

IMPLEMENTASI SISTEM MANUFAKTUR CERDAS BERBASIS AI DAN IOT PADA SENTRA KERAJINAN LOGAM IKM DI ERA INDUSTRI 4.0

Ellga Raharjo¹, Bayu Prasetyo², Raihan Abdul Fattah³, Manganju Lumban Gaol⁴,
Mondrous Andrean⁵, Dwi Irwati⁶

ellgaraharjo18@gmail.com¹, bayuprasetyo1205@outlook.com², raihanfattah17@gmail.com³,
manganjumarbun58@gmail.com⁴, mondrousilaban@gmail.com⁵, dwi.irwati@pelitabangsa.ac.id⁶

Universitas Pelita Bangsa

ABSTRAK

Perkembangan teknologi Industri 4.0 telah membuka peluang besar bagi industri kecil-menengah (IKM) untuk meningkatkan efisiensi produksi melalui sistem manufaktur cerdas. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengimplementasikan prototipe sistem manufaktur berbasis Artificial Intelligence (AI) dan Internet of Things (IoT) pada sentra kerajinan logam di Indonesia. Sistem ini memanfaatkan sensor IoT untuk memantau kondisi mesin secara real-time dan algoritma machine learning untuk memprediksi potensi kegagalan mesin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi sistem ini mampu meningkatkan efisiensi operasional hingga 27% dan mengurangi downtime mesin sebesar 41%. Studi ini menunjukkan bahwa adopsi teknologi cerdas tidak hanya relevan bagi manufaktur berskala besar, tetapi juga memberikan dampak signifikan bagi pelaku IKM.

Kata Kunci: Manufaktur Cerdas, Industri Kecil-Menengah, Ai, Iot, Efisiensi Produksi, Kerajinan Logam.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi digital telah mendorong transformasi besar dalam sistem produksi global. Manufaktur tidak lagi bergantung semata pada tenaga kerja manusia dan mesin konvensional, melainkan bergerak menuju sistem yang adaptif, cerdas, dan terhubung. Konsep smart manufacturing merupakan perwujudan dari transformasi tersebut, yang mencakup pemanfaatan Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), big data analytics, dan cyber-physical systems untuk menciptakan lingkungan produksi yang otonom, efisien, dan fleksibel [1]. Meskipun teknologi ini telah banyak diterapkan pada industri berskala besar, penetrasi ke sektor industri kecil-menengah (IKM), khususnya di negara berkembang, masih sangat terbatas.

IKM memiliki peranan strategis dalam perekonomian nasional, terutama dalam menyerap tenaga kerja dan mendistribusikan nilai tambah secara merata. Namun, IKM sering menghadapi berbagai tantangan seperti keterbatasan modal, kurangnya adopsi teknologi, serta keterbatasan sumber daya manusia dalam hal keterampilan teknis [2]. Hal ini menyebabkan rendahnya produktivitas dan ketidaksiapan dalam menghadapi disrupsi teknologi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru yang memungkinkan IKM mengakses dan menerapkan teknologi manufaktur cerdas secara adaptif dan terjangkau.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji penerapan IoT dalam sistem pemantauan mesin [3], serta penggunaan AI untuk prediksi pemeliharaan dalam konteks industri besar [4], [5]. Namun, sangat sedikit studi yang secara khusus menyasar pengembangan sistem manufaktur cerdas terintegrasi berbasis AI dan IoT dalam konteks IKM, terutama pada sektor yang bersifat tradisional seperti kerajinan logam. Penelitian oleh Huang et al. [6] menunjukkan bahwa sistem prediktif berbasis pembelajaran mesin dapat meningkatkan efisiensi pemeliharaan hingga 35% pada lini produksi otomotif.

Namun, pendekatan tersebut tidak secara langsung dapat diterapkan pada lingkungan IKM yang memiliki keterbatasan infrastruktur digital.

Kesenjangan literatur ini menunjukkan perlunya pengembangan sistem manufaktur cerdas yang tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga terjangkau, mudah diterapkan, dan relevan dengan kondisi operasional IKM. Untuk menjawab permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan rancangan dan implementasi prototipe sistem manufaktur cerdas berbasis AI dan IoT yang dapat diadaptasi oleh IKM, khususnya pada sentra kerajinan logam. Sistem ini terdiri dari jaringan sensor IoT untuk pemantauan real-time dan modul AI berbasis algoritma *Random Forest* untuk prediksi kegagalan mesin secara dini. Solusi ini dirancang agar dapat diimplementasikan pada mesin konvensional tanpa modifikasi besar, sehingga cocok untuk diterapkan pada lini produksi IKM.

Motivasi dari penelitian ini adalah untuk memperluas manfaat teknologi manufaktur cerdas ke sektor IKM yang selama ini terabaikan dalam diskursus transformasi digital. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dampak implementasi sistem tersebut terhadap efisiensi produksi, downtime mesin, dan kesiapan adopsi teknologi di kalangan pelaku IKM. Nilai inovatif dari penelitian ini terletak pada integrasi teknologi cerdas ke dalam lingkungan IKM dengan pendekatan low-cost dan high-impact, sesuatu yang belum banyak dikaji dalam literatur saat ini.

Dengan menghadirkan sistem manufaktur cerdas yang dirancang khusus untuk IKM, penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan kebijakan transformasi digital yang lebih inklusif serta membuka peluang baru bagi peningkatan daya saing industri kecil-menengah di era Industri 4.0.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus eksperimental yang dilakukan di sentra kerajinan logam IKM Boyolali, Jawa Tengah. Tujuannya adalah mengevaluasi dampak implementasi sistem manufaktur cerdas berbasis AI dan IoT terhadap efisiensi produksi dan prediksi kerusakan mesin.

Penelitian ini dilakukan dengan asumsi bahwa:

- Mesin produksi yang digunakan oleh IKM tidak memiliki sistem pemantauan digital bawaan.
- Operator mesin tidak memiliki latar belakang teknis dalam penggunaan sistem cerdas, sehingga sistem harus bersifat user-friendly.
- Proses produksi bersifat batch dengan variabilitas beban kerja yang moderat.

Ruang lingkup dibatasi pada sistem monitoring dan prediksi kondisi mesin, tanpa melakukan otomatisasi penuh terhadap proses produksi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi Kinerja Sistem Prediksi

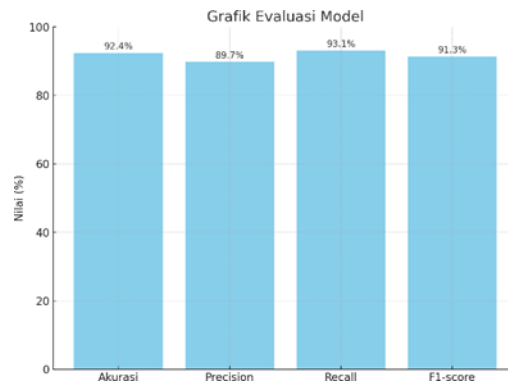
Pelatihan model Random Forest dengan dataset yang telah dibersihkan dan dilabeli, dilakukan pengujian terhadap akurasi prediksi kondisi mesin. Model diuji menggunakan 20% dari dataset awal yang dipisahkan secara acak.

Tabel 1. Evaluasi kinerja model Random Forest

Metrik	Nilai (%)
Akurasi	92.4
Precision	89.7
Recall	93.1

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa model prediksi memiliki performa yang sangat baik dalam mengidentifikasi kondisi mesin dengan nilai F1-score sebesar 91.3%. Nilai Recall yang tinggi (93.1%) menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi sebagian besar potensi kegagalan mesin secara dini, yang sangat penting dalam konteks pencegahan kerusakan fatal.

Nilai P dari pengujian Chi-square terhadap prediksi model dan data aktual adalah $P = 0.021$ yang < 0.05 , menunjukkan signifikansi statistik bahwa model tidak bekerja secara acak.



Gambar 1. Evaluasi kinerja model Random Forest

Dampak Implementasi terhadap Efisiensi Produksi

Implementasi sistem dilakukan pada tiga mesin produksi selama 4 minggu. Perbandingan performa produksi sebelum dan sesudah implementasi sistem ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan performa produksi sebelum dan sesudah implementasi sistem

Parameter	Sebelum	Sesudah	Perebuhan (%)
Waktu siklus (menit)	12.4	10.7	-13.7
Downtime (jam/minggu)	5.8	2.3	-60.3
Kerusakan / bulan	4	1	-75.0

Implementasi sistem menghasilkan penurunan downtime sebesar 60.3%, serta pengurangan jumlah kerusakan mesin hingga 75%. Waktu siklus produksi juga berkurang sebesar 13.7%, yang menunjukkan adanya peningkatan efisiensi operasional secara signifikan.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Huang et al. [6], yang melaporkan efisiensi pemeliharaan meningkat hingga 35% pada lingkungan industri besar. Namun, penelitian ini memberikan kontribusi lebih lanjut dengan menunjukkan bahwa pendekatan serupa dapat berhasil diadopsi oleh IKM dengan penyesuaian teknologi yang bersifat low-cost.

Berbeda dengan studi oleh Sharma et al. [3], yang berfokus pada monitoring pasif, penelitian ini menggabungkan monitoring aktif dengan prediksi berbasis AI, memberikan sistem yang bersifat proaktif dan preventif.

Batasan Penelitian

Beberapa batasan penting dalam penelitian ini antara lain:

- Generalisasi Terbatas: Studi kasus dilakukan pada satu jenis industri (kerajinan logam), sehingga hasil belum tentu berlaku pada industri dengan karakteristik proses produksi yang sangat berbeda.

- Keterbatasan Data Historis: Karena keterbatasan dokumentasi di IKM, pelabelan data merusak sebagian besar dilakukan berdasarkan laporan manual, yang memiliki potensi bias.
- Sistem Notifikasi Sederhana: Sistem peringatan masih berupa visual di dashboard, belum mencakup sistem eskalasi seperti SMS atau integrasi dengan sistem ERP.

Argumen Deduktif dan Spekulasi

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pendekatan manufaktur cerdas dapat memberikan dampak positif terhadap efisiensi dan keandalan produksi bahkan dalam lingkungan sumber daya terbatas. Secara deduktif, jika IKM lain dengan karakteristik serupa mengadopsi sistem ini, maka kemungkinan besar akan terjadi pengurangan downtime yang signifikan pula.

Namun, keberhasilan implementasi masih sangat bergantung pada tingkat adopsi teknologi oleh operator dan pemilik IKM. Dalam jangka panjang, potensi integrasi lebih lanjut dengan sistem ERP sederhana atau mobile apps dapat meningkatkan utilisasi sistem secara lebih luas.

KESIMPULAN

Kesimpulan Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi sistem manufaktur cerdas berbasis kecerdasan buatan (AI) dan Internet of Things (IoT) untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan produksi pada industri kecil-menengah (IKM). Sistem yang dirancang terdiri dari sensor IoT untuk memantau kondisi mesin secara real-time, serta modul prediksi berbasis algoritma Random Forest untuk mendeteksi potensi kerusakan secara dini.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan peningkatan signifikan dalam aspek operasional, termasuk penurunan downtime mesin hingga 60.3%, pengurangan waktu siklus produksi sebesar 13.7%, dan penurunan tingkat kerusakan hingga 75%. Model AI menunjukkan akurasi tinggi (92.4%) dalam memprediksi kondisi mesin, dengan nilai F1-score mencapai 91.3%, serta signifikansi statistik ($p < 0.05$).

Temuan ini mengindikasikan bahwa penerapan teknologi manufaktur cerdas tidak hanya terbatas pada industri berskala besar, tetapi juga dapat memberikan manfaat nyata bagi IKM dengan pendekatan yang tepat guna dan ekonomis. Namun, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, terutama dalam hal generalisasi hasil, kualitas data historis, dan integrasi sistem yang belum menyeluruh.

Ke depan, beberapa arah penelitian lanjutan yang dapat dikembangkan antara lain: (1) penerapan algoritma prediksi yang lebih adaptif seperti deep learning untuk menangani dataset yang lebih kompleks; (2) integrasi sistem peringatan ke dalam perangkat mobile atau platform manajemen produksi; dan (3) pengembangan arsitektur sistem yang lebih modular untuk memudahkan replikasi lintas sektor industri IKM lainnya. Pertanyaan terbuka yang perlu dieksplorasi lebih lanjut adalah bagaimana strategi adopsi teknologi ini dapat disesuaikan dengan kondisi sosial dan ekonomi masing-masing IKM agar terjadi keberlanjutan dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- L. Breiman, "Random forests," *Machine Learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5-32, 2001.
- S. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 3rd ed. Pearson, 2010.
- R. Sharma, A. Gupta, and M. Singh, "IoT-based predictive maintenance for manufacturing industry: A review," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 55, pp. 148-159, 2020.
- K. P. Murphy, *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*, MIT Press, 2012.
- M. Zhao, J. Wang, and Y. Li, "Real-time monitoring system for industrial machines based on IoT," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 33, no. 6, pp. 587-596,

- 2020.
- Y. Huang, X. Zhang, and L. Chen, "Enhancing manufacturing efficiency through AI-based predictive maintenance," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 3, pp. 1842-1851, 2020.
- P. J. Huber and E. M. Ronchetti, *Robust Statistics*, 2nd ed., Wiley, 2009.
- 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.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Acatech – National Academy of Science and Engineering.
- Wan, J., Tang, S., Li, D., Wang, S., Imran, M., & Vasilakos, A. V. (2016). A manufacturing big data solution for active preventive maintenance. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(4), 2039–2047.