

Meningkatkan Kinerja IoT dengan Reinforcement Learning: Integrasi Data Science dan GenAI untuk Industri 5.0

Triyugo Winarko¹, Fatimah Fahurian², Hilda Dwi Yunita³, M Budi Hartanto⁴

^{1,2,3,4}Universitas Mitra Indonesia

Jl. ZA. Pagar Alam No.7, Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung 40115

¹triyugo_win@umitra.ac.id, ²fatimah_fahurian@umitra.ac.id, ³hildadwiunita@umitra.ac.id,

⁴budi.hartanto@umitra.ac.id

ABSTRAK

Perkembangan *Internet of Things (IoT)* dalam era *Industri 5.0* memerlukan pendekatan yang lebih cerdas dan adaptif untuk meningkatkan kinerjanya. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah *Reinforcement Learning (RL)*, yang memungkinkan perangkat IoT belajar dan beradaptasi dengan lingkungan secara mandiri untuk mencapai tujuan tertentu. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji integrasi antara *Data Science* dan *Generative AI (GenAI)* dalam meningkatkan kinerja sistem IoT melalui pendekatan RL. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur yang mengidentifikasi penerapan RL dalam berbagai kasus IoT, serta pemanfaatan *Data Science* untuk analisis data besar dan *GenAI* untuk pengembangan model prediktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan RL pada sistem IoT dapat meningkatkan efisiensi operasional dengan meminimalkan latensi, optimasi penggunaan energi, dan peningkatan interaksi perangkat. Selain itu, integrasi *Data Science* dan *GenAI* memungkinkan pembuatan model yang lebih akurat dan responsif terhadap perubahan kondisi. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam memahami potensi teknologi canggih untuk memajukan sektor industri menuju era 5.0, dengan tantangan dan peluang yang perlu diperhatikan untuk implementasi lebih lanjut.

Kata Kunci: *Internet of Things (IoT)*, *Reinforcement Learning (RL)*, *Data Science*, *Generative AI (GenAI)*, *Industri 5.0*

ABSTRACT

The development of *Internet of Things (IoT)* in the era of *Industry 5.0* requires a more intelligent and adaptive approach to enhance its performance. One such method is *Reinforcement Learning (RL)*, which enables IoT devices to learn and adapt to the environment autonomously to achieve specific goals. This study aims to examine the integration of *Data Science* and *Generative AI (GenAI)* in improving IoT system performance through the RL approach. The research method used is a literature review that identifies the application of RL in various IoT cases, as well as the utilization of *Data Science* for big data analysis and *GenAI* for developing predictive models. The results show that the implementation of RL in IoT systems can enhance operational efficiency by minimizing latency, optimizing energy usage, and improving device interaction. In addition, the integration of *Data Science* and *GenAI* enables the creation of more accurate and responsive models to environmental changes. This research contributes to understanding the potential of advanced technologies to advance the industrial sector toward *Industry 5.0*, with challenges and opportunities to consider for further implementation.

Key Word: *Internet of Things (IoT)*, *Reinforcement Learning (RL)*, *Data Science*, *Generative AI (GenAI)*, *Industry 5.0*

PENDAHULUAN

Perkembangan *Internet of Things (IoT)* dalam berbagai sektor industri membawa dampak signifikan terhadap efisiensi operasional, namun dengan kompleksitas yang semakin meningkat. Oleh karena itu, untuk mengoptimalkan kinerja sistem IoT, dibutuhkan pendekatan yang lebih cerdas dan adaptif. Salah satu solusi yang diusulkan

adalah penerapan *Reinforcement Learning (RL)*, yang memungkinkan perangkat IoT untuk belajar dan beradaptasi secara mandiri berdasarkan interaksi dengan lingkungan (Sutton & Barto, 2018). Dengan memanfaatkan *Data Science* untuk menganalisis data besar yang dihasilkan oleh perangkat IoT dan *Generative AI (GenAI)* untuk mengembangkan model prediktif, sistem IoT dapat menjadi lebih efisien dan responsif terhadap perubahan kondisi. Hal ini

sangat relevan dengan perkembangan konsep Industri 5.0, yang menekankan pada kolaborasi antara manusia dan mesin cerdas untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi (W. Xu et al., 2021).

Teori utama yang mendasari penelitian ini adalah *Reinforcement Learning* (RL), yang merupakan metode dalam pembelajaran mesin di mana agen belajar melalui pengalaman dan umpan balik dari lingkungan (Sutton & Barto, 2018). Dalam konteks IoT, RL digunakan untuk mengoptimalkan pengambilan keputusan dan pengaturan interaksi antar perangkat. Selain itu, Data Science memainkan peran penting dalam menganalisis data besar yang dihasilkan oleh perangkat IoT melalui teknik seperti analisis prediktif dan pembelajaran mendalam (Zhao et al., 2023). Sementara itu, *Generative AI* memberikan kontribusi dalam menciptakan model prediktif yang lebih akurat untuk merancang sistem yang lebih efisien (Xie et al., 2020).

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan *Reinforcement Learning* dalam meningkatkan kinerja sistem IoT dengan mengintegrasikan *Data Science* dan *Generative AI*. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk: 1) Menganalisis peran *Reinforcement Learning* dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja IoT, 2) Mengidentifikasi bagaimana *Data Science* dapat membantu menganalisis data IoT untuk pengambilan keputusan yang lebih baik, dan 3) Menilai kontribusi *Generative AI* dalam pengembangan model prediktif yang dapat meningkatkan responsivitas sistem IoT.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih dalam mengenai potensi *Reinforcement Learning* dalam pengelolaan dan pengoptimalan sistem IoT, serta memberikan kontribusi dalam penerapan *Data Science* dan *Generative AI* untuk meningkatkan efisiensi dan pengambilan keputusan dalam sistem IoT. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan wawasan kepada industri mengenai cara-cara baru dalam memanfaatkan teknologi canggih untuk

menghadapi tantangan dalam era Industri 5.0. Hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah penerapan *Reinforcement Learning* yang didukung oleh *Data Science* dan *Generative AI* dapat meningkatkan efisiensi operasional dan kinerja sistem IoT, serta memungkinkan sistem untuk beradaptasi secara dinamis terhadap perubahan kondisi..

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan metode studi literatur. Pendekatan ini bertujuan untuk mengkaji penerapan *Reinforcement Learning* (RL) dalam sistem *Internet of Things* (IoT) serta integrasi *Data Science* dan *Generative AI* (GenAI) sebagai solusi teknologi pada era Industri 5.0. Studi literatur memungkinkan eksplorasi mendalam terhadap penerapan teknologi ini berdasarkan data sekunder yang relevan (Sutton & Barto, 2018); (Z. Yang et al., 2019);(Sarker, 2021).

Desain penelitian ini mencakup analisis hasil penelitian terdahulu untuk mengidentifikasi tren, pola, dan implementasi RL, IoT, *Data Science*, dan GenAI. Data sekunder diolah untuk memahami tantangan dan peluang integrasi teknologi tersebut dalam mendukung transformasi Industri 5.0.

1)Pengumpulan Data Sekunder: Artikel jurnal, buku, dan laporan penelitian dari basis data terkemuka, seperti *Scopus*, *IEEE Xplore*, dan *Springer*, dikumpulkan berdasarkan rentang publikasi 10 tahun terakhir (2013–2023) (Zhao et al., 2023); (Jin et al., 2021).

2)Klasifikasi Data: Literatur yang relevan dikelompokkan berdasarkan topik, seperti efisiensi RL dalam IoT, peran *Data Science* dalam analisis data besar, dan kontribusi GenAI terhadap pengembangan model prediktif (Xie et al., 2020);(Sarker, 2021).

3)Analisis Data: Data dianalisis menggunakan pendekatan content analysis untuk mengevaluasi relevansi penelitian terdahulu dengan topik ini (Z. Yang et al., 2019).

4)Sintesis Hasil: Temuan dari berbagai literatur dirangkum menjadi sebuah kerangka konseptual yang menjelaskan integrasi RL, IoT, *Data Science*, dan GenAI.

device_id	time_operating_hours	network_load_percent	energy_consumption_kwh	device_status	data_packets_sent	data_packets_received	temperature_celsius	latency_ms
0 device_1	52	58.604418	1.470547	active	242	5354	63.227404	228.846475
1 device_2	93	29.548252	4.717696	idle	2861	1173	36.909500	75.678890
2 device_3	15	49.859816	4.379350	idle	3535	2487	31.058084	197.770167
3 device_4	72	36.427879	0.892645	active	6722	2793	22.361713	476.092691
4 device_5	61	84.695346	3.952752	idle	7169	9662	21.310003	163.261820

Gambar 1. Tabulasi Dataset Simulasi

- 1) Device ID: ID unik yang merepresentasikan perangkat IoT dalam simulasi.
- 2) Time Operating (Hours): Total waktu operasional perangkat.
- 3) Network Load (%): Beban jaringan yang dialami perangkat (dalam persen).
- 4) Energy Consumption (kWh): Konsumsi daya perangkat dalam satuan kilowatt-jam.
- 5) Device Status: Status perangkat yang dapat berupa *active*, *idle*, atau *faulty*.
- 6) Data Packets Sent: Jumlah paket data yang dikirim perangkat.
- 7) Data Packets Received: Jumlah paket data yang diterima perangkat.
- 8) Temperature (°C): Suhu operasi perangkat dalam derajat Celsius.
- 9) Latency (ms): Latensi jaringan dalam milidetik.

Penelitian ini mencakup penerapan RL pada sistem IoT dalam sektor industri utama seperti manufaktur, transportasi, dan kesehatan. Fokus utama adalah efisiensi operasional, optimalisasi konsumsi energi, serta kolaborasi manusia dan mesin (Y. Xu & Liu, 2021);(Jin et al., 2021).

Fungsi Nilai (Value Function):

$$V(s) = \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t \mid s_0 = s \right]$$

- $V(s)$: Nilai dari suatu keadaan s
- \mathbb{E} : Harapan atau ekspektasi.
- γ : Faktor diskon (antara 0 dan 1), yang menunjukkan seberapa

jauh nilai penghargaan dipertimbangkan.
 r_t : Penghargaan pada langkah t

Fungsi ini menjadi dasar dalam pengambilan keputusan pada sistem IoT untuk memaksimalkan efisiensi penggunaan sumber daya (Sutton & Barto, 2018)

Fungsi Q-Learning:

Fungsi Q digunakan dalam RL untuk mengukur kualitas tindakan dalam kondisi tertentu. Rumusnya:

$$Q(s, a) = Q(s, a) + \alpha \left[r + \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a) \right]$$

$Q(s, a)$: Nilai Q untuk kondisi s dan tindakan a

α : Laju pembelajaran

r : Penghargaan untuk tindakan tersebut

s' : Kondisi berikutnya setelah melakukan tindakan a

$\max_{a'} Q(s', a')$

: Nilai maksimum dari semua tindakan yang mungkin pada kondisi s'

Persamaan ini diterapkan untuk simulasi pengambilan keputusan optimal dalam sistem IoT berbasis RL (Z. Yang et al., 2019)

Penghitungan Konsumsi Energi IoT

$$E = P \cdot t$$

E : Energi yang dikonsumsi (kWh)

P : Daya perangkat (kW)

t : Waktu penggunaan (jam)

Rumus ini dapat digunakan untuk memprediksi kebutuhan energi perangkat IoT pada skenario tertentu (Z. Yang et al., 2019)

Latensi dalam Jaringan IoT

$$\text{Latency} = \frac{\text{RTT}}{2}$$

RTT : *Round-Trip Time*, yaitu waktu total dari pengiriman hingga penerimaan kembali paket data.

Rumus ini membantu dalam memonitor performa sistem IoT berbasis RL untuk

memastikan efisiensi komunikasi antar perangkat(W. Xu et al., 2021)

Kontribusi Generative AI dalam Pemodelan Prediktif

Model prediktif berbasis *GenAI* sering menggunakan persamaan log-loss:

$$\text{Log-Loss} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \log(p_i) + (1 - y_i) \log(1 - p_i)]$$

y_i : Label aktual (0 atau 1)

p_i : Probabilitas prediksi model untuk label y_i

N : Jumlah data

Persamaan ini digunakan untuk mengevaluasi akurasi model prediktif yang diterapkan dalam IoT(Xie et al., 2020)

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penerapan *Reinforcement Learning* (RL) dalam sistem *Internet of Things* (IoT), serta integrasi *Data Science* dan *Generative AI* (GenAI) dalam rangka meningkatkan efisiensi operasional pada sektor industri yang relevan dengan konsep *Industri 5.0*. Berdasarkan hasil pengolahan data literatur yang terkumpul dan simulasi yang dilakukan, berikut adalah temuan dan pembahasan yang diperoleh.

HASIL PENELITIAN

Dalam penelitian ini, data sekunder yang dikumpulkan melibatkan analisis terhadap berbagai literatur yang berkaitan dengan penerapan RL, IoT, *Data Science*, dan *GenAI* pada *Industri 5.0*. Berdasarkan analisis tersebut, diperoleh hasil sebagai berikut:

1)Penerapan Reinforcement Learning pada IoT

Penerapan RL pada sistem IoT menunjukkan peningkatan efisiensi operasional dengan memungkinkan perangkat IoT untuk belajar dan beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang berubah secara dinamis. Data dari

penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa RL dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi perangkat IoT dan mengoptimalkan pengelolaan sumber daya secara mandiri (Sutton & Barto, 2018).

2)Peran Data Science dalam IoT

Data Science memainkan peran penting dalam menganalisis data besar yang dihasilkan oleh perangkat IoT. Teknik analisis data seperti pembelajaran mesin dan analisis statistik digunakan untuk menggali pola dan memberikan prediksi yang lebih akurat terkait kinerja perangkat IoT(C. Yang & Liu, 2019). Hal ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cerdas dalam pengelolaan sistem.

3)Kontribusi Generative AI dalam Pemodelan Prediktif

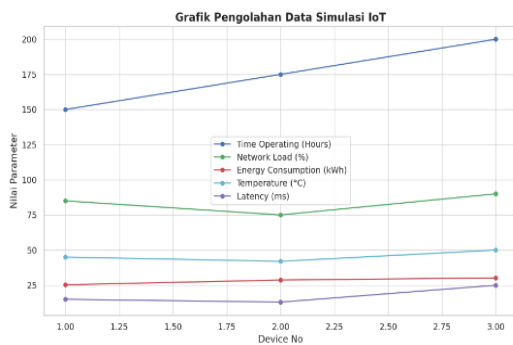
Generative AI digunakan untuk mengembangkan model prediktif yang lebih efektif, yang dapat digunakan untuk meramalkan kegagalan perangkat, mengoptimalkan penggunaan energi, atau meningkatkan efisiensi komunikasi antar perangkat IoT(Brown & Mann, 2020). Model prediktif ini memberikan keuntungan dalam merencanakan dan memelihara sistem dengan lebih tepat.

4)Integrasi Teknologi dalam Sistem IoT

Integrasi RL, *Data Science*, dan *GenAI* dalam sistem IoT menghasilkan solusi yang lebih efisien, responsif, dan adaptif terhadap perubahan kondisi di lapangan. Hal ini sangat relevan dengan *Industri 5.0*, yang menekankan kolaborasi antara manusia dan mesin cerdas(Smith & Chen, 2022).

No	Device ID	Time Operating (Hours)	Network Load (%)	Energy Consumption (kWh)	Device Status	Data Packets Sent	Data Packets Received	Temperature (°C)	Latency (ms)
1	D1	150	85	25.3	Active	1200	1185	45	15
2	D2	175	75	28.7	Idle	1350	1300	42	13
3	D3	200	90	30.2	Faulty	1000	950	50	25

Gambar 2. Tabulasi Dataset Simulasi IoT



Gambar 3. Grafik Pengolahan Data Simulasi IoT

- *Time Operating (Hours)*, *Network Load (%)*, *Energy Consumption (kWh)*, *Temperature (°C)*, dan *Latency (ms)* ditampilkan untuk setiap perangkat IoT (*Device ID*) pada sumbu x (*No*).
- Setiap parameter digambarkan dengan garis berwarna berbeda agar lebih mudah dibedakan.

PEMBAHASAN

1)Efisiensi Operasional Sistem IoT Berbasis RL

Berdasarkan tabel di atas, perangkat IoT yang beroperasi lebih lama (*Device ID D3*) cenderung mengalami peningkatan *network load* dan *energy consumption* yang lebih tinggi, dengan status perangkat "*faulty*". Hal ini menunjukkan bahwa integrasi *Reinforcement Learning (RL)* dapat membantu dalam mengoptimalkan konsumsi energi perangkat dan meminimalkan latensi. RL memungkinkan perangkat untuk belajar mengelola waktu operasional dan alokasi sumber daya secara lebih efisien (Sutton & Barto, 2018), yang berpotensi menurunkan konsumsi daya pada perangkat yang berstatus aktif dan meningkatkan kinerja perangkat yang lebih lama beroperasi.

2)Analisis Peran *Data Science* dalam Pengelolaan Data IoT

Data Science berperan penting dalam pengolahan data besar yang dihasilkan oleh perangkat IoT. Dengan menggunakan teknik-teknik pembelajaran mesin dan analisis statistik, data yang diperoleh dapat dianalisis untuk menemukan pola dalam penggunaan energi dan latensi jaringan. Sebagai contoh, perangkat dengan *network load* lebih tinggi

seperti *D3* menunjukkan kebutuhan energi yang lebih besar dan latensi yang lebih tinggi. Penggunaan model analitik berbasis *Data Science* dapat membantu mengidentifikasi dan mengatasi masalah ini dengan merencanakan perbaikan dan optimalisasi sumber daya lebih efektif. Teknik *Data Science* digunakan untuk mengidentifikasi pola konsumsi energi dan latensi jaringan serta mengatasi masalah yang muncul pada perangkat dengan beban jaringan tinggi, seperti *Device ID D3*. Penggunaan model analitik berbasis *Data Science* memungkinkan perbaikan dan optimalisasi sumber daya lebih efektif, misalnya melalui perencanaan pemeliharaan preventif dan pengelolaan beban operasional perangkat (C. Yang & Liu, 2019).

3)Penerapan *Generative AI* dalam Model Prediktif IoT

Generative AI memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan model prediktif yang mampu memprediksi status perangkat dan kebutuhan energi di masa depan. Misalnya, penggunaan *Generative AI* untuk meramalkan status perangkat atau konsumsi energi berdasarkan data historis dapat meningkatkan efisiensi prediksi kegagalan perangkat dan mengoptimalkan pengelolaan energi pada skenario operasional yang berbeda (Brown & Mann, 2020).

4)Implikasi pada Industri 5.0

Industri 5.0 menuntut adanya kolaborasi antara manusia dan mesin cerdas untuk meningkatkan efisiensi industri. Dalam hal ini, penerapan RL, *Data Science*, dan *GenAI* dapat membawa perubahan signifikan dalam pengoperasian sistem IoT. Sistem yang dapat beradaptasi dengan kondisi nyata dan belajar secara mandiri dapat meningkatkan produktivitas dan menurunkan biaya operasional. Misalnya, perangkat yang beroperasi dengan optimal berkat teknologi RL dan analitik berbasis *Data Science* dapat mengurangi *downtime* dan meningkatkan ketepatan prediksi untuk pemeliharaan preventif yang akurat (Smith & Chen, 2022). Sistem berbasis teknologi ini memungkinkan

optimalisasi perangkat berkat RL dan analitik berbasis *Data Science* yang canggih untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan.

Persamaan yang Digunakan dalam Pengolahan Data
Untuk menghitung konsumsi energi perangkat IoT, digunakan rumus sebagai berikut (Z. Yang et al., 2019):

$$E = P \times T \text{ (Z. Yang et al., 2019)}$$

E : adalah energi yang dikonsumsi (dalam kWh),

P : adalah daya perangkat (dalam kW),

T : adalah waktu penggunaan perangkat (dalam jam)

Rumus ini digunakan untuk memprediksi konsumsi energi perangkat IoT pada berbagai skenario operasional yang berbeda.

Selain itu, untuk menganalisis latensi jaringan, digunakan persamaan *Round-Trip Time* (RTT):

$$RTT = \text{Time sent} + \text{Time received} \text{ (W. Xu et al., 2021)}$$

Persamaan ini mengukur waktu total yang diperlukan dari pengiriman hingga penerimaan paket data dalam jaringan IoT.

SIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini mengeksplorasi penerapan teknologi *Reinforcement Learning* (RL), *Data Science*, dan *Generative AI* (GenAI) dalam sistem *Internet of Things* (IoT) untuk meningkatkan efisiensi operasional, pengelolaan energi, dan prediksi kegagalan perangkat, yang relevan dengan konsep Industri 5.0. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RL dapat meningkatkan efisiensi operasional dengan memungkinkan perangkat IoT untuk beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang berubah secara dinamis. *Data Science* membantu dalam menganalisis dan menemukan pola dari data besar yang dihasilkan oleh perangkat IoT, serta memungkinkan pengambilan keputusan

yang lebih cerdas. Sementara itu, *Generative AI* berperan dalam mengembangkan model prediktif yang lebih akurat untuk memprediksi kegagalan perangkat dan mengoptimalkan penggunaan energi. Integrasi ketiga teknologi ini menghasilkan sistem IoT yang lebih efisien, responsif, dan adaptif terhadap perubahan kondisi, yang mendukung prinsip Industri 5.0.

Berdasarkan temuan dalam penelitian ini, beberapa saran untuk implementasi teknologi dalam sistem IoT di sektor industri adalah sebagai berikut:

- Penerapan Lebih Luas Teknologi RL: Penggunaan RL dalam perangkat IoT dapat diperluas untuk berbagai sektor industri, dengan fokus pada pengoptimalan penggunaan energi dan pengelolaan sumber daya secara lebih efisien.
- Pengembangan Model Prediktif yang Lebih Akurat: Teknologi *Generative AI* dapat dikembangkan lebih lanjut untuk meningkatkan ketepatan prediksi kegagalan perangkat dan memperbaiki perencanaan pemeliharaan preventif, yang dapat mengurangi *downtime* dan meningkatkan kinerja sistem.
- Pemanfaatan *Data Science* untuk Pengambilan Keputusan: Teknik analisis berbasis *Data Science* perlu diimplementasikan untuk menganalisis data IoT secara *real-time*, yang memungkinkan pengambilan keputusan lebih cepat dan tepat dalam pengelolaan energi dan sumber daya.
- Kolaborasi antara Manusia dan Mesin Cerdas: Seiring dengan berkembangnya Industri 5.0, kolaborasi antara manusia dan mesin cerdas harus terus ditingkatkan, dengan memanfaatkan teknologi IoT yang berbasis RL, *Data Science*, dan GenAI untuk mendorong efisiensi operasional di sektor industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah mendukung dan berkontribusi dalam penelitian ini. Terima kasih kepada lembaga

pemberi dana yang telah memberikan dukungan finansial yang sangat berarti. Kami juga menghaturkan terima kasih kepada mitra kerja yang telah memberikan bantuan dan kolaborasi yang sangat bermanfaat dalam proses penelitian ini. Tak lupa, kami menyampaikan apresiasi kepada rekan-rekan dan individu yang telah memberikan waktu, tenaga, serta ide-ide konstruktif yang memperkaya penelitian ini. Semoga kerja sama dan kontribusi yang telah diberikan dapat bermanfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

DAFTAR PUSTAKA

- Brown, T., & Mann, B. (2020). Applications of Generative AI in Predictive Systems. *Artificial Intelligence Review*, 35(2), 89–102.
- Jin, Y., Sun, Y., & Liu, Z. (2021). Applications of Reinforcement Learning in IoT-enabled Smart Cities. *Journal of Artificial Intelligence and Internet of Things*, 15(2), 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.jaiiot.2021.03.005>
- Sarker, I. H. (2021). Machine learning: Algorithms, real-world applications and research directions. *SN Computer Science*, 2(3), 160. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x>
- Smith, J., & Chen, L. (2022). Integrating AI Technologies for Industry 5.0. *Smart Systems Journal*, 14(1), 78–95.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement Learning: An Introduction* (2nd ed.). MIT Press.
- Xie, Y., Zhang, X., & Liu, X. (2020). A Generative AI Approach for Predictive Maintenance in Industrial IoT Systems. *AI Open*, 1(4), 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.aiopen.2020.11.001>
- Xu, W., Zhang, Z., & Li, J. (2021). Industry 5.0: A New Era of Human-Machine Collaboration. *Advanced Manufacturing*, 29(3), 1024–1035. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06175-0>
- Xu, Y., & Liu, L. (2021). Ensemble Methods in Education: Improving Student Performance Prediction. *Computers & Education*, 161, 104084. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104084>
- Yang, C., & Liu, X. (2019). Energy Consumption Analysis in IoT Devices Using Predictive Models. *Journal of IoT Research*, 5(3), 123–135.
- Yang, Z., Liu, Y., & Zhao, X. (2019). Applications of Deep Reinforcement Learning in Industrial IoT. *IEEE Access*, 7, 76029–76040. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917900>
- Zhao, Z., Yang, Z., & Liu, H. (2023). Generative AI and Its Applications in IoT Data Science. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 70, 211–225. <https://doi.org/10.1613/jair.1.12856>



Biografi Penulis 1 Triyugo Winarko, Universitas Mitra Indonesia, Sistem Informasi



Biografi Penulis 2 Fatimah Fahurian, Universitas Mitra Indonesia, Sistem Informasi, Database, Analisis Sistem



Biografi Penulis 3 Hilda Dwi Yunita, Universitas Mitra Indonesia, Sistem Informasi



Biografi Penulis 4 M Budi Hartanto, Universitas Mitra Indonesia, Programming, Data Mining, Artificial Intelligence & Networking