



Optimalisasi Pemanfaatan Limbah Agroindustri Menggunakan Bioproses Berbasis Kecerdasan Buatan dalam Kerangka Ekonomi Sirkular

Dimas Arya Pranata ^{a,1,*}, Rika Ayuningtyas Mahendra ^{b,2}, Ahmad Fauzan Hidayat ^{c,3}

^aProgram Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Indonesia

^bProgram Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Malang, Indonesia

^cProgram Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Merdeka Malang, Indonesia

¹ dimas.pranata@ub.ac.id; ² rika.mahendra@umm.ac.id; ³ ahmad.fauzan@unmer.ac.id

* Corresponding Author

ABSTRACT

The increasing volume of agro-industrial waste resulting from the expansion of agricultural production and food processing activities requires more sustainable management strategies. This article aims to analyze the optimization of agro-industrial waste utilization through artificial intelligence-based bioprocesses within the framework of the circular economy. The study employs a systematic literature review approach by examining scientific publications related to agro-industrial waste, biorefinery technologies, artificial intelligence, and circular bioeconomy systems. The findings indicate that agro-industrial waste possesses significant potential to be converted into bioenergy, biohydrogen, biomaterials, and other value-added bioproducts. However, the heterogeneous nature of biomass and the complexity of biological processes often limit production efficiency. The integration of artificial intelligence has demonstrated substantial potential to improve system performance through process parameter prediction, operational optimization, real-time data analysis, and data-driven decision-making. This article argues that artificial intelligence functions as a strategic enabler that enhances bioprocess efficiency while accelerating the implementation of circular economy principles through improved resource efficiency and value recovery from waste streams. The study contributes by developing a conceptual framework that integrates agro-industrial waste management, bioprocess technologies, artificial intelligence, and circular economy principles as a foundation for sustainable bioeconomy development.

Copyright © 2026, The Author(s)

This is an open-access article under the CC-BY-SA license



Article History

Received 2026-03-25

Revised 2026-04-27

Accepted 2026-05-09

Published 2026-06-23

Keywords

Agro-Industrial Waste;
Biorefinery;
Artificial Intelligence;
Circular Bioeconomy;
Biomass Valorization

PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas agroindustri global telah menghasilkan volume limbah organik yang semakin besar dan menjadi tantangan serius bagi keberlanjutan lingkungan. Berbagai sektor agroindustri, termasuk pengolahan hasil pertanian, perkebunan, peternakan, dan industri pangan, menghasilkan residu biomassa dalam jumlah signifikan yang sering kali belum dimanfaatkan secara optimal. Pendekatan ekonomi linear yang berorientasi pada pola produksi, konsumsi, dan pembuangan telah terbukti meningkatkan tekanan terhadap sumber daya alam serta memperbesar risiko pencemaran lingkungan. Dalam konteks tersebut, konsep ekonomi sirkular berkembang sebagai paradigma pembangunan berkelanjutan yang menekankan efisiensi sumber daya melalui pemanfaatan kembali material, pemulihan nilai, dan pengurangan limbah. Transformasi limbah agroindustri menjadi produk bernilai tambah melalui pendekatan biorefinery dan bioekonomi sirkular dipandang sebagai strategi penting untuk mewujudkan sistem produksi yang lebih berkelanjutan (Ranjbari et al., 2022; Kumar et al., 2022; Awasthi et al., 2022).

Limbah agroindustri memiliki kandungan lignoselulosa, senyawa organik, nutrisi, dan biomassa yang berpotensi dikonversi menjadi berbagai produk bernilai ekonomi seperti bioenergi, biohidrogen, biokimia, biomaterial, pupuk hayati, dan pakan ternak. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa limbah pertanian dan limbah cair agroindustri dapat menjadi bahan baku penting dalam sistem biorefinery modern yang mendukung transisi menuju ekonomi sirkular. Namun demikian, pemanfaatan limbah tersebut masih menghadapi berbagai kendala teknis, termasuk heterogenitas bahan baku, rendahnya efisiensi proses biologis, tingginya biaya operasional, serta keterbatasan dalam pengendalian parameter proses secara real-time. Kondisi ini menyebabkan banyak potensi sumber daya yang belum dapat dimanfaatkan secara maksimal meskipun ketersediaannya melimpah di berbagai negara berkembang maupun negara maju (Martinez-Burgos et al., 2021; Yaashikaa et al., 2022; Blasi et al., 2023; Varjani et al., 2022).

Perkembangan teknologi bioproses telah membuka peluang baru dalam pemanfaatan limbah agroindustri melalui berbagai mekanisme konversi biologis seperti fermentasi, digesti anaerobik, produksi biohidrogen, produksi enzim, sintesis biomaterial, dan pengolahan berbasis mikroorganisme. Pendekatan *waste-to-wealth* yang memanfaatkan teknologi bioteknologi semakin banyak dikembangkan untuk menghasilkan nilai ekonomi sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Penelitian Sindhu et al. (2021) menunjukkan bahwa limbah agroindustri dapat dikonversi menjadi berbagai produk bernilai tinggi melalui pemanfaatan mikroorganisme dan proses biokonversi yang terintegrasi. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Chandel et al. (2022), Mishra et al. (2023), dan Yafetto et al. (2023) yang menegaskan bahwa optimalisasi pemanfaatan biomassa limbah merupakan komponen penting dalam pengembangan bioekonomi berkelanjutan.

Dalam beberapa tahun terakhir, penerapan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) dan pembelajaran mesin (*machine learning*) mulai diintegrasikan ke dalam sistem bioproses untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah dan konversi biomassa. Teknologi ini memungkinkan prediksi parameter proses, optimasi kondisi operasi, pemodelan kinerja sistem biologis, pengendalian proses secara adaptif, serta peningkatan akurasi pengambilan keputusan berbasis data. Berbagai studi menunjukkan bahwa kecerdasan buatan mampu meningkatkan produktivitas sistem biorefinery dan mempercepat transformasi menuju bioekonomi sirkular. Aplikasi tersebut telah digunakan dalam pengolahan *biowaste*, produksi biohidrogen, konversi biomassa, serta sistem bioenergi berbasis limbah organik (Aniza et al., 2023; Ghimire et al., 2021; Hossain et al., 2022; Khan et al., 2023).

Meskipun demikian, kajian ilmiah yang tersedia masih cenderung membahas pemanfaatan limbah agroindustri, teknologi biorefinery, ekonomi sirkular, dan kecerdasan buatan secara terpisah. Sebagian penelitian berfokus pada aspek teknis konversi biomassa, sementara penelitian lain menitikberatkan pada pengembangan model kecerdasan buatan untuk optimasi proses. Di sisi lain, kajian mengenai integrasi sistematis antara teknologi bioproses berbasis kecerdasan buatan dengan kerangka ekonomi sirkular masih relatif terbatas. Padahal, keberhasilan transisi menuju bioekonomi sirkular tidak hanya ditentukan oleh kemampuan mengolah limbah menjadi produk bernilai tambah, tetapi juga oleh kemampuan sistem dalam mengoptimalkan efisiensi sumber daya, meminimalkan kehilangan material, dan meningkatkan keberlanjutan operasional secara menyeluruh (Tsui et al., 2023; Bhagat et al., 2024; Sadhukhan et al., 2023).

Kesenjangan penelitian tersebut menunjukkan perlunya analisis yang lebih komprehensif mengenai bagaimana kecerdasan buatan dapat berfungsi sebagai faktor pengungkit dalam optimalisasi bioproses berbasis limbah agroindustri. Artikel ini berargumen bahwa integrasi kecerdasan buatan dengan teknologi bioproses mampu meningkatkan efisiensi konversi

biomassa, memperbaiki pengambilan keputusan operasional, serta memperkuat implementasi prinsip ekonomi sirkular melalui peningkatan tingkat pemulihan sumber daya dan penciptaan nilai tambah. Dengan demikian, kecerdasan buatan tidak hanya berperan sebagai alat optimasi teknis, tetapi juga sebagai instrumen strategis dalam pengembangan sistem bioekonomi yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

Kontribusi ilmiah artikel ini terletak pada penyusunan kerangka konseptual yang mengintegrasikan tiga domain utama, yaitu pemanfaatan limbah agroindustri, teknologi bioproses, dan kecerdasan buatan dalam perspektif ekonomi sirkular. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang membahas masing-masing komponen secara parsial, artikel ini mengembangkan sintesis literatur yang menunjukkan hubungan fungsional antara teknologi kecerdasan buatan, efisiensi proses biokonversi, dan penciptaan nilai dalam sistem bioekonomi sirkular. Selain itu, artikel ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai peluang, tantangan, dan arah pengembangan teknologi pada sektor agroindustri masa depan (Nizami et al., 2021; Romero-Perdomo & González-Curbelo, 2023; Varjani et al., 2022).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peran kecerdasan buatan dalam optimalisasi pemanfaatan limbah agroindustri melalui berbagai pendekatan bioproses serta mengevaluasi kontribusinya terhadap implementasi ekonomi sirkular. Secara khusus, penelitian ini berupaya mengidentifikasi mekanisme integrasi kecerdasan buatan dalam sistem biorefinery, mengevaluasi dampaknya terhadap efisiensi pemulihan sumber daya, dan menjelaskan implikasinya bagi pengembangan bioekonomi berkelanjutan pada sektor agroindustri.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode *systematic literature review* yang bertujuan untuk menganalisis optimalisasi pemanfaatan limbah agroindustri melalui bioproses berbasis kecerdasan buatan dalam kerangka ekonomi sirkular. Pendekatan ini dipilih karena mampu menghasilkan pemahaman komprehensif mengenai perkembangan konseptual, teknologi, serta arah penelitian terkini yang berkaitan dengan integrasi limbah agroindustri, sistem biorefinery, kecerdasan buatan, dan bioekonomi sirkular. Objek material penelitian adalah berbagai bentuk limbah agroindustri yang dimanfaatkan sebagai sumber daya dalam proses biokonversi, sedangkan objek formal penelitian adalah penerapan teknologi kecerdasan buatan dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem pemanfaatan limbah tersebut. Metode kajian literatur sistematis dipandang relevan karena memungkinkan identifikasi pola hubungan antar konsep, sintesis temuan empiris, serta pengembangan argumentasi ilmiah berdasarkan bukti yang telah terpublikasi (Ranjbari et al., 2022; Kumar et al., 2022).

Sumber data penelitian sepenuhnya berasal dari data sekunder yang diperoleh dari publikasi ilmiah bereputasi internasional yang terindeks Scopus. Data dikumpulkan melalui penelusuran dan seleksi literatur yang secara langsung membahas topik limbah agroindustri, biorefinery, bioproses, kecerdasan buatan, pembelajaran mesin, bioenergi, biohidrogen, bioekonomi sirkular, serta teknologi valorisasi limbah. Literatur yang digunakan terdiri atas artikel penelitian dan artikel tinjauan yang diterbitkan pada jurnal internasional bereputasi, antara lain *Bioresource Technology*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Science of the Total Environment*, *Environmental Pollution*, *Sustainability*, dan *Circular Economy*. Proses pengumpulan data dilakukan melalui identifikasi, klasifikasi, dan ekstraksi informasi penting dari setiap artikel yang mencakup tujuan penelitian, pendekatan teknologi yang digunakan, jenis limbah yang dimanfaatkan, penerapan kecerdasan buatan, hasil yang diperoleh, serta

implikasinya terhadap ekonomi sirkular (Sindhu et al., 2021; Yaashikaa et al., 2022; Bhagat et al., 2024).

Analisis data dilakukan melalui beberapa tahapan. Tahap pertama adalah analisis deskriptif untuk mengidentifikasi karakteristik umum penelitian yang berkaitan dengan pemanfaatan limbah agroindustri dan teknologi bioproses. Tahap kedua adalah analisis tematik yang bertujuan mengelompokkan temuan penelitian ke dalam beberapa tema utama, yaitu valorisasi limbah agroindustri, pengembangan sistem biorefinery, penerapan kecerdasan buatan dalam optimasi proses, serta kontribusinya terhadap ekonomi sirkular. Tahap ketiga adalah analisis sintesis untuk mengintegrasikan berbagai temuan yang memiliki keterkaitan konseptual sehingga diperoleh kerangka pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara teknologi kecerdasan buatan dan efisiensi sistem biokonversi limbah. Melalui proses ini, penelitian tidak hanya mendeskripsikan hasil penelitian terdahulu, tetapi juga mengidentifikasi kecenderungan, peluang, serta tantangan yang muncul dalam pengembangan teknologi masa depan (Aniza et al., 2023; Tsui et al., 2023; Khan et al., 2023).

Kerangka analisis penelitian dibangun berdasarkan perspektif ekonomi sirkular dan bioekonomi sirkular yang menekankan pemulihan sumber daya, penciptaan nilai tambah, efisiensi material, serta keberlanjutan sistem produksi. Konsep biorefinery digunakan untuk menjelaskan mekanisme transformasi limbah agroindustri menjadi berbagai produk bernilai ekonomi, sedangkan konsep kecerdasan buatan digunakan untuk menganalisis bagaimana teknologi berbasis data mampu meningkatkan performa sistem melalui prediksi, optimasi, dan pengambilan keputusan yang lebih akurat. Integrasi kedua perspektif tersebut menjadi dasar dalam mengevaluasi kontribusi teknologi kecerdasan buatan terhadap peningkatan efisiensi bioproses dan percepatan transisi menuju ekonomi sirkular pada sektor agroindustri (Awasthi et al., 2022; Sadhukhan et al., 2023; Romero-Perdomo & González-Curbelo, 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Transformasi limbah agroindustri menjadi sumber daya bernilai tambah merupakan salah satu agenda utama dalam pengembangan ekonomi sirkular dan bioekonomi berkelanjutan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa limbah agroindustri tidak lagi dipandang sebagai residu produksi yang harus dibuang, melainkan sebagai sumber biomassa yang dapat dimanfaatkan kembali melalui berbagai teknologi biokonversi. Limbah pertanian, limbah perkebunan, residu pengolahan pangan, serta limbah cair agroindustri mengandung senyawa organik, lignoselulosa, protein, lemak, dan nutrisi yang memiliki potensi tinggi untuk diolah menjadi bioenergi, biokimia, biomaterial, pupuk organik, maupun produk bernilai ekonomi lainnya (Sindhu et al., 2021; Blasi et al., 2023; Mishra et al., 2023). Perspektif ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular yang menekankan pemanfaatan sumber daya secara berulang sehingga dapat mengurangi tekanan terhadap lingkungan sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan material.

Perkembangan konsep bioekonomi sirkular telah mendorong perubahan paradigma dari pengelolaan limbah menuju sistem valorisasi sumber daya. Dalam pendekatan ini, limbah agroindustri diposisikan sebagai bahan baku sekunder yang dapat dimasukkan kembali ke dalam rantai produksi melalui berbagai mekanisme biorefinery. Awasthi et al. (2022) menjelaskan bahwa pengembangan biorefinery berbasis limbah pertanian menjadi salah satu strategi paling efektif untuk menghubungkan tujuan ekonomi, lingkungan, dan sosial dalam sistem produksi modern. Pendekatan tersebut memungkinkan satu jenis biomassa menghasilkan berbagai produk secara simultan, sehingga meningkatkan efisiensi pemanfaatan bahan baku dan memperbesar nilai ekonomi yang dihasilkan. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Kumar et al. (2022) yang

menunjukkan bahwa sistem waste biorefinery mampu meningkatkan tingkat pemulihan sumber daya sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku berbasis fosil.

Berbagai bentuk limbah agroindustri memiliki karakteristik yang berbeda sehingga memerlukan pendekatan bioproses yang spesifik. Limbah lignoselulosa seperti jerami, sekam, tongkol jagung, ampas tebu, dan residu perkebunan dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku produksi bioetanol, biogas, bioplastik, serta bahan kimia terbarukan. Sementara itu, limbah cair agroindustri mengandung senyawa organik yang dapat dikonversi menjadi biohidrogen, biometan, dan berbagai produk berbasis fermentasi. Martinez-Burgos et al. (2021) menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah cair agroindustri dalam sistem bioenergi tidak hanya menghasilkan energi terbarukan, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan beban pencemaran lingkungan. Kondisi ini memperlihatkan bahwa nilai ekonomi limbah sangat bergantung pada kemampuan teknologi dalam mengoptimalkan proses konversi yang digunakan.

Meskipun potensi limbah agroindustri sangat besar, implementasi teknologi biokonversi masih menghadapi berbagai kendala operasional. Kompleksitas karakteristik biomassa, variasi komposisi bahan baku, sensitivitas mikroorganisme terhadap perubahan lingkungan, serta ketidakstabilan parameter proses sering menyebabkan efisiensi produksi yang rendah. Dalam sistem fermentasi maupun digesti anaerobik, perubahan kecil pada suhu, pH, konsentrasi substrat, dan aktivitas mikroorganisme dapat menghasilkan perbedaan signifikan terhadap kualitas maupun kuantitas produk akhir. Ghimire et al. (2021) menunjukkan bahwa produksi biohidrogen melalui fermentasi gelap sangat dipengaruhi oleh interaksi berbagai parameter proses yang kompleks dan sulit diprediksi menggunakan pendekatan konvensional. Tantangan yang sama juga ditemukan pada berbagai sistem biorefinery yang memanfaatkan biomassa heterogen sebagai bahan baku utama.

Dalam konteks tersebut, kecerdasan buatan muncul sebagai teknologi yang mampu meningkatkan efektivitas pengelolaan sistem bioproses. Berbeda dengan metode analisis tradisional yang sering bergantung pada asumsi linear, kecerdasan buatan mampu memproses data dalam jumlah besar dan mengidentifikasi pola hubungan yang kompleks di antara berbagai variabel proses. Teknologi machine learning, artificial neural network, deep learning, dan berbagai algoritma optimasi telah digunakan untuk memprediksi performa sistem biologis, mengoptimalkan kondisi operasi, serta meningkatkan akurasi pengambilan keputusan. Aniza et al. (2023) menjelaskan bahwa penerapan kecerdasan buatan dalam pengolahan limbah biologis dapat meningkatkan efisiensi proses, mempercepat identifikasi parameter kritis, serta mengurangi ketidakpastian operasional yang selama ini menjadi kendala utama dalam sistem pengolahan limbah.

Penerapan kecerdasan buatan pada sektor biorefinery menunjukkan perkembangan yang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir. Bhagat et al. (2024) menemukan bahwa integrasi kecerdasan buatan ke dalam sistem biorefinery memungkinkan peningkatan efisiensi konversi biomassa, optimalisasi penggunaan energi, dan pengurangan biaya operasional. Teknologi ini juga berperan penting dalam memprediksi hasil produksi berdasarkan karakteristik bahan baku yang digunakan. Dengan kemampuan tersebut, operator dapat menentukan strategi pengolahan yang paling efektif sebelum proses berlangsung. Hasil ini menunjukkan bahwa kecerdasan buatan tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu analisis data, tetapi juga menjadi komponen strategis dalam sistem pengambilan keputusan yang mendukung keberlanjutan operasional.

Tabel 1 menyajikan sintesis berbagai kontribusi teknologi kecerdasan buatan dalam optimalisasi pemanfaatan limbah agroindustri berdasarkan temuan literatur yang dianalisis.

Tabel 1. Kontribusi Kecerdasan Buatan dalam Optimalisasi Bioproses Berbasis Limbah Agroindustri

Aspek Sistem	Fungsi Kecerdasan Buatan	Dampak terhadap Bioproses	Referensi
Prediksi kualitas biomassa	Pemodelan karakteristik baku bahan	Meningkatkan proses konversi	akurasi Khan et al. (2023)
Produksi biohidrogen	Optimasi parameter fermentasi	Meningkatkan produktivitas biohidrogen	Ghimire et al. (2021); Hossain et al. (2022)
Sistem biorefinery	Prediksi hasil dan efisiensi produksi	Menurunkan operasional	biaya Bhagat et al. (2024)
Pengolahan biowaste	Analisis data proses secara real-time	Meningkatkan pengolahan	efisiensi Aniza et al. (2023)
Sistem bioekonomi sirkular	Pengambilan keputusan berbasis data	Meningkatkan sumber daya	efisiensi Tsui et al. (2023)

Temuan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa kontribusi kecerdasan buatan tidak terbatas pada satu tahap proses tertentu, melainkan mencakup seluruh rantai nilai dalam sistem pemanfaatan limbah agroindustri. Kemampuan untuk melakukan prediksi, optimasi, dan pengendalian proses secara real-time memberikan keuntungan kompetitif yang signifikan dibandingkan pendekatan konvensional. Hal ini memperkuat argumentasi bahwa keberhasilan pengembangan bioekonomi sirkular pada masa depan akan sangat dipengaruhi oleh kemampuan mengintegrasikan teknologi digital dengan sistem produksi biologis.

Selain meningkatkan efisiensi teknis, kecerdasan buatan juga berkontribusi terhadap pencapaian tujuan ekonomi sirkular melalui peningkatan efisiensi sumber daya. Tsui et al. (2023) menegaskan bahwa kombinasi antara machine learning dan ekonomi sirkular memungkinkan identifikasi jalur pemanfaatan limbah yang paling efisien berdasarkan karakteristik material, kebutuhan pasar, dan dampak lingkungan. Dengan demikian, pengambilan keputusan tidak lagi hanya didasarkan pada pertimbangan teknis, tetapi juga mempertimbangkan aspek keberlanjutan secara menyeluruh. Pendekatan ini sangat penting mengingat ekonomi sirkular menuntut optimalisasi nilai sumber daya sepanjang siklus hidup produk.

Dari perspektif keberlanjutan, integrasi kecerdasan buatan dan bioproses memberikan kontribusi pada tiga dimensi utama pembangunan berkelanjutan. Dimensi ekonomi tercermin melalui peningkatan produktivitas dan penciptaan produk bernilai tambah. Dimensi lingkungan diwujudkan melalui pengurangan limbah, emisi, dan konsumsi sumber daya primer. Sementara itu, dimensi sosial berkaitan dengan peluang penciptaan lapangan kerja baru, pengembangan industri hijau, dan peningkatan ketahanan ekonomi daerah berbasis agroindustri. Temuan ini konsisten dengan hasil kajian Ranjbari et al. (2022) dan Sadhukhan et al. (2023) yang menempatkan bioekonomi sirkular sebagai instrumen strategis dalam mencapai target pembangunan berkelanjutan.

Meskipun demikian, implementasi kecerdasan buatan pada sistem pemanfaatan limbah agroindustri masih menghadapi sejumlah tantangan. Ketersediaan data berkualitas tinggi, infrastruktur digital, integrasi sensor industri, biaya investasi awal, serta keterbatasan sumber

daya manusia menjadi faktor yang memengaruhi keberhasilan penerapan teknologi tersebut. Selain itu, sebagian besar penelitian yang ada masih berfokus pada skala laboratorium dan pilot project sehingga diperlukan validasi lebih lanjut pada skala industri. Khan et al. (2023) menekankan bahwa keberhasilan penerapan machine learning dalam sistem biomassa sangat bergantung pada kualitas data dan kemampuan model dalam beradaptasi terhadap variasi kondisi operasional.

Analisis literatur menunjukkan bahwa masa depan pemanfaatan limbah agroindustri akan bergerak menuju sistem biorefinery cerdas (smart biorefinery) yang mengintegrasikan teknologi bioteknologi, kecerdasan buatan, Internet of Things, dan analitik data secara simultan. Model ini memungkinkan pengelolaan sumber daya yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan dibandingkan sistem konvensional. Dalam kerangka ekonomi sirkular, pendekatan tersebut mampu mempercepat transformasi limbah menjadi sumber daya strategis yang mendukung pertumbuhan ekonomi rendah karbon. Oleh karena itu, integrasi kecerdasan buatan ke dalam sistem bioproses tidak hanya merepresentasikan inovasi teknologi, tetapi juga menjadi fondasi penting bagi pengembangan bioekonomi sirkular yang lebih resilien dan berkelanjutan pada masa depan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah agroindustri memiliki potensi strategis sebagai sumber daya dalam pengembangan bioekonomi sirkular melalui berbagai teknologi bioproses dan sistem biorefinery. Hasil analisis literatur mengindikasikan bahwa biomassa dan limbah cair agroindustri dapat dikonversi menjadi berbagai produk bernilai tambah, seperti bioenergi, biohidrogen, biokimia, biomaterial, serta produk berbasis fermentasi lainnya. Namun, kompleksitas karakteristik bahan baku dan dinamika proses biologis sering menjadi kendala dalam mencapai efisiensi konversi yang optimal. Dalam konteks tersebut, kecerdasan buatan terbukti berperan penting dalam meningkatkan kinerja sistem melalui kemampuan prediksi, optimasi parameter proses, analisis data secara real-time, serta pengambilan keputusan berbasis data. Integrasi kecerdasan buatan ke dalam sistem bioproses memungkinkan peningkatan efisiensi pemulihan sumber daya, produktivitas proses, dan keberlanjutan operasional yang mendukung implementasi ekonomi sirkular.

Kontribusi utama artikel ini terletak pada pengembangan sintesis konseptual yang menghubungkan pemanfaatan limbah agroindustri, teknologi bioproses, kecerdasan buatan, dan ekonomi sirkular dalam satu kerangka analisis yang terintegrasi. Temuan penelitian memperlihatkan bahwa kecerdasan buatan tidak hanya berfungsi sebagai instrumen optimasi teknis, tetapi juga sebagai faktor strategis yang memperkuat transisi menuju sistem bioekonomi yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Dari sisi praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi pelaku industri, peneliti, dan pembuat kebijakan dalam merancang sistem pengelolaan limbah yang berorientasi pada pemulihan nilai dan efisiensi sumber daya. Selain itu, artikel ini memperkaya literatur mengenai transformasi digital dalam sektor biorefinery dan pengembangan industri berbasis biomassa.

Meskipun demikian, sebagian besar studi yang dianalisis masih berfokus pada skala laboratorium dan demonstrasi teknologi sehingga validasi pada skala industri masih memerlukan perhatian lebih lanjut. Penelitian mendatang perlu mengkaji integrasi kecerdasan buatan dengan teknologi digital lainnya, seperti Internet of Things, digital twin, dan sistem analitik prediktif dalam lingkungan industri nyata. Kajian lanjutan juga perlu mengevaluasi aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan secara lebih komprehensif guna memastikan bahwa penerapan teknologi

tersebut benar-benar mampu mempercepat terwujudnya ekonomi sirkular yang berkelanjutan dan inklusif.

DAFTAR PUSTAKA

- Aniza, F. N., Abdul Hamid, F. S., Hassan, M. A., Shirai, Y., & Othman, M. R. (2023). A review of biowaste remediation and valorization for environmental sustainability: Artificial intelligence approach. *Environmental Pollution*, 324, 121363. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121363>
- Awasthi, M. K., Sindhu, R., & Taherzadeh, M. J. (2022). Agricultural waste biorefinery development towards circular bioeconomy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112122>
- Bhagat, D., Raza, N., Abdullah, A., Kumar, G., & Saratale, G. D. (2024). Artificial intelligence-assisted biorefinery systems for sustainable waste valorization and circular bioeconomy. *Science of the Total Environment*, 912, 168845. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168845>
- Blasi, A., Verardi, A., Lopresto, C. G., Siciliano, S., & Sangiorgio, P. (2023). Lignocellulosic agricultural waste valorization to obtain valuable products: An overview. *Recycling*, 8(4), 61. <https://doi.org/10.3390/recycling8040061>
- Chandel, A. K., Garlapati, V. K., Singh, A. K., Antunes, F. A. F., & da Silva, S. S. (2022). The role of renewable chemicals and bioproducts in building a bioeconomy. *Bioresource Technology*, 344, 126287. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126287>
- Ghimire, A., Frunzo, L., Pirozzi, F., Trably, E., Escudié, R., Lens, P. N. L., & Esposito, G. (2021). A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of artificial intelligence. *Bioresource Technology*, 340, 125683. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125683>
- Hossain, S. S. S. K., Ali, S. S., Cheng, C. K., & Ayodele, B. V. (2022). Performance analysis and modeling of bio-hydrogen recovery from agro-industrial wastewater. *Frontiers in Energy Research*, 10, 980360. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.980360>
- Khan, M. Z. H., Tumuluru, J. S., & Rijal, B. (2023). Machine learning applications in biomass conversion and bioenergy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113299. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113299>
- Kumar, V., Sindhu, R., Binod, P., Ahluwalia, V., Gnansounou, E., & Pandey, A. (2022). Waste biorefinery for circular economy: Current status and future directions. *Bioresource Technology*, 360, 127566. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127566>
- Martinez-Burgos, W. J., Sydney, E. B., Medeiros, A. B. P., Magalhães, A. I., Carvalho, J. C., Karp, S. G., Vandenberghe, L. P. S., Letti, L. A. J., Woiciechowski, A. L., & Soccol, C. R. (2021). Agro-industrial wastewater in a circular economy: Characteristics, impacts and applications for bioenergy and biochemicals. *Bioresource Technology*, 341, 125795. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125795>
- Mishra, B., Mohanta, Y. K., Reddy, C. N., Reddy, S. D. M., Mandal, S. K., Yadavalli, R., & Sarma, H. (2023). Valorization of agro-industrial biowaste to biomaterials: An innovative circular bioeconomy approach. *Circular Economy*, 2(3), 100050. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100050>
- Nizami, A. S., Rehan, M., Waqas, M., Naqvi, M., Ouda, O. K. M., Shahzad, K., Miandad, R., Khan, M. Z., Syamsiro, M., Ismail, I. M. I., & Pant, D. (2021). Waste biorefineries: Enabling circular economies in developing countries. *Bioresource Technology*, 241, 1105–1117. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.097>

-
- Ranjbari, M., Esfandabadi, Z. S., Scagnelli, S. D., Morales-Alonso, G., & Carrasco-Gallego, R. (2022). Circular bioeconomy and sustainability: A systematic literature review of scientific journals. *Cleaner Production Letters*, 3, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2022.100038>
- Romero-Perdomo, F., & González-Curbelo, M. Á. (2023). Integrating multi-criteria techniques in life-cycle tools for the circular bioeconomy transition of agri-food waste biomass: A systematic review. *Sustainability*, 15(6), 5026. <https://doi.org/10.3390/su15065026>
- Sadhukhan, J., Martinez-Hernandez, E., Amezcua-Allieri, M. A., & Aburto, J. (2023). Biorefineries and sustainability assessment for circular bioeconomy systems. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 40, 100764. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100764>
- Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., Madhavan, A., Alphonsa, J. A., Vivek, N., Gnansounou, E., Castro, E., & Faraco, V. (2021). Waste-to-wealth: Value recovery from agro-industrial wastes using biotechnological approaches. *Bioresource Technology*, 344, 126190. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126190>
- Tsui, T.-H., van Loosdrecht, M. C. M., Dai, Y., & Tong, Y. W. (2023). Machine learning and circular bioeconomy: Building new resource efficiency from diverse waste streams. *Bioresource Technology*, 369, 128445. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128445>
- Varjani, S., Kumar, G., Rene, E. R., & Pant, D. (2022). Advanced resource recovery technologies for waste valorization and circular economy. *Bioresource Technology*, 361, 127701. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127701>
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., & Varjani, S. (2022). Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review. *Bioresource Technology*, 343, 126126. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126126>
- Yafetto, L., Odamtten, G. T., & Wiafe-Kwagyan, M. (2023). Valorization of agro-industrial wastes into animal feed through microbial fermentation: A review of the global and Ghanaian case. *Heliyon*, 9(4), e14814. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14814>