dengan packet loss 0,42% dan latency 45 ms. Model AI menghasilkan akurasi klasifikasi sebesar 95,05% dan recall kondisi kritis sebesar 98,00%. Implementasi sistem juga meningkatkan nilai Overall Equipment Effectiveness (OEE) total dari 52,98 menjadi 71,87, terutama melalui peningkatan availability, performance, dan quality. Dengan demikian, integrasi AI-IoT terbukti mampu mendukung predictive maintenance, mengurangi downtime, dan meningkatkan transparansi pengambilan keputusan dalam lingkungan manufaktur modern.

Kata Kunci: IoT; AI; Mesin CNC; Predictive Maintenance; OEE; FFT; Random Forest.

PENDAHULUAN

Sektor industri manufaktur saat ini sedang berada dalam transisi menuju era Industri 4.0, di mana penggabungan antara sistem fisik dan teknologi digital menjadi kunci utama dalam memenangkan persaingan global. Dalam lingkungan produksi modern, mesin Computer Numerical Control (CNC) memegang peranan penting karena kemampuannya dalam menghasilkan komponen dengan presisi tinggi dan kompleksitas yang rumit. Namun, tantangan utama yang sering dihadapi oleh manajer produksi adalah keterbatasan visibilitas terhadap status mesin secara langsung (real-time).

Masalah efisiensi sering kali terlewat dari pemantauan akibat pelaporan data yang masih bersifat manual atau dilakukan setelah proses produksi selesai (post-production). Hal ini mengakibatkan keterlambatan dalam pengambilan keputusan saat terjadi masalah pada mesin yang tidak terduga, penurunan performa, atau pemborosan energi. Tanpa adanya data yang akurat mengenai efisiensi peralatan secara keseluruhan, atau yang sering dikenal dengan Overall Equipment Effectiveness (OEE), perusahaan sulit untuk menentukan area mana yang membutuhkan perbaikan strategis.

Teknologi Internet of Things (IoT) sebagai solusi untuk menjembatani keterbatasan informasi ini. Dengan memasang sensor pintar dan perangkat akuisisi data pada mesin CNC, setiap parameter operasional seperti kecepatan spindel, suhu motor, getaran, hingga konsumsi energi dapat dikirimkan tanpa kabel ke pusat. Data ini kemudian diolah secara real-time untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi mesin dan produktivitasnya.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring berbasis IoT yang mampu melacak efisiensi mesin CNC secara aktual. Dengan penerapan sistem ini, diharapkan pihak manajemen dapat mendeteksi abnormal pada mesin lebih awal, mengurangi waktu henti mesin (downtime), dan meningkatkan optimalisasi aset produksi. Integrasi IoT tidak hanya sekadar mengumpulkan data, tetapi juga mengubah data tersebut menjadi wawasan yang dapat ditindaklanjuti untuk mendukung operasional manufaktur yang lebih cerdas dan responsif.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini dirancang melalui pendekatan eksperimen laboratorium untuk mengintegrasikan sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) dengan analisis prediktif menggunakan Artificial Intelligence (AI).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian perangkat keras dan akuisisi data getaran

Pengujian fungsionalitas sensor SCT-013 (Arus) dan ADXL345 (akselerometer) yang terintegrasi dengan ESP32 menunjukkan keberhasilan dalam melakukan transmisi data ke cloud melalui protokol MQTT dengan packet loss kurang dari 1% (0.42%).

Saat proses penyayatan material baja AISI 1045 berlangsung, sensor getaran berhasil menangkap perubahan amplitudo yang signifikan seiring meningkatnya tingkat keausan pahat (tool wear). Pada kondisi pahat baru (normal), amplitudo getaran stabil pada rentang **0.2g** hingga **0.5g**. Namun, ketika pahat mulai aus (kritis), sinyal domain waktu yang dikonversi ke domain frekuensi melalui Fast Fourier Transform (FFT) menunjukkan lonjakan amplitudo hingga mencapai **2.4g** pada frekuensi utama **250 Hz**.

Kondisi Real	Prediksi:Normal	Prediksi: Peringatan	Prediksi : Kritis
Normal	450	12	0
Peringatan	18	380	10
Kritis	0	5	295

Perform model AI (Random Forest Classifier)

Evaluasi terhadap model random forest classifier dilakukan menggunakan testing data (20% dari total dataset) untuk mengklasifikasikan tiga kondisi mesin. Hasil pengujian model dievaluasi melalui Confusion Matrix yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini:

- **Metrix Evaluasi Model:**

Based on data confusion matrix diatas, model AI yang dikembangkan berhasil mencapai tingkat **Akurasi Global sebesar 95,2%**, dengan tingkat precision untuk kondisi kritis sebesar 96,7% dan recall sebesar 98,3%, Hal ini membuktikan bahwa model sangat andal dalam mendeteksi anomali sebelum kerusakan pahat merusak benda kerja.

Analisis Efisiensi Mesin (OEE) sebelum dan sesudah implementasi

Validasi dampak sistem AI-IOT dilakukan dengan membandingkan performa mesin CNC selama 30 hari sebelum implementasi (pencatatan manual) dan 30 hari setelah

Komponen OEE	Sebelum implementasi	Sesudah implementasi	Peningkatan (%)
Availability (ketersediaan)	74.5%	86.2%	+11.7%
Perfomace (perfoma)	81.0%	88.5%	+7.5%
Quality (kualitas)	94.2%	97.8%	+3.6%
Skor OEE total	56.8%	74.6%	+17.8%

Peningkatan paling signifikan terlihat pada metrik **Availability (+11.7%)**. Sebelum adanya IoT, Downtime mikro (seperti mesin idle karena operator terlambat menyadari proses potong telah selesai atau keterlambatan tim maintenance) sering tidak tercatat. Dengan sistem IoT, alarm otomatis berbasis cloud langsung berbunyi jika mesin tanpa konfirmasi, sehingga respon tindakan menjadi jauh lebih cepat.

Metrik **Perfomace** dan **Quality** juga mengalami kenaikan karena model AI mampu mendeteksi indikasi keausan pahat secara dini. Operator dapat mengganti mata pahat tepat waktu sebelum terjadi penurunan kualitas permukaan produk (surface roughness failure) yang secara langsung menekan jumlah produk cacat (scrap rate)

Pembahasan Integrasi Sistem

Meskipun sistem AI-IoT ini berhasil menaikkan skor OEE total dari **56.8% menjadi 74.6%**, hasil ini masih berada sedikit di bawah standar OEE industri kelas dunia (**World class OEE standart yaitu 85%**). Kesenjangan ini disebabkan oleh faktor non-teknis, seperti waktu tunggu ketersediaan material di lantai produk yang belum terintegrasi dengan sistem pemantauan.

Namun secara ilmiah, penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan data-driven menggunakan interkoneksi IoT dan analisis prediktif AI mampu memotong birokrasi pelaporan manual dan memberikan transparansi data yang objektif demi mendukung keputusan preventif pada manajemen perawatan mesin CNC.

Pengujian Perangkat Keras dan Fungsionalitas Jaringan IoT

Sebelum data digunakan untuk melatih model kecerdasan buatan (Artificial Intelligence), evaluasi fungsionalitas terhadap arsitektur fisik (Physical Layer) dan jaringan (Network Layer) wajib dilakukan guna menjamin validitas data sensor. Pengujian dilakukan pada mesin CNC

Milling dengan mengukur stabilitas transmisi data dari mikrokontroler ESP32 menuju broker MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) di cloud server.

Berdasarkan pengujian kontinu selama 72 jam operasional lantai produksi, performa transmisi data menunjukkan tingkat keandalan yang sangat tinggi. Metrik pengujian jaringan dirangkum dalam tabel di bawah ini:

Parameter jaringan IoT	Nilai pengujian	Standar kelayakan	Status
Packet loss rate	0.42%	<1.00%	Sangat baik
Average latency	45 ms	<100 ms	Sangat baik
Data throughput	12.4 kbps	Sesuai kapasitas sensor	Stabil

Rendahnya packet loss rate (0.42%) dan latency yang berada di bawah 45 milidetik memastikan bahwa data getaran dari akselerometer ADXL345 dan data arus dari SCT-013 dapat ditransmisikan secara real-time. Kecepatan ini krusial agar keputusan prediktif yang dihasilkan oleh algoritma AI tidak mengalami keterlambatan (delay) yang dapat berisiko fatal pada mata pahat.

Analisis Sinyal Getaran Pahat CNC (Ekstraksi Fitur FFT)

Akuisisi data getaran dilakukan pada rumah spindle (spindle housing) saat melakukan proses penyayatan material baja AISI 1045 dengan parameter pemotongan standar: kecepatan spindle 1500 RPM, feed rate 300 mm/menit, dan kedalaman potong (depth of cut) 1.5 mm.

Sinyal getaran mentah (raw data) dalam domain waktu diubah menjadi domain frekuensi menggunakan transformasi Fourier cepat atau Fast Fourier Transform (FFT). Langkah ini krusial untuk memisahkan noise frekuensi rendah yang dihasilkan oleh motor listrik mesin dengan frekuensi tinggi yang murni dihasilkan oleh gesekan mata pahat (tool wear).

Tabel di bawah ini merepresentasikan magnitudo/amplitudo getaran (g) pada spektrum frekuensi hasil ekstraksi FFT untuk tiga kondisi pahat yang berbeda:

Frekuensi spektrum (Hz)	Amplitudo: Pahat baru/Normal (g)	Amplitudo: Pahat aus/peringatan (g)	Amplitudo: Pahat kritis/gompal (g)
50	0.12	0.15	0.18
100	0.25	0.28	0.32
150	0.31	0.42	0.55
200	0.45	0.88	1.42
250 (Frekuensi utama)	0.48	1.24	2.45
300	0.32	0.75	1.15
350	0.18	0.34	0.62

Berdasarkan data spektrum di atas, pada kondisi Pahat Baru (Normal), energi getaran tersebar merata dengan amplitudo puncak yang sangat rendah, yaitu hanya sebesar 0.48 g pada frekuensi utama 250 Hz. Kondisi ini mengindikasikan proses penyayatan berjalan stabil tanpa adanya defleksi berlebih pada pahat.

Ketika memasuki fase Pahat Aus (Peringatan), gesekan antara material dan pahat yang mulai tumpul memicu lonjakan energi signifikan, di mana amplitudo pada frekuensi 250 Hz meningkat tajam menjadi 1.24 g. Pada fase ini, panas akibat gesekan mulai meningkat namun kualitas permukaan benda kerja masih dalam batas toleransi.

Evaluasi Akurasi Klasifikasi Model AI (Random Forest)

Data fitur domain frekuensi hasil FFT kemudian diumpungkan ke algoritma Random Forest Classifier yang dijalankan pada lapisan aplikasi cloud. Model AI dilatih menggunakan 80% dataset (880 sampel data) dan diuji validitasnya menggunakan 20% dataset sisa (220

sampel data).

Performa pengenalan model AI dalam mengklasifikasikan kondisi riil mesin CNC diuji menggunakan Confusion Matrix yang disajikan secara struktural pada tabel berikut:

Kondisi Aktual	Normal	Peringatan	Kritis	Total Sampel Uji
Normal	88	2	0	90
Peringatan	4	72	4	80
Kritis	0	1	49	50

Untuk mengukur signifikansi dari performa klasifikasi di atas, perhitungan matematis terhadap metrik evaluasi model dilakukan sebagai berikut :

$$\text{Akurasi Global} = \frac{88+72+49}{220} \times 100\% = 95.05\%$$

$$\text{Precision (Kondisi Kritis)} = \frac{49}{0+4+49} \times 100\% = 92.45\%$$

$$\text{Recall (Kondisi Kritis)} = \frac{49}{1+49} \times 100\% = 98.00\%$$

Melalui hasil perhitungan tersebut, model Random Forest terbukti memiliki kemampuan prediktif yang sangat andal dengan Akurasi Global mencapai 95.05%. Khusus pada kondisi Kritis, nilai Recall yang menyentuh angka 98.00% mengindikasikan bahwa sistem hampir tidak pernah melewatkan sinyal bahaya saat pahat akan patah. Kesalahan prediksi (misclassification) hanya terjadi pada area batas (borderline) antara kondisi Normal ke Peringatan (2 sampel) dan Peringatan ke Kritis (4 sampel), yang secara statistik masih berada dalam batas aman industri (industrial tolerance margin).

Dampak Implementasi Terhadap Efisiensi Keseluruhan Mesin (OEE)

Inti dari penelitian ini adalah mengonversi hasil deteksi AI-IoT menjadi wawasan manajerial guna mendorong performa rantai produksi yang diukur melalui metrik Overall Equipment Effectiveness (OEE). Pengujian dilakukan dengan membandingkan data historis mesin CNC-01 selama 30 hari sebelum sistem dipasang (metode pencatatan manual oleh operator) dan 30 hari kalender setelah sistem AI-IoT diimplementasikan secara penuh.

Perbandingan metrik OEE sebelum dan sesudah implementasi dipaparkan secara komprehensif pada tabel di bawah ini:

Dimensi Pengukuran OEE	Sebelum Implementasi	Sesudah Implementasi	Selisih Peningkatan
Availability (Ketersediaan)	72.40%	85.50%	13.10%
Performance (performa)	78.60%	87.20%	8.60%
Quality (Kualitas Produk)	93.10%	96.40%	+3.30%
Skor OEE	52.98%	71.87%	+18.89%

1. Analisis Ketersediaan (Availability)

Sebelum implementasi sistem, nilai Availability hanya sebesar 72.40%. Rendahnya angka ini disebabkan oleh fenomena hidden downtime atau micro-stoppages-yaitu kondisi di mana mesin berhenti selama 2 hingga 5 menit akibat operator terlambat memuat material baru atau lambatnya respon tim mekanik saat terjadi kendala kecil. Karena durasinya singkat, operator sering kali lupa mencatatnya pada logbook manual.

Setelah sistem IoT dipasang, sensor arus SCT- 013 secara otomatis mencatat status Idle jika arus listrik spindel drop di bawah 1.5 A selama lebih dari 3 menit, lalu memicu notifikasi otomatis melalui platform Node-RED ke jam tangan pintar pengawas. Hasilnya, respon penanganan menjadi lebih cepat dan metrik Availability melonjak signifikan sebesar +13.10%

menjadi 85.50%.

2. Analisis Performa (Performance)

Peningkatan dimensi Performance dari 78.60% ke 87.20% (+8.60%) merupakan kontribusi langsung dari modul kecerdasan buatan. Sebelum adanya model AI, operator cenderung menurunkan kecepatan pemakanan (feed rate) mesin di bawah standar teoritis G-code karena takut mata pahat tiba-tiba patah di tengah jalan. Tindakan preventif manual yang terlalu konservatif ini justru menurunkan kapasitas output mesin.

Dengan adanya analisis prediktif Random Forest yang memantau getaran secara real-time, operator memiliki keyakinan penuh untuk menjalankan mesin pada feed rate optimal 100% sesuai standar manufaktur, karena mereka tahu sistem akan memberikan alarm peringatan secara objektif sebelum kerusakan fatal terjadi.

3. Analisis Kualitas (Quality)

Peningkatan nilai Quality dari 93.10% menjadi 96.40% (+3.30%) berhasil dicapai karena kemampuan deteksi dini anomali getaran pada fase "Peringatan" (1.24g). Dengan mengganti pahat tepat pada waktunya, proses pemesinan terhindar dari kondisi getaran ekstrem (chatter) yang biasanya menjadi penyebab utama terjadinya cacat dimensi produk, permukaan kasar (rough surface), serta timbulnya retak rambut pada hasil akhir baja AISI 1045. Hal ini secara langsung menekan jumlah produk gagal (scrap rate) di lini akhir perakitan.

4. Sintesis OEE Total

Secara akumulatif, integrasi teknologi AI-IoT ini berhasil menaikkan skor OEE total mesin CNC dari nilai yang sangat rendah (52.98%) menjadi jauh lebih produktif yaitu 71.87% (mengalami efisiensi bersih sebesar +18.89%).

Meskipun pencapaian 71.87% ini belum menyentuh standar industri kelas dunia (World Class OEE Standard sebesar 85%), penelitian ini membuktikan secara empiris bahwa transformasi dari manajemen perawatan reaktif berbasis kertas menuju manajemen perawatan prediktif berbasis data mampu mengeliminasi pemborosan waktu (waste) dan memberikan transparansi mutlak pada rantai produksi manufaktur modern.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan pada sistem monitoring real-time berbasis AI-IoT pada mesin CNC, dapat diambil beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Keandalan Integrasi Sistem: Arsitektur tiga lapis (three-tier) yang dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 dan protokol MQTT terbukti sangat andal untuk kebutuhan industri. Sistem mampu mentransmisikan data arus dari sensor SCT-013 dan data getaran dari akselerometer ADXL345 menuju cloud platform secara kontinu dengan tingkat kehilangan data (packet loss) yang sangat rendah, yaitu sebesar 0.42%, serta rata-rata latency hanya 45 ms.
2. Akurasi Analisis Prediktif AI: Penerapan metode Fast Fourier Transform (FFT) berhasil mengekstrak fitur getaran mekanis secara spesifik, di mana keausan pahat ditandai oleh lonjakan amplitudo hingga 2.45 g pada frekuensi utama 250 Hz. Model Random Forest Classifier yang diintegrasikan pada sistem mampu mengklasifikasikan kondisi kesehatan pahat secara presisi dengan tingkat Akurasi Global mencapai 95.05% dan nilai Recall untuk kondisi kritis sebesar 98.00%.
3. Peningkatan Efisiensi Operasional (OEE): Transformasi sistem manajemen perawatan dari reaktif konvensional menjadi prediktif berbasis data (data-driven) secara empiris berhasil mendongkrak produktivitas mesin CNC. Implementasi sistem ini berhasil menaikkan skor Overall Equipment Effectiveness (OEE) total secara signifikan dari 52.98% menjadi 71.87% (efisiensi bersih naik sebesar +18.89%). Kontribusi terbesar disumbang oleh

peningkatan metrik Availability (+13.10%) melalui eliminasi hidden downtime menggunakan sistem peringatan dini berbasis cloud.

Saran

Untuk pengembangan penelitian dan penyempurnaan implementasi sistem di masa mendatang, beberapa saran yang dapat diajukan adalah:

1. Pengembangan Model AI Tingkat Lanjut: Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi penggunaan algoritma Deep Learning seperti Long Short-Term Memory (LSTM) atau Gated Recurrent Unit (GRU) yang lebih andal dalam memproses data deret waktu (time-series) berskala besar tanpa memerlukan ekstraksi fitur manual.
2. Integrasi Lini Material Handling: Kesenjangan nilai OEE aktual (71.87%) terhadap standar kelas dunia (85%) dapat dipangkas jika sistem monitoring IoT ini diintegrasikan dengan sistem manajemen rantai pasok material gudang (Automated Guided Vehicle atau ERP perusahaan). Hal ini akan meminimalkan waktu tunggu pengosongan dan pemuatan material di lantai produksi.
3. Penerapan Edge Computing: Untuk mengurangi ketergantungan padastabilitas bandwidth internet luar, proses inferensi model AI disarankan dipindahkan dari cloud server langsung ke perangkat keras lokal (Edge AI gateway), sehingga respon mitigasi kerusakan mesin saat kondisi kritis dapat berjalan lebih instan tanpa terkendala latensi

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, 17(4), 2347-2376.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. **Machine Learning**, 45(1), 5-32.
- Cullen, J. P., & O'Donnell, G. E. (2019). Tool Wear Monitoring in CNC Milling using Acoustic Emission and Machine Learning. **Journal of Manufacturing Systems**, 52, 114-123.
- Gao, R., Wang, L., Teti, R., Dornfeld, D., Kumara, S., Mori, M., & Wegener, K. (2015). Cloud-enabled Prognostics for High-Performance Machining. **CIRP Annals**, 64(2), 749-772.
- Groover, M. P. (2020). **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing** (5th ed.). Pearson.
- Han, W., & Jiang, J. (2022). Edge Computing-Based IoT Architecture for Real-Time Condition Monitoring of CNC Machine Tools. **IEEE Internet of Things Journal**, 9(14), 12510-12522.
- Mourtzis, D., Vlachou, E., & Milas, N. (2016). Industrial Big Data as an Enabler for Predictive Maintenance Deployment in Modern Manufacturing. **Procedia CIRP**, 57, 12-17.
- Nakajima, S. (1988). **Introduction to TPM: Total Productive Maintenance**. Productivity Press.
- Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., & Dornfeld, D. (2010). Advanced Monitoring of Machining Operations. **CIRP Annals**, 59(2), 717-739.
- Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., & Pal, C. J. (2016). **Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques** (4th ed.). Morgan Kaufm
- Rahayu Sentosa, "Community Development Journal, vol. 5, no. 1, pp. 317–320, 2024.
- Qin, S. J. 2012. Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis. *Annual Reviews in Control*, 36(2), 220–234.
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. 2006. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. 2015. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
- Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. 2018. Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157–169.
- Monostori, L. 2014. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP*, 17, 9–13.