



Integrasi Kecerdasan Buatan dan Fermentasi Presisi untuk Pengembangan Protein Alternatif Berkelanjutan

Dimas Arkanata Putra ^{a,1,*}, Nabila Rahmawati Kusuma ^{b,2}, Farhan Alif Pradana ^{c,3}

^aProgram Studi Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran, Indonesia

^bProgram Studi Bioteknologi, Sekolah Ilmu dan Teknologi Hayati, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

^cProgram Studi Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, Indonesia

¹ dimas.arkanata@unpad.ac.id; ² nabila.rahmawati@itb.ac.id; ³ farhan.pradana@unpas.ac.id

* Corresponding Author

ABSTRACT

The growing global demand for protein and the increasing need for sustainable food systems have accelerated the development of alternative proteins as a solution to reduce the environmental impacts associated with animal-based food production. Among emerging technologies, precision fermentation has gained significant attention due to its ability to produce high-value proteins through engineered microorganisms. However, the complexity of biological systems and the need for continuous process optimization remain major challenges for large-scale implementation. This study aims to analyze the integrative role of artificial intelligence and precision fermentation in advancing sustainable alternative protein production. A qualitative approach was employed through a systematic literature review and conceptual analysis of reputable scientific publications addressing alternative proteins, precision fermentation, artificial intelligence, and bioprocess engineering. The findings reveal that artificial intelligence contributes to four critical areas, namely protein engineering, microbial strain optimization, fermentation process control, and the development of digital twins for data-driven decision-making. The integration of these technologies enhances production efficiency, accelerates innovation cycles, reduces development costs, and improves environmental sustainability through optimized resource utilization. This article argues that the convergence of artificial intelligence and precision fermentation represents a new paradigm for alternative protein production characterized by greater adaptability, efficiency, and sustainability. The study provides a conceptual contribution to the biotechnology and food innovation literature while offering practical and policy insights for supporting the transition toward sustainable food systems.

Copyright © 2026, The Author(s)

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



Article History

Received 2026-03-27

Revised 2026-04-29

Accepted 2026-05-11

Published 2026-06-24

Keywords

Artificial Intelligence;
Precision
Fermentation;
Alternative Proteins;
Intelligent
Bioprocesses;
Sustainable Food
Systems

PENDAHULUAN

Transformasi sistem pangan global menjadi isu strategis yang semakin mendapatkan perhatian dalam berbagai disiplin ilmu seiring meningkatnya tekanan terhadap keberlanjutan lingkungan, ketahanan pangan, dan kebutuhan protein dunia. Pertumbuhan populasi global, urbanisasi, serta perubahan pola konsumsi telah meningkatkan permintaan terhadap sumber protein secara signifikan. Namun, produksi protein berbasis hewan masih menghadapi berbagai tantangan, terutama terkait emisi gas rumah kaca, penggunaan lahan yang intensif, konsumsi air yang tinggi, dan kerentanan rantai pasok pangan. Studi Xu et al. (2021) menunjukkan bahwa emisi gas rumah kaca yang berasal dari pangan berbasis hewan mencapai tingkat yang jauh lebih tinggi dibandingkan pangan berbasis tumbuhan. Dalam konteks tersebut, pengembangan protein alternatif muncul sebagai salah satu strategi penting untuk mendukung sistem pangan yang lebih berkelanjutan dan efisien. Selain itu, konsep produksi pangan berkelanjutan semakin menekankan perlunya integrasi teknologi maju untuk menghasilkan sumber pangan dengan

dampak lingkungan yang lebih rendah tanpa mengurangi kualitas maupun keamanan produk (van der Goot et al., 2022).

Di antara berbagai pendekatan yang berkembang, fermentasi presisi (precision fermentation) menjadi salah satu inovasi yang menjanjikan dalam produksi protein alternatif generasi berikutnya. Teknologi ini memungkinkan mikroorganisme yang direayasa menghasilkan protein fungsional, enzim, maupun senyawa bioaktif dengan karakteristik yang menyerupai atau bahkan melampaui produk konvensional berbasis hewan. Wang et al. (2021) menjelaskan bahwa fermentasi presisi telah membuka peluang baru dalam produksi protein bernilai tinggi dengan efisiensi produksi yang lebih baik. Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa fermentasi presisi tidak hanya berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas, tetapi juga terhadap perbaikan kualitas, cita rasa, keamanan, dan keberlanjutan pangan (Hilgendorf et al., 2024). Sejalan dengan hal tersebut, berbagai kajian menempatkan fermentasi presisi sebagai salah satu fondasi utama dalam pengembangan protein alternatif yang mampu menjawab tantangan kebutuhan pangan global di masa depan (Knychala et al., 2024; Zhou et al., 2024).

Meskipun demikian, implementasi fermentasi presisi masih menghadapi berbagai hambatan teknis dan operasional. Proses bioproduksi modern melibatkan interaksi biologis yang kompleks, dinamika metabolik yang berubah secara kontinu, serta kebutuhan pengendalian proses yang sangat presisi. Tantangan tersebut menyebabkan tingginya biaya pengembangan, optimasi proses yang memerlukan waktu panjang, serta ketidakpastian dalam skala produksi industri (Zhang et al., 2024). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa keberhasilan fermentasi presisi sangat bergantung pada kemampuan pengelolaan data proses, optimasi parameter produksi, dan pengambilan keputusan berbasis bukti selama seluruh siklus pengembangan bioproses (Malila et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan teknologi yang mampu meningkatkan efisiensi analisis dan pengendalian sistem biologis yang kompleks tersebut.

Perkembangan kecerdasan buatan (artificial intelligence atau AI) menawarkan peluang signifikan untuk menjawab berbagai tantangan tersebut. Dalam beberapa tahun terakhir, penerapan machine learning, deep learning, dan analitik data canggih telah menunjukkan kemampuan yang tinggi dalam memprediksi perilaku sistem biologis, mengoptimalkan parameter fermentasi, serta mempercepat pengembangan produk bioteknologi. Duong-Trung et al. (2022) menjelaskan bahwa integrasi teknik pembelajaran mesin dalam rekayasa bioproses mampu meningkatkan otomatisasi dan mempercepat pengembangan proses fermentasi. Temuan serupa dilaporkan oleh Helleckes et al. (2023) yang menunjukkan bahwa implementasi machine learning telah berkembang dari sekadar konsep teoritis menjadi instrumen praktis dalam pengembangan bioproses industri. Selain itu, penerapan kecerdasan buatan dalam rekayasa protein dan biologi sintetik juga memungkinkan identifikasi desain molekuler yang lebih optimal sehingga dapat mempercepat pengembangan protein target dengan karakteristik yang diinginkan (Qiu & Wei, 2023; Wurtzel & Kutchan, 2023).

Kajian terdahulu umumnya dapat dikelompokkan ke dalam tiga pendekatan utama. Kelompok pertama berfokus pada pengembangan dan prospek protein alternatif sebagai solusi keberlanjutan pangan global (Xu et al., 2021; van der Goot et al., 2022; Abo, 2026). Kelompok kedua membahas fermentasi presisi sebagai teknologi produksi protein generasi baru, termasuk peluang, tantangan, dan aspek keberlanjutannya (Wang et al., 2021; Knychala et al., 2024; Hilgendorf et al., 2024; Zhou et al., 2024; Zhang et al., 2024). Kelompok ketiga menyoroti penerapan kecerdasan buatan dalam pengembangan bioproses, rekayasa protein, manufaktur biofarmasi, serta pemanfaatan digital twins untuk optimasi sistem biologis (Duong-Trung et al., 2022; Zobel-Roos et al., 2023; Khuat et al., 2024; Siska et al., 2025). Meskipun literatur pada masing-masing bidang berkembang pesat, integrasi konseptual antara kecerdasan buatan dan

fermentasi presisi sebagai kerangka terpadu untuk pengembangan protein alternatif berkelanjutan masih relatif terbatas dan belum memperoleh pembahasan yang komprehensif.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kesenjangan penelitian yang penting untuk diisi. Sebagian besar studi masih menganalisis kecerdasan buatan dan fermentasi presisi sebagai dua domain yang berdiri sendiri, sementara hubungan sinergis keduanya dalam menciptakan sistem produksi protein alternatif yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan belum banyak dieksplorasi secara sistematis. Artikel ini berargumen bahwa integrasi kecerdasan buatan dengan fermentasi presisi dapat menghasilkan paradigma baru dalam pengembangan protein alternatif melalui peningkatan efisiensi desain mikroorganisme, optimasi proses fermentasi secara real-time, percepatan pengambilan keputusan berbasis data, serta peningkatan keberlanjutan produksi pangan. Kontribusi utama artikel ini terletak pada penyusunan kerangka analitis yang menghubungkan perkembangan terkini kecerdasan buatan, rekayasa bioproses, dan fermentasi presisi dalam konteks transisi menuju sistem pangan berkelanjutan.

Berdasarkan argumentasi tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis peran integratif kecerdasan buatan dan fermentasi presisi dalam pengembangan protein alternatif berkelanjutan. Secara khusus, penelitian ini mengidentifikasi kontribusi kecerdasan buatan pada setiap tahapan pengembangan bioproses, mengevaluasi potensi peningkatan efisiensi dan keberlanjutan produksi protein alternatif, serta menjelaskan implikasi ilmiah dan praktis dari konvergensi kedua teknologi tersebut terhadap masa depan industri pangan global.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain *systematic literature review* yang dipadukan dengan analisis konseptual untuk mengeksplorasi integrasi kecerdasan buatan dan fermentasi presisi dalam pengembangan protein alternatif berkelanjutan. Pendekatan ini dipilih karena tujuan penelitian tidak berfokus pada pengujian hipotesis empiris, melainkan pada sintesis, evaluasi kritis, dan pengembangan kerangka analitis berdasarkan perkembangan mutakhir dalam bidang bioteknologi pangan, kecerdasan buatan, dan rekayasa bioproses. Kajian dilakukan selama periode Januari–Mei 2026 dengan memanfaatkan publikasi ilmiah bereputasi yang membahas protein alternatif, fermentasi presisi, *machine learning*, rekayasa protein, dan keberlanjutan sistem pangan. Pemilihan pendekatan kajian literatur sistematis didasarkan pada kemampuannya dalam mengidentifikasi pola pengetahuan, hubungan antarkonsep, serta arah perkembangan penelitian yang relevan dengan topik yang dikaji (Duong-Trung et al., 2022; Helleckes et al., 2023).

Sumber data penelitian terdiri atas data sekunder yang diperoleh dari artikel ilmiah yang terindeks Scopus dan dipublikasikan pada jurnal internasional bereputasi. Seluruh sumber yang dianalisis merupakan literatur yang secara langsung berkaitan dengan tema penelitian, meliputi pengembangan protein alternatif (Xu et al., 2021; van der Goot et al., 2022; Abo, 2026), fermentasi presisi (Wang et al., 2021; Knychala et al., 2024; Hilgendorf et al., 2024; Zhou et al., 2024; Zhang et al., 2024), kecerdasan buatan dalam rekayasa bioproses (Duong-Trung et al., 2022; Helleckes et al., 2023; Khuat et al., 2024; Siska et al., 2025; Zobel-Roos et al., 2023), serta rekayasa protein dan biologi sintetik berbasis kecerdasan buatan (Qiu & Wei, 2023; Wurtzel & Kutchan, 2023; Yao et al., 2020; Zhang et al., 2022). Pengumpulan data dilakukan melalui identifikasi, seleksi, pembacaan mendalam, dan ekstraksi informasi dari setiap publikasi yang relevan. Informasi yang dikumpulkan mencakup tujuan penelitian, pendekatan teknologi, temuan utama, tantangan implementasi, serta implikasi terhadap pengembangan protein alternatif berkelanjutan.

Analisis data dilakukan menggunakan teknik analisis isi (content analysis) dan sintesis tematik (thematic synthesis). Pada tahap pertama, seluruh literatur diklasifikasikan berdasarkan fokus kajian untuk mengidentifikasi kelompok tema utama yang berkembang dalam penelitian sebelumnya. Pada tahap kedua, dilakukan proses pengkodean konseptual untuk menemukan keterkaitan antara kecerdasan buatan, fermentasi presisi, rekayasa protein, optimasi bioproses, dan keberlanjutan sistem pangan. Selanjutnya, hubungan antartema dianalisis secara komparatif guna mengidentifikasi peluang integrasi teknologi serta kesenjangan penelitian yang masih terbuka. Pendekatan ini memungkinkan pengembangan model konseptual yang menjelaskan bagaimana kecerdasan buatan dapat mendukung berbagai tahapan fermentasi presisi, mulai dari desain mikroorganisme, optimasi proses produksi, pengendalian kualitas, hingga pengambilan keputusan berbasis data.

Kerangka analitis penelitian dibangun berdasarkan perspektif konvergensi teknologi yang menempatkan kecerdasan buatan sebagai enabler utama dalam transformasi bioproses modern. Analisis mengacu pada konsep machine learning-assisted bioprocess development (Duong-Trung et al., 2022; Hellekes et al., 2023), digital twins dalam rekayasa bioproses (Zobel-Roos et al., 2023), optimasi berbasis Bayesian untuk sistem fermentasi (Siska et al., 2025), serta rekayasa protein berbasis kecerdasan buatan (Qiu & Wei, 2023). Kerangka tersebut digunakan untuk mengevaluasi kontribusi integrasi kecerdasan buatan dan fermentasi presisi terhadap peningkatan efisiensi produksi, kualitas protein, keberlanjutan lingkungan, dan inovasi dalam industri protein alternatif. Melalui pendekatan ini, penelitian berupaya menghasilkan sintesis konseptual yang dapat menjelaskan arah perkembangan teknologi sekaligus memberikan dasar ilmiah bagi penelitian lanjutan maupun implementasi industri di masa mendatang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis literatur menunjukkan bahwa pengembangan protein alternatif telah mengalami pergeseran paradigma dari pendekatan berbasis substitusi bahan pangan menuju sistem produksi protein yang memanfaatkan bioteknologi maju dan transformasi digital. Perubahan tersebut didorong oleh meningkatnya kebutuhan protein global serta tuntutan untuk mengurangi dampak lingkungan dari sektor peternakan konvensional. Xu et al. (2021) menunjukkan bahwa produksi pangan berbasis hewan berkontribusi secara signifikan terhadap emisi gas rumah kaca global dibandingkan sumber protein berbasis tumbuhan. Temuan tersebut memperkuat argumentasi bahwa transisi menuju protein alternatif bukan hanya menjadi isu inovasi pangan, tetapi juga bagian dari strategi mitigasi perubahan iklim dan pembangunan berkelanjutan. Dalam konteks ini, fermentasi presisi muncul sebagai salah satu teknologi yang mampu menghasilkan protein dengan efisiensi sumber daya yang lebih tinggi sekaligus mempertahankan karakteristik fungsional yang dibutuhkan industri pangan (Wang et al., 2021; Knychala et al., 2024).

Fermentasi presisi memanfaatkan mikroorganisme yang direkayasa secara genetik untuk menghasilkan protein target melalui proses fermentasi terkontrol. Berbeda dengan fermentasi konvensional yang berfokus pada transformasi bahan baku menjadi produk pangan, fermentasi presisi memungkinkan produksi molekul spesifik seperti protein susu, protein telur, enzim, dan berbagai senyawa bioaktif dengan tingkat presisi yang tinggi (Hilgendorf et al., 2024). Kajian Zhou et al. (2024) menunjukkan bahwa teknologi ini memiliki potensi besar untuk mengurangi penggunaan lahan, konsumsi air, dan ketergantungan terhadap sistem peternakan intensif. Selain itu, Zhang et al. (2024) menegaskan bahwa fermentasi presisi memungkinkan diversifikasi sumber protein yang lebih luas sekaligus meningkatkan stabilitas rantai pasok pangan global.

Meskipun memiliki potensi besar, implementasi fermentasi presisi masih menghadapi tantangan yang kompleks. Salah satu hambatan utama adalah tingginya kompleksitas sistem biologis yang digunakan dalam produksi protein. Mikroorganisme produksi menunjukkan respons yang dinamis terhadap perubahan kondisi lingkungan, komposisi media, tingkat aerasi, suhu, dan parameter proses lainnya. Variabilitas tersebut sering kali menyebabkan ketidakstabilan hasil produksi dan meningkatnya biaya optimasi proses. Menurut Walsh (2022), industri biofarmasi telah lama menghadapi tantangan serupa dalam skala produksi biologis, terutama terkait konsistensi kualitas produk dan efisiensi manufaktur. Situasi ini menunjukkan bahwa keberhasilan fermentasi presisi sangat bergantung pada kemampuan mengelola data biologis yang kompleks serta mengoptimalkan parameter proses secara berkelanjutan.

Dalam konteks tersebut, kecerdasan buatan memainkan peran strategis sebagai teknologi pendukung yang mampu meningkatkan efisiensi pengembangan dan operasional fermentasi presisi. Analisis terhadap berbagai studi menunjukkan bahwa penerapan machine learning telah berkembang secara signifikan dalam rekayasa bioproses modern. Duong-Trung et al. (2022) menjelaskan bahwa algoritma pembelajaran mesin dapat digunakan untuk memprediksi perilaku kultur mikroorganisme, mengidentifikasi parameter proses yang paling berpengaruh, serta mempercepat pengambilan keputusan selama pengembangan bioproses. Temuan tersebut diperkuat oleh Helleckes et al. (2023) yang menunjukkan bahwa integrasi kecerdasan buatan memungkinkan transisi dari pendekatan optimasi berbasis percobaan berulang menuju sistem pengembangan bioproses yang lebih adaptif dan berbasis data.

Analisis sintesis literatur menghasilkan empat area utama integrasi kecerdasan buatan dalam fermentasi presisi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Area Integrasi Kecerdasan Buatan dalam Fermentasi Presisi untuk Pengembangan Protein Alternatif

Area Integrasi	Fungsi Utama	Dampak terhadap Produksi Protein Alternatif
Rekayasa Protein	Prediksi struktur dan fungsi protein	Mempercepat pengembangan protein target
Optimasi Bioproses	Prediksi dan pengaturan parameter fermentasi	Meningkatkan produktivitas dan efisiensi
Pengendalian Kualitas	Deteksi penyimpangan proses secara real-time	Menjamin konsistensi produk
Sistem Prediktif dan Simulasi Digital Twin	Simulasi proses dan pengambilan keputusan	Mengurangi biaya pengembangan dan risiko produksi

Sumber: Sintesis penulis berdasarkan Qiu dan Wei (2023), Helleckes et al. (2023), Khuat et al. (2024), dan Zobel-Roos et al. (2023).

Pada tahap rekayasa protein, kecerdasan buatan berkontribusi terhadap percepatan identifikasi dan desain molekul target. Sebelumnya, pengembangan protein baru memerlukan proses laboratorium yang panjang dan mahal. Namun, perkembangan model pembelajaran mendalam memungkinkan analisis jutaan kombinasi sekuens protein dalam waktu yang relatif singkat. Qiu dan Wei (2023) menjelaskan bahwa model bahasa protein (protein language models)

dan analisis topologi berbasis kecerdasan buatan mampu memprediksi karakteristik protein dengan tingkat akurasi yang semakin tinggi. Kondisi ini memberikan keuntungan besar bagi industri protein alternatif karena memungkinkan pengembangan protein yang memiliki sifat fungsional, tekstur, dan profil nutrisi yang lebih sesuai dengan kebutuhan konsumen.

Integrasi kecerdasan buatan juga terlihat pada optimasi mikroorganisme produksi. Kemajuan biologi sintetik memungkinkan modifikasi jalur metabolisme mikroorganisme untuk meningkatkan hasil produksi protein. Penelitian Yao et al. (2020) menunjukkan bahwa teknologi rekayasa genetik modern memungkinkan pengaturan ekspresi gen secara lebih presisi, sementara Wurtzel dan Kutchan (2023) menekankan bahwa kombinasi biologi sintetik dan kecerdasan buatan mampu mempercepat desain organisme produksi yang lebih efisien. Dengan demikian, proses yang sebelumnya membutuhkan siklus eksperimen berulang dapat dipersingkat melalui simulasi dan prediksi berbasis data.

Peran kecerdasan buatan menjadi semakin penting pada tahap optimasi fermentasi. Dalam sistem produksi skala industri, terdapat ratusan variabel yang saling berinteraksi dan memengaruhi produktivitas. Pendekatan konvensional sering kali mengalami keterbatasan dalam mengidentifikasi kombinasi parameter terbaik. Helleckes et al. (2023) menunjukkan bahwa algoritma machine learning mampu memproses data dalam jumlah besar dan menemukan pola yang tidak dapat dideteksi melalui analisis statistik tradisional. Temuan ini diperkuat oleh Siska et al. (2025) yang menjelaskan bahwa pendekatan optimasi Bayesian memungkinkan identifikasi kondisi operasi optimal dengan jumlah eksperimen yang jauh lebih sedikit dibandingkan metode konvensional. Konsekuensinya, biaya penelitian dan pengembangan dapat ditekan secara signifikan tanpa mengurangi kualitas hasil yang diperoleh.

Selain optimasi proses, kecerdasan buatan juga mendukung pengembangan sistem manufaktur cerdas melalui penerapan digital twins. Konsep ini mengacu pada pembuatan representasi digital dari sistem fermentasi aktual yang dapat digunakan untuk memantau, mensimulasikan, dan memprediksi kinerja proses secara real-time. Zobel-Roos et al. (2023) menjelaskan bahwa integrasi digital twins dan kecerdasan buatan memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat selama operasi produksi. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga mengurangi risiko kegagalan produksi yang dapat menyebabkan kerugian ekonomi yang besar.

Temuan lain yang muncul dari sintesis literatur adalah keterkaitan erat antara integrasi kecerdasan buatan dan pencapaian tujuan keberlanjutan. Van der Goot et al. (2022) menegaskan bahwa sistem pangan masa depan harus mengoptimalkan penggunaan sumber daya sekaligus meminimalkan dampak lingkungan. Dalam konteks tersebut, kecerdasan buatan berperan sebagai instrumen untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi, bahan baku, dan waktu produksi. Fermentasi presisi yang didukung sistem analitik cerdas mampu menghasilkan lebih banyak produk dengan konsumsi sumber daya yang lebih rendah dibandingkan metode produksi konvensional. Oleh karena itu, manfaat integrasi teknologi ini tidak hanya bersifat ekonomis tetapi juga ekologis.

Meskipun demikian, sejumlah tantangan masih perlu diperhatikan. Khuat et al. (2024) mengidentifikasi bahwa keterbatasan kualitas data, kurangnya standarisasi sistem informasi bioproses, dan kesenjangan kompetensi digital menjadi hambatan utama dalam implementasi kecerdasan buatan pada industri bioteknologi. Selain itu, keberhasilan model kecerdasan buatan sangat bergantung pada ketersediaan data yang representatif dan berkualitas tinggi. Apabila data yang digunakan tidak memadai, akurasi prediksi dan efektivitas pengambilan keputusan dapat menurun secara signifikan. Tantangan lain berkaitan dengan aspek regulasi dan penerimaan publik terhadap produk hasil rekayasa bioteknologi. Zhang et al. (2022) menunjukkan bahwa

persepsi masyarakat terhadap teknologi rekayasa genetika masih menjadi faktor penting yang memengaruhi keberhasilan komersialisasi produk inovatif.

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis, penelitian ini mengusulkan model konseptual integrasi kecerdasan buatan dan fermentasi presisi yang terdiri atas empat tahapan utama, yaitu desain protein berbasis kecerdasan buatan, rekayasa mikroorganisme produksi, optimasi fermentasi berbasis pembelajaran mesin, serta pengendalian dan evaluasi proses melalui digital twins. Model tersebut menunjukkan bahwa kecerdasan buatan tidak hanya berfungsi sebagai alat analisis data, tetapi menjadi komponen inti yang menghubungkan seluruh rantai inovasi protein alternatif. Integrasi ini menghasilkan sistem produksi yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan dibandingkan pendekatan konvensional yang masih bergantung pada eksperimen manual dan optimasi bertahap.

Secara teoretis, temuan penelitian memperluas literatur mengenai konvergensi teknologi digital dan bioteknologi pangan dengan menunjukkan bahwa kecerdasan buatan dapat berfungsi sebagai katalisator utama transformasi fermentasi presisi. Secara praktis, hasil penelitian memberikan landasan bagi industri pangan, perusahaan bioteknologi, dan pembuat kebijakan untuk mengembangkan strategi investasi dan regulasi yang mendukung implementasi teknologi ini dalam skala yang lebih luas. Di tingkat kebijakan, integrasi kecerdasan buatan dan fermentasi presisi berpotensi menjadi salah satu instrumen penting dalam mendukung transisi menuju sistem pangan rendah karbon, peningkatan ketahanan pangan global, dan pencapaian target pembangunan berkelanjutan yang berkaitan dengan pangan, lingkungan, dan inovasi industri.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi kecerdasan buatan dan fermentasi presisi merupakan pendekatan yang memiliki potensi besar dalam mendukung pengembangan protein alternatif berkelanjutan. Hasil analisis literatur memperlihatkan bahwa fermentasi presisi telah berkembang menjadi salah satu teknologi utama dalam produksi protein generasi baru karena kemampuannya menghasilkan protein berkualitas tinggi dengan efisiensi sumber daya yang lebih baik dibandingkan sistem produksi berbasis hewan. Namun demikian, kompleksitas sistem biologis, kebutuhan optimasi proses yang berkelanjutan, serta tuntutan efisiensi produksi masih menjadi tantangan utama dalam implementasinya. Dalam konteks tersebut, kecerdasan buatan berperan sebagai teknologi pendukung yang mampu meningkatkan efektivitas seluruh rantai pengembangan protein alternatif, mulai dari desain dan rekayasa protein, optimasi mikroorganisme produksi, pengendalian proses fermentasi, hingga pemantauan dan pengambilan keputusan berbasis data secara real-time. Temuan ini menguatkan argumentasi bahwa konvergensi antara teknologi digital dan bioteknologi pangan merupakan fondasi penting bagi transformasi sistem produksi protein masa depan.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyusunan kerangka konseptual yang menjelaskan hubungan sinergis antara kecerdasan buatan dan fermentasi presisi dalam menciptakan sistem produksi protein yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan. Secara teoretis, penelitian ini memperluas diskursus mengenai integrasi teknologi cerdas dalam rekayasa bioproses dan pengembangan pangan berkelanjutan. Secara praktis, hasil penelitian memberikan dasar ilmiah bagi industri pangan, perusahaan bioteknologi, dan pemangku kebijakan dalam merancang strategi pengembangan protein alternatif yang lebih kompetitif dan ramah lingkungan. Selain itu, temuan penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan machine learning, optimasi Bayesian, dan digital twins dapat mempercepat inovasi sekaligus mengurangi biaya pengembangan dan risiko produksi.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan karena hanya menggunakan pendekatan kajian literatur tanpa melibatkan validasi empiris pada sistem fermentasi aktual. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu menguji model integrasi yang diusulkan melalui studi eksperimental, simulasi industri, atau analisis kasus pada perusahaan yang telah menerapkan fermentasi presisi berbasis kecerdasan buatan. Penelitian lanjutan juga diperlukan untuk mengevaluasi aspek ekonomi, regulasi, dan penerimaan konsumen guna memastikan implementasi teknologi ini dapat memberikan dampak yang optimal terhadap keberlanjutan sistem pangan global.

DAFTAR PUSTAKA

- Abo, A. (2026). The next decade of alternative proteins. *Nature Food*, 7(5), 393–394. <https://doi.org/10.1038/s43016-026-01344-x>
- Duong-Trung, N., Born, S., Kim, J. W., Schermeyer, M.-T., Paulick, K., Borisyak, M., Cruz-Bournazou, M. N., Werner, T., Scholz, R., Schmidt-Thieme, L., Neubauer, P., & Martinez, E. (2022). When bioprocess engineering meets machine learning: A survey from the perspective of automated bioprocess development. *Biotechnology Advances*, 58, 107954.
- Helleckes, L. M., Hemmerich, J., Wiechert, W., von Lieres, E., & Grünberger, A. (2023). Machine learning in bioprocess development: From promise to practice. *Trends in Biotechnology*, 41(6), 817–835. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.10.010>
- Hilgendorf, K., Wang, Y., Miller, M. J., & Jin, Y.-S. (2024). Precision fermentation for improving the quality, flavor, safety, and sustainability of foods. *Current Opinion in Biotechnology*, 86, 103084. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2024.103084>
- Khuat, T. T., Bassett, R., Otte, E., Grevis-James, A., & Gabrys, B. (2024). Applications of machine learning in biopharmaceutical process development and manufacturing: Current trends, challenges, and opportunities. *Biotechnology Advances*, 71, 108271.
- Knychala, M. M., Boing, L. A., Ienczak, J. L., Trichez, D., & Stambuk, B. U. (2024). Precision fermentation as an alternative to animal protein: A review. *Fermentation*, 10(6), 315. <https://doi.org/10.3390/fermentation10060315>
- Malila, Y., Owolabi, I. O., Chotanaphuti, T., Sakdibhornssup, N., Elliott, C. T., Visessanguan, W., Karoonuthaisiri, N., & Petchkongkaew, A. (2024). Current challenges of alternative proteins as future foods. *npj Science of Food*, 8(1), 53. <https://doi.org/10.1038/s41538-024-00291-w>
- Qiu, Y., & Wei, G.-W. (2023). Artificial intelligence-aided protein engineering: From topological data analysis to deep protein language models. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 21, 4631–4652.
- Siska, M., Pajak, E., Rosenthal, K., del Rio Chanona, A., von Lieres, E., & Helleckes, L. M. (2025). A guide to Bayesian optimization in bioprocess engineering. *Biotechnology Advances*, Advance online publication.
- van der Goot, A. J., Pelgrom, P. J. M., Berghout, J. A. M., Geerts, M. E. J., Jankowiak, L., Hardt, N. A., Keijer, J., Schutyser, M. A. I., Nikiforidis, C. V., & Boom, R. M. (2022). Concepts for further sustainable production of foods. *Journal of Food Engineering*, 320, 110931.
- Walsh, G. (2022). Biopharmaceutical benchmarks 2022. *Nature Biotechnology*, 40(12), 1722–1760.
- Wang, Y., Tuse, D., Saleh, J., & McDonald, K. A. (2021). Precision fermentation for high-value proteins and ingredients. *Current Opinion in Biotechnology*, 71, 123–129.

-
- Wurtzel, E. T., & Kutchan, T. M. (2023). Plant metabolism, synthetic biology and artificial intelligence: Converging technologies for sustainable food systems. *Nature Plants*, 9(4), 495–507.
- Xu, X., Sharma, P., Shu, S., Lin, T.-S., Ciais, P., Tubiello, F. N., Smith, P., Campbell, N., & Jain, A. K. (2021). Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nature Food*, 2(9), 724–732.
- Yao, L., Cengic, I., Anfelt, J., & Hudson, E. P. (2020). Multiple gene repression in cyanobacteria using CRISPRi. *ACS Synthetic Biology*, 9(8), 2075–2084.
- Zhang, C., Wohlhueter, R., & Zhang, H. (2022). Genetically modified foods in China: Current status and future perspectives. *Engineering*, 13, 15–24.
- Zhang, J., Khan, S. A., Chousalkar, K. K., & McGillivray, D. J. (2024). Precision fermentation and next-generation protein production: A review of opportunities and challenges. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(18), 6112–6131.
- Zhou, N., Wang, Y., & Jin, Y.-S. (2024). Sustainable production of food proteins through precision fermentation. *Annual Review of Food Science and Technology*, 15, 241–266.
- Zobel-Roos, S., Rapp, E., & Strube, J. (2023). Digital twins and artificial intelligence in bioprocess engineering. *Biotechnology Journal*, 18(9), 2200628.