Peran Artificial Intelligence (AI) dalam Pengembangan Circular Bioekonomi Berbasis Bioproses.

Sautan Sihite
- Magister Teknik Kimia, Universitas Riau
Email : sautansihite@gmail.com

ABSTRAK

Perkembangan *circular bioekonomi* adalah salah satu strategi penting dalam mendukung pembangunan industri berkelanjutan melalui pemanfaatan biomassa dan limbah organik secara efisien, sekaligus menjawab tantangan pengelolaan limbah, kebutuhan energi terbarukan, dan pengurangan emisi karbon. Teknologi *Artificial Intelegence* (AI) di terapkan untuk meningkatkan efisiensi konversi biologis pada proses fermentasi *anaerobic digestion* (AD), dan pengelolaan biomassa. Artikel review ini bertujuan mengkaji peran AI dalam pengembangan *circular bioekonomi* berbasis bioproses. Metode yang digunakan berupa studi literatur terhadap artikel ilmiah yang membahas penerapan AI pada sistem bioproses, bioenergi, dan pengelolaan limbah biologis. Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi AI khususnya melalui *machine learning, artificial neural network,* dan sistem monitoring cerdas, mampu meningkatkan optimasi parameter proses, stabilitas reaktor, akurasi prediksi kinerja, serta efisiensi pemanfaatan sumber daya biologis. AI juga berkontribusi dalam mendukung *waste valorization,* pengurangan konsumsi energi, dan peningkatan produksi bioenergi. Kendala yang dihadapi adalah keterbatasan dan kualitas, biaya integrasi teknologi, dan kompleksitas sistem biologis. AI berpotensi menjadi teknologi kunci dalam mempercepat transformasi bioindustri menuju *circular bioekonomi* yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

Kata Kunci : Bioekonomy Circular, Artificial Intelligence, Rekayasa Bioproses, Anaerobic Digestion, Industry Berkelanjutan.

ABSTRACT

The development of the circular bioeconomy is a crucial strategy for supporting sustainable industrial growth through the efficient utilization of biomass and organic waste, while simultaneously addressing challenges related to waste management, renewable energy needs, and carbon emission reduction. Artificial Intelligence (AI) technology is being applied to enhance the efficiency of biological conversion—specifically in anaerobic digestion (AD) fermentation processes—and biomass management. This review article examines the role of AI in the development of a bioprocess-based circular bioeconomy. The methodology involved a literature review of scientific articles discussing AI applications in bioprocess systems, bioenergy, and biological waste management. The findings indicate that AI integration—particularly through machine learning, artificial neural networks, and intelligent monitoring systems—can improve process parameter optimization, reactor stability, performance prediction accuracy, and the efficiency of biological resource utilization. AI also contributes to waste valorization, reduced energy consumption, and increased bioenergy production. Challenges include data limitations and quality issues, technology integration costs, and the inherent complexity of biological systems. AI holds the potential to serve as a key technology in accelerating the bio-industry's transformation toward a more efficient, adaptive, and sustainable circular bioeconomy.

Keywords: Circular Bioeconomy, Artificial Intelligence, Bioprocess Engineering, Anaerobic Digestion, Sustainable Industry.

PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas industri, pertanian, dan pertumbuhan populasi global menjadi faktor pemicu akumulasi limbah organik dalam jumlah besar serta meningkatkan kebutuhan energi secara signifikan.

Pengolahan limbah yang kurang optimal tentunya akan menimbulkan pencemaran lingkungan serta turut berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca yang menjadi penyebab perubahan iklim. Ketergantungan kita terhadap sumber energi fosil juga merupakan tantangan utama dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan. Kondisi ini mendorong perlu adanya pendekatan yang mampu mengintegrasikan pengolahan limbah, pemulihan sumber daya, dan produksi energi terbarukan dalam satu sistem yang berkelanjutan.

Konsep *circular bioekonomi* berkembang sebagai pendekatan yang mengintegrasikan prinsip ekonomi sirkular dengan pemanfaatan sumber daya biologis secara berkelanjutan. Dalam konsep ini, limbah organik tidak lagi di pandang sebagai residu yang harus dibuang, melainkan sebagai sumber daya yang bisa di konversi menjadi energi, bahan baku untuk produk lainnya, ataupun produk yang memiliki nilai tambah dengan memanfaatkan berbagai teknologi biokonversi [1].

Salah satu teknologi yang mendukung implementasi *circular bioekonomi* adalah bioproses. Proses biologis seperti fermentasi dan *anaerobic digestion* dapat mengubah biomassa dan limbah organik menjadi bioenergy, pupuk organik dan berbagai produk lainnya. Sehingga bioproses memiliki peran strategis dalam mendukung pemanfaatan sumber daya secara efisien dan tentunya akan mengurangi dampak lingkungan [2].

Meskipun sistem bioproses memiliki berbagai keunggulan akan tetapi juga banyak tantangan diantaranya berupa kompleksitas dinamika biologis yang di pengaruhi oleh berbagai parameter operational seperti pH, suhu, komposisi substrat dan *organik loading rate.* Hubungan antar parameter yang bersifat non linier menyebabkan proses optimasi dan pengendalian sistem sering kali memerlukan waktu, biaya dan sumber daya yang besar.

Perkembangan teknologi AI membuka peluang baru dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem bioproses. Melalui pendekatan *machine learning, artificial neural network,* dan analisis data cerdas. AI mampu melakukan prediksi, optimasi serta memantau proses secara real-time sehingga bisa mendukung pengambilan Keputusan yang lebih akurat dan cepat dalam sistem bioindustri. Meskipun penerapan AI dalam sektor industri dan energi berkembang pesat, informasi mengenai kontribusi AI dalam mendukung *circular bioekonomi* berbasis bioproses masih tersebar pada berbagai bidang kajian yang berbeda-beda. Selain itu juga diperlukan pemahaman yang komprehensif mengenai bagaimana AI berkontribusi terhadap optimasi bioproses, peningkatan efisiensi pemanfaatan biomassa, pengurangan limbah dan pengembangan sistem bioindustri yang berkelanjutan [3].

Artikel review ini bertujuan untuk mengkaji peran AI dalam pengembangan *circular bioekonomi* berbasis bioproses, mengidentifikasi berbagai teknologi AI yang diterapkan, mengevaluasi kontribusinya terhadap peningkatan efisiensi dan keberlanjutan sistem bioindustry serta menganalisis tantangan dan peluang implementasinya di masa depan.

TINJAUAN PUSTAKA

Perkembangan industri berkelanjutan saat ini tidak lagi bergantung pada satu teknologi tunggal, melainkan pada integrasi dari berbagai sistem yang mampu menghubungkan pengelolaan sumber daya, konversi biomassa, pengelolaan data, dan pengambilan keputusan yang cepat dan terencana dengan baik. Dalam konteks ini antara *Artificial Intelegence (AI), Machine Leartning (ML),* bioproses, biorefinery, dan *circular bioekonomi* membentuk suatu rantai sistem yang saling terhubung dan juga saling mendukung antar

satu dengan yang lainnya dalam mewujudkan serta memanfaatkan sumber daya biologis secara berkelanjutan [4].

Artuficial Intelligence (AI) merupakan cabang dari ilmu computer yang dirancang untuk meniru kemampuan kognitif manusia dalam menganalisis informasi, mengenali pola,membuat prediksi, dan mendukung pengambilan keputusan. Dalam penerapannya pada sektor bioindustry, AI berfungsi sebagai sistem cerdas yang mampu untuk mengolah data dalam jumlah besar yang di hasilkan dari berbagai proses biologis dan industri. Namun kemampuan AI dalam pengambilan Keputusan yang akurat sangat tergantung pada metode pembelajaran yang digunakan sehingga Machine Learning menjadi salah satu komponen utama dalam implementasi AI [5].

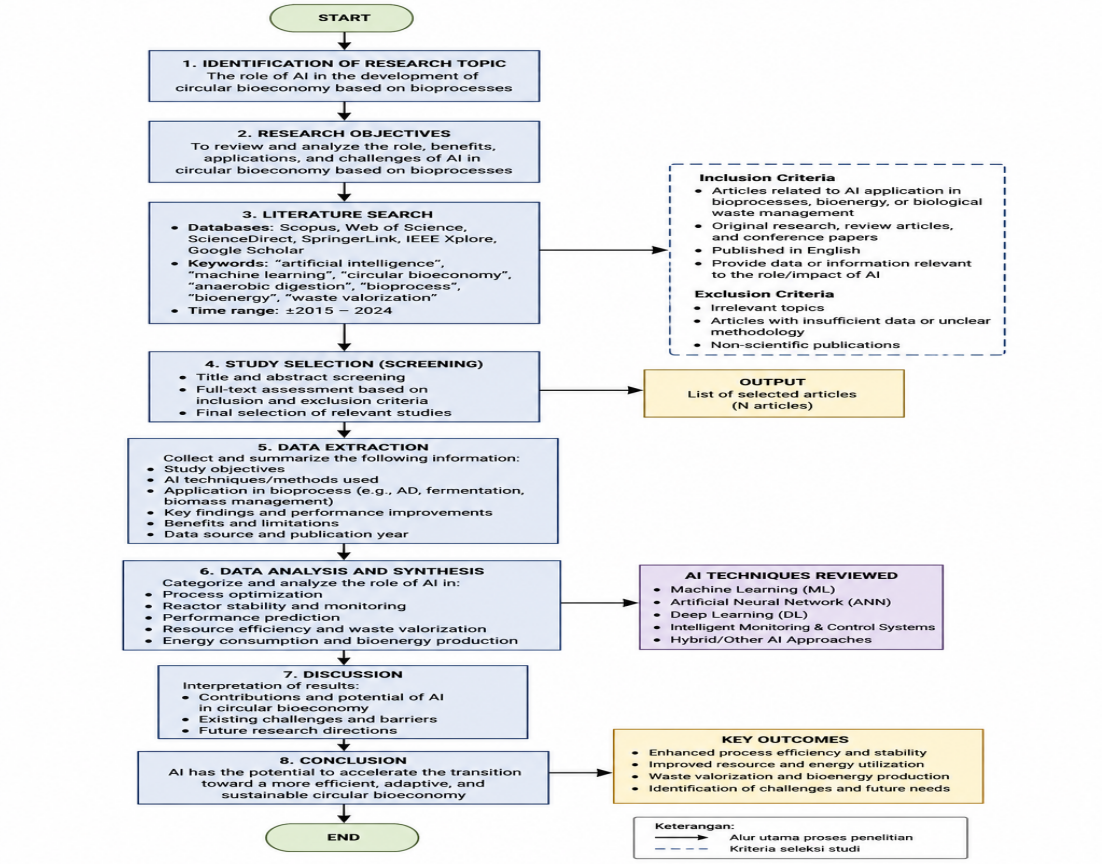
Machine Learning merupakan sub-bidang AI yang memungkinkan sistem computer mempelajari pola dari data historis tanpa harus diprogram secara eksplisit untuk setiap kondisi. Melalui algoritma pembelajaran, Machine Learning mampu mengidentifikasi hubungan kompleks dan nonlinier antar variabel yang sering di temukan pada sistem biologis. Dalam rekayasa bioproses, kemampuan ini sangat penting karena proses biologis umumnya di pengaruhi oleh banyak factor yang saling berinteraksi sehingga peran dari Machine Learning sebagai alat analisis dan prediksi sangat membantu untuk meningkatkanefisiensi serta stabilitas proses biologis [6].

Integrasi antara AI, Machine Learning, bioproses, dan biorefinery pada akhirnya mendukung implementasi *circular bioekonomi.* Dengan memanfaatkan sumber daya biologis secara berkelanjutan melalui prinsip sirkular sehingga limbah menjadi berkurang jumlahnya, biomassa lebih dapat dimanfaatkan secara maksimal sehingga nilai sumber daya dapat di pertahankan selama mungkin dalam siklus produksi. Dalam sistem ini limbah dari suatu proses tidak lagi di naggap sebagai residu yang harus di buang, akan tetapi bisa di manfaatkan Kembali sebagai bahan baku untuk proses berikutnya. keberhasilan circular bioekonomi sangat bergantung pada kemampuan sistem dalam mengoptimalkan konversi biomassa, meminimalkan kehilangan sumber daya, serta meningkatkan efisiensi energi dan material [6].

METODOLOGI PENELITIAN

Biomassa dan limbah organik merupakan sumber daya utama dalam sistem *circular bioekonomi* yang dapat di konversi menjadi bioenergi dan bioproduk melalui bioproses, seperti fermentasi dan anaerobic digestion. Kinerja proses tersebut dipengaruhi oleh berbagai parameter operasional, seperti pH, suhu, *organik loading rate* (OLR), *volatile fatty acids* (VFA), *chemical oxygen demand* (COD), *total solids* (TS), dan *volatile solids* (VS). interaksi antar parameter yang kompleks dan bersifat nonlinier sering menyebabkan keterbatasan pada metode optimasi konvensional [7].

Tahapan penelitian dapat digambarkan pada alur proses berikut ini :



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, Artificial Intellegence (AI) dan Machine Learning (ML) digunakan sebagai pendekatan berbasis data (*data-driven approach)* untuk memodelkan, memprediksi, dan mengoptimalkan kinerja bioproses [8]. Pengembangan model AI AI umumnya diawali dengan penelitian eksperimental menggunakan berbagai jenis biomassa dan limbah organik sebagai substrat fermentasi atau *anaerobic digestion.* Kemudian data proses yang dikumpulkan berupa parameter operational dan respon sistem di analisis dengan menggunakan pendekatan statistic berupa korelasi, regresi dan ANOVA untuk mengidentifikasi variabel mana saja yang memiliki pengaruh yang signifikan. Selanjutnya, algoritma Machine Learning (ML) seperti *Artificial Neural Network* (ANN), *Random Forest* (RF), *Support Vector Machine* (SVM), dan *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) digunakan untuk membangun model prediksi dan optimasi proses. Pada skala laboratorium data diperoleh melalui pengukuran periodik dengan minimal tiga replikasi per perlakuan untuk menjamin validitas statistik. Dan untuk skala industri data umumnya dikumpulkan secara real-time mengunakan sensor, IoT dan sistem SCADA sehingga menghasilkan *big data* yang mendukung implementasi AI secara berkelanjutan [9], [10], [11], [12].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Analisis Pengaruh Karakteristik Bahan Organik terhadap Produksi Gas Hidrogen Menggunakan Pendekatan Statistik dan Machine Learning.

Tabel 1.Variabel Penelitian

Kode	Variabel	Satuan
X1	Kadar Glukosa	g/L
X2	pH	-
X3	Temperatur	°C
X4	COD	mg/L
X5	Waktu Fermentasi	jam
Y	Produksi Hidrogen	mL H2/g VS

Hasil Analisis

1. Korelasi Pearson menunjukkan glukosa (r=0,96), waktu fermentasi (r=0,94), pH (r=0,90), temperatur (r=0,88), dan COD (r=0,81) berkorelasi positif dengan produksi hidrogen.
2. Regresi Linear Berganda:
   $Y = -120 + 2{,}45X1 + 15{,}2X2 + 3{,}10X3 + 0{,}0018X4 + 0{,}62X5$
   $R^2 = 0{,}95$.
3. ANOVA:
   $F = 62{,}5$; p-value = 0,000 sehingga model signifikan.
4. Machine Learning:
   ANN: R^2=0,987; RMSE=4,3
   Random Forest: R^2=0,982; RMSE=4,8
   SVM: R^2=0,975; RMSE=5,1
   XGBoost: R^2=0,991; RMSE=3,5

Implementasi AI pada sistem bioproses masih menghadapi berbagai tantangan teknis yang membatasi penyerapannya secara luas. Tabel 1. merupakan beberapa studi terbaru yang telah meneliti peran AI dalam pengembangan circular bioekonomi berbasis bioproses.

Tabel 1. Studi Terbaru Terkait Peran AI Dalam Pengembangan Bioekonomi Berbasis Bioproses

Peneliti	Fokus Penelitian
Tsui T.,dkk (2023)[6]	Aplikasi Machine Learning pada empat sistem biorefinery kritis composting, Fermentasi, Anaerobik Digestion, dan konversi thermokimia untuk membangun efisiensi sumber daya dari limbah beragam.
Khanal.,dkk (2023)[13]	Transformasi digital bioproses melalui AI/ML meliputi prediksi optimisasi, monitoring real-time, kontrol proses, dan analisis teknik ekonomi pada anaerobik digestion, konversi thermokimia, pengolahan air limbah, dan bioproses fungi/mikroalga.
Shah M.,dkk (2025)[14]	Kerangka kerja pemetaan 10 domain CBE terhadap 8 fungsi inti AI (prediksi, optimasi, penemuan). Studi kasus valorisasi biowaste menunjukkan dominasi AI pada tugas prediksi/optimasi masih minim pada fungsi discovery & desain.
De Lucas Lopez.,dkk (2026)[1]	AI sebagai penggerak sistem circular economy secara makro.
Prabhu N.,dkk (2026)[15]	Integrasi AI dengan bioprocessing untuk valorisasi cerdas limbah menuju circular bioekonomi berkelanjutan.

Tabel 2. Area Riset Utama yang di Teliti

Area	Contoh kontribusi
Anaerobik Digestion	Prediksi metana, optimasi OLRT, control berbasis LSTM/ ANN
Biorefinery Optimization	ML untuk composting, fermentasi, thermochemical Conversion
Supply Chain & LCA	Tecno-economic analysis + surrogate modeling via ML
Waste Volarization	SCB (sugarcane bagasse), agricultural residue, biowaste
Mikroalgae Biotech	ML untuk idntifikasi strain, optimisasi cultivation hingga konversi biofuel.
Smart Monitoring	loT + AI untuk real-time process monitoring & fault detection

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* (ML) telah memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan kinerja sistem biproses khususnya pada fermentasi dan *anaerobic digestion.* Penerapan algoritma AI memungkinkan prediksi produksi biogas, optimasi parameter operasi, deteksi dini kegagalan proses, hingga pengembangan sistem pengambilan keputusan. Kemampuan tersebut menjadikan AI sebagai salah satu teknologi kunci dalam mendukung transformasi *circular bioekonomi* melalui peningkatan efisiensi pemanfaatan biomassa dan limbah organik.

Berdasarkan telaah literatur terkini, tantangan implementasi AI dalam *circular bioekonomi* berbasis bioproses dapat dikelompokkan ke dalam beberapa aspek utama yaitu : keterbatasan kualitas dan ketersediaan data, kompleksitas sistem biologis, kesenjangan antara skala laboratorium dan industri, keterbatasan interpretabilitas model AI, integrasi lintas teknologi, variabilitas karakteristik biomassa, pengembangan generative AI untuk desain biologis, integrasi aspek ekonomi dan lingkungan, keamanan siber, serta keterbatasan kompetensi sumber daya manusia. Tantangan tersebut menjadi faktor penting yang menentukan keberhasilan implementasi AI secara berkelanjutan dan perlu mendapatkan perhatian khusus dalam pengembangan penelitian maupun penerapan industri di masa depan.

KESIMPULAN

Artificial Intelligence (AI) berpotensi mengubah circular bioekonomi berbasis bioproses dari konsep teoritis menjadi sistem industri yang terukur, teroptimasi dan terotomatisasi. Potensinya baru akan terwujud dengan investasi di fokuskan tidak hanya pada prediksi/optimisasi, tapi juga pada AI-driven discovery & design. Perlu dibangun database/feedstock-specific training data yang refresentatif untuk konteks lokal. diperlukan policy framework yang mendorong kolaborasi antara industry, academia dan government dan membuat teknologi AI terjangkau bagi pelaku usaha skala menengah bawah.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. J. de Lucas López, C. L. Vera, and Á. J. Álvarez Miguel, “Artificial intelligence as a catalyst for the circular economy: a mixed-methods analysis of sustainable production ecosystems (2023–2024),” *International Entrepreneurship and Management Journal*, vol. 22, no. 2, Jun. 2026, doi: 10.1007/s11365-026-01176-y.

[2] M. Shah, M. Wever, and M. Espig, "A Framework for Assessing the Potential of Artificial Intelligence in the Circular Bioekonomi," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 8, Apr. 2025, doi: 10.3390/su17083535.

[3] D. B. Olawade *et al.*, "Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence," Jun. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.wmb.2024.05.001.

[4] T. Huntington, N. R. Baral, M. Yang, E. Sundstrom, and C. D. Scown, "Machine learning for surrogate process models of bioproduction pathways," *Bioresour. Technol.*, vol. 370, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.biortech.2022.128528.

[5] A. Madanaguli, D. Sjödin, V. Parida, and P. Mikalef, "Artificial intelligence capabilities for circular business models: Research synthesis and future agenda," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 200, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.techfore.2023.123189.

[6] T. H. Tsui, M. C. M. van Loosdrecht, Y. Dai, and Y. W. Tong, "Machine learning and circular bioekonomi: Building new resource efficiency from diverse waste streams," *Bioresour. Technol.*, vol. 369, p. 128445, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2022.128445.

[7] E. Alepu Odey, K. Wang, Z. Li, and R. Gao, "Influence of organik loading rates on the production of methane from anaerobic digestion of sewage concentrate," *Energy and Environment*, vol. 29, no. 7, pp. 1130–1141, Nov. 2018, doi: 10.1177/0958305X18769860.

[8] N. Kythreotou, G. Florides, and S. A. Tassou, "A review of simple to scientific models for anaerobic digestion," 2014, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.renene.2014.05.055.

[9] F. Tufaner, K. Dalkılıç, and A. Uğurlu, "Artificial intelligence-based modeling of biogas production in a combined microbial electrolysis cell-anaerobic digestion system using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 32, no. 20, pp. 12524–12546, Apr. 2025, doi: 10.1007/s11356-025-36467-4.

[10] S. Ö. Cinar, S. Cinar, and K. Kuchta, "Machine Learning Algorithms for Temperature Management in the Anaerobic Digestion Process," *Fermentation*, vol. 8, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.3390/fermentation8020065.

[11] G. Rybak *et al.*, "Algorithms for Optimizing Energy Consumption for Fermentation Processes in Biogas Production," *Energies (Basel).*, vol. 16, no. 24, Dec. 2023, doi: 10.3390/en16247972.

[12] H. Rutland, J. You, H. Liu, L. Bull, and D. Reynolds, "A Systematic Review of Machine-Learning Solutions in Anaerobic Digestion," Dec. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).* doi: 10.3390/bioengineering10121410.

[13] A. Khanal, S. Giri, and P. Mainali, "The Practices of At-Source Segregation of Household Solid Waste by the Youths in Nepal," *J. Environ. Public Health*, vol. 2023, pp. 1–6, Feb. 2023, doi: 10.1155/2023/5044295.

[14] M. Shah, M. Wever, and M. Espig, "A Framework for Assessing the Potential of Artificial Intelligence in the Circular Bioekonomi," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 8, Apr. 2025, doi: 10.3390/su17083535.

[15] N. Prabhu and S. Kadry, "Intelligent waste valorization: AI, bioprocessing, and thermochemical conversion for circular bioekonomi transitions," *Cleaner Waste Systems*, vol. 14, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.clwas.2026.100509.