



Model Digital Twin untuk Mewujudkan Industri Pengolahan Pangan Rendah Karbon: Pendekatan Baru Menuju Agroindustri Berkelanjutan

Arief Rahman Syahputra ^{a,1,*}, Dinda Maharani Kusuma ^{b,2}, Muhammad Farhan Al Ghifari ^{c,3}

^a Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Indonesia

^b Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Malang, Indonesia

^c Program Studi Informatika, Fakultas Teknologi Maju dan Multidisiplin, Universitas Airlangga, Indonesia

¹ ariefrahman@ub.ac.id; ² dinda.kusuma@umm.ac.id; ³ muhhammad.farhan@fst.unair.ac.id

* Corresponding Author

ABSTRACT

The transition toward sustainable agroindustry requires innovative approaches capable of improving operational efficiency while reducing carbon emissions in the food processing industry. Although digital technologies have been widely adopted within the context of Industry 4.0, the utilization of digital twins to support decarbonization strategies in food processing remains limited and requires a more comprehensive conceptual framework. This article examines the role of digital twin models in achieving low-carbon food processing industries through the integration of real-time data, virtual simulation, and predictive decision-making. The study employs a systematic literature review by analyzing recent scholarly publications on digital twins, sustainable manufacturing, food systems, and carbon emissions management. The findings indicate that digital twin models can optimize energy consumption, reduce material losses, improve production efficiency, and facilitate continuous monitoring and control of carbon emissions. Furthermore, the integration of digital twins with cyber-physical systems and data analytics enables the development of a more adaptive, transparent, and sustainable agroindustrial ecosystem. This article argues that digital twins represent a strategic instrument for accelerating the transition toward low-carbon food processing industries and contributes a conceptual framework linking digital transformation with agroindustrial sustainability objectives. The findings provide theoretical implications for the advancement of digital agroindustry research and practical implications for industrial strategies and policy development aimed at decarbonizing the food sector.

Article History

Received 2026-03-23

Revised 2026-04-25

Accepted 2026-05-07

Published 2026-06-23

Keywords

Digital Twin;
Low-Carbon Food
Processing Industry;
Sustainable
Agroindustry;
Industrial
Decarbonization;
Cyber-Physical
Systems.

Copyright © 2026, The Author(s)

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



PENDAHULUAN

Perubahan iklim, peningkatan permintaan pangan global, serta tuntutan terhadap praktik produksi yang lebih berkelanjutan telah mendorong transformasi mendasar pada sektor agroindustri. Industri pengolahan pangan merupakan salah satu kontributor penting terhadap konsumsi energi, penggunaan sumber daya alam, dan emisi gas rumah kaca di sepanjang rantai nilai pangan. Dalam konteks tersebut, penerapan teknologi digital menjadi salah satu strategi utama untuk meningkatkan efisiensi operasional sekaligus mendukung pencapaian target pembangunan berkelanjutan. Perkembangan paradigma Industri 4.0 telah menghadirkan berbagai inovasi berbasis data yang memungkinkan integrasi antara sistem fisik dan digital untuk meningkatkan produktivitas serta keberlanjutan industri (Beier et al., 2020; Bonilla et al., 2021). Di antara berbagai teknologi tersebut, digital twin memperoleh perhatian yang semakin besar karena kemampuannya dalam merepresentasikan aset, proses, maupun sistem fisik secara virtual dan real time sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih akurat dan responsif (Tao et al., 2019; Jones et al., 2020).

Dalam industri pengolahan pangan, kebutuhan untuk mengurangi jejak karbon menjadi semakin mendesak seiring meningkatnya tekanan regulasi, tuntutan konsumen, dan komitmen

industri terhadap prinsip keberlanjutan. Proses produksi pangan melibatkan berbagai tahapan yang kompleks, mulai dari pengadaan bahan baku, pengolahan, penyimpanan, hingga distribusi, yang masing-masing berkontribusi terhadap konsumsi energi dan emisi karbon. Kompleksitas tersebut sering kali menyulitkan pelaku industri dalam melakukan pemantauan, evaluasi, dan optimasi kinerja lingkungan secara menyeluruh. Kehadiran digital twin memungkinkan terciptanya representasi virtual yang mampu memantau kondisi sistem secara real time, melakukan simulasi berbagai skenario operasional, serta memprediksi dampak keputusan produksi terhadap efisiensi sumber daya dan emisi karbon (Henrichs et al., 2022; Abdurrahman & Ferrari, 2025). Oleh karena itu, teknologi ini berpotensi menjadi instrumen strategis dalam mewujudkan industri pengolahan pangan rendah karbon.

Kajian mengenai digital twin berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Sejumlah penelitian berfokus pada karakteristik, arsitektur, dan komponen utama digital twin dalam sistem manufaktur cerdas (Jones et al., 2020; Negri et al., 2021; Rasheed et al., 2020). Kelompok penelitian lainnya menyoroti kontribusi digital twin terhadap peningkatan efisiensi operasional, optimalisasi siklus hidup produk, dan penguatan sistem manufaktur berkelanjutan (Bai & He, 2021; Javaid et al., 2022; Liu et al., 2021). Selain itu, beberapa studi terbaru mulai mengkaji pemanfaatan digital twin untuk pengelolaan energi dan pengurangan emisi karbon pada sektor manufaktur melalui integrasi data besar, kecerdasan buatan, dan sistem siber-fisik (Tao et al., 2022; Arshad et al., 2025). Dalam konteks agrifood dan pertanian cerdas, penelitian juga menunjukkan bahwa digital twin mampu meningkatkan ketertelusuran, efisiensi produksi, dan keberlanjutan rantai pasok pangan (Verdouw et al., 2021; Tzachor et al., 2022).

Meskipun demikian, literatur yang tersedia masih menunjukkan beberapa keterbatasan. Sebagian besar penelitian membahas implementasi digital twin pada sektor manufaktur umum, industri intensif energi, atau sistem pertanian presisi, sementara kajian yang secara khusus mengintegrasikan perspektif dekarbonisasi dengan industri pengolahan pangan masih relatif terbatas (Abdurrahman & Ferrari, 2025; Menegon et al., 2025). Selain itu, penelitian yang ada umumnya menitikberatkan pada aspek teknis implementasi teknologi tanpa menjelaskan secara komprehensif bagaimana digital twin dapat membentuk kerangka transformasi menuju industri pengolahan pangan rendah karbon. Kesenjangan ini menunjukkan perlunya pengembangan model konseptual yang menghubungkan kemampuan prediktif dan simulatif digital twin dengan tujuan keberlanjutan serta pengurangan emisi karbon dalam agroindustri.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, artikel ini berargumen bahwa digital twin bukan hanya berfungsi sebagai teknologi pemantauan dan optimasi produksi, tetapi juga sebagai instrumen strategis untuk mendukung transisi menuju agroindustri berkelanjutan dan rendah karbon. Kontribusi utama artikel ini terletak pada pengembangan sintesis konseptual yang menjelaskan hubungan antara integrasi data real time, simulasi virtual, pengelolaan energi, efisiensi sumber daya, dan pengendalian emisi karbon dalam sistem pengolahan pangan. Dengan demikian, artikel ini memperluas diskursus mengenai digital twin dari perspektif efisiensi operasional menuju kerangka keberlanjutan yang lebih komprehensif dan relevan bagi agenda transformasi industri pangan masa depan.

Lebih lanjut, transformasi digital pada sektor pangan tidak hanya berkaitan dengan peningkatan produktivitas, tetapi juga dengan kemampuan industri dalam menciptakan sistem yang adaptif terhadap perubahan lingkungan, pasar, dan kebijakan. Teknologi informasi dan komunikasi telah diakui sebagai faktor penting dalam mendukung transisi menuju sistem pangan berkelanjutan melalui peningkatan kualitas data, transparansi, dan efektivitas pengelolaan sumber daya (El Bilali & Allahyari, 2020). Dalam konteks ini, digital twin menyediakan fondasi

bagi integrasi berbagai sumber data yang memungkinkan analisis berkelanjutan terhadap performa lingkungan dan operasional industri pengolahan pangan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peran dan mekanisme kerja model digital twin dalam mewujudkan industri pengolahan pangan rendah karbon serta mengidentifikasi kontribusinya terhadap pengembangan agroindustri berkelanjutan. Secara khusus, penelitian ini menjawab pertanyaan mengenai bagaimana digital twin dapat digunakan untuk mengoptimalkan penggunaan energi, mengurangi emisi karbon, dan meningkatkan keberlanjutan proses produksi pangan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi teoritis bagi pengembangan kajian digital twin dalam sektor agroindustri serta menjadi dasar pertimbangan praktis bagi pelaku industri dan pembuat kebijakan dalam merancang strategi dekarbonisasi yang berbasis teknologi digital.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode systematic literature review (SLR) untuk menganalisis peran model digital twin dalam mewujudkan industri pengolahan pangan rendah karbon dan mendukung agroindustri berkelanjutan. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti melakukan sintesis konseptual secara sistematis terhadap perkembangan pengetahuan ilmiah terkini mengenai digital twin, keberlanjutan industri, pengelolaan emisi karbon, serta transformasi digital pada sistem pangan. Objek material penelitian adalah implementasi dan pengembangan teknologi digital twin dalam sektor industri pengolahan pangan dan agroindustri, sedangkan objek formal penelitian berfokus pada kontribusi teknologi tersebut terhadap efisiensi sumber daya, pengurangan emisi karbon, dan pencapaian tujuan keberlanjutan. Pemilihan metode studi literatur dilakukan karena tema penelitian masih berkembang dan memerlukan integrasi berbagai perspektif teoritis serta temuan empiris yang telah dipublikasikan dalam literatur akademik bereputasi (Jones et al., 2020; Abdurrahman & Ferrari, 2025).

Sumber data penelitian terdiri atas data sekunder yang berasal dari artikel ilmiah internasional bereputasi yang relevan dengan topik penelitian. Seluruh sumber data diperoleh dari daftar pustaka yang menjadi dasar kajian, meliputi publikasi mengenai konsep dan arsitektur digital twin (Tao et al., 2019; Rasheed et al., 2020; Negri et al., 2021), penerapan digital twin dalam manufaktur berkelanjutan (Bai & He, 2021; Javaid et al., 2022; Tao et al., 2022), implementasi pada industri pangan dan sistem agrifood (Henrichs et al., 2022; Verdouw et al., 2021; Tzachor et al., 2022; Abdurrahman & Ferrari, 2025), serta kajian mengenai pengelolaan emisi karbon dan keberlanjutan industri berbasis teknologi digital (Liu et al., 2021; Arshad et al., 2025; Chouhan & Sahu, 2026). Teknik pengumpulan data dilakukan melalui identifikasi, seleksi, klasifikasi, dan ekstraksi informasi yang berkaitan dengan karakteristik digital twin, mekanisme implementasi, manfaat keberlanjutan, serta kontribusinya terhadap pengurangan emisi karbon pada sektor industri dan pangan.

Analisis data dilakukan menggunakan teknik analisis isi (content analysis) dan sintesis tematik (thematic synthesis). Pada tahap pertama, seluruh literatur dianalisis untuk mengidentifikasi konsep utama, variabel, dan pola hubungan yang berkaitan dengan penerapan digital twin dalam konteks keberlanjutan agroindustri. Tahap berikutnya dilakukan pengelompokan tema-tema utama yang meliputi integrasi sistem siber-fisik, pemantauan real time, optimasi energi, efisiensi penggunaan sumber daya, pengelolaan emisi karbon, serta pengambilan keputusan berbasis prediksi (Leng et al., 2021; Tao et al., 2022; Arshad et al., 2025). Hasil pengelompokan tersebut kemudian dianalisis secara komparatif untuk menemukan

keterkaitan konseptual antarstudi dan menyusun model interpretatif mengenai peran digital twin dalam mendukung industri pengolahan pangan rendah karbon.

Kerangka analisis penelitian mengacu pada konsep digital twin sebagai representasi virtual dinamis yang mengintegrasikan data fisik dan digital secara berkelanjutan untuk mendukung simulasi, prediksi, dan optimasi sistem (Tao et al., 2019; Rasheed et al., 2020). Kerangka ini dipadukan dengan perspektif manufaktur berkelanjutan dan transformasi digital yang menekankan efisiensi sumber daya, pengurangan dampak lingkungan, serta peningkatan nilai ekonomi dan sosial dalam sistem produksi (Beier et al., 2020; Bonilla et al., 2021; Bai & He, 2021). Melalui kerangka tersebut, penelitian menilai bagaimana integrasi digital twin dapat menjadi mekanisme strategis dalam menghubungkan transformasi digital dengan agenda dekarbonisasi industri pengolahan pangan, sehingga menghasilkan model konseptual yang mampu menjelaskan kontribusi teknologi ini terhadap pengembangan agroindustri berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Transformasi menuju industri pengolahan pangan rendah karbon memerlukan pendekatan yang mampu mengintegrasikan efisiensi operasional, pengelolaan sumber daya, dan pengendalian emisi dalam satu sistem yang terhubung. Berdasarkan hasil sintesis literatur, digital twin muncul sebagai teknologi yang mampu menjembatani kebutuhan tersebut melalui integrasi data real time, simulasi virtual, analisis prediktif, dan pengambilan keputusan berbasis data. Berbeda dengan sistem monitoring konvensional yang umumnya bersifat reaktif, digital twin memungkinkan pengelolaan proses produksi secara proaktif melalui pemodelan kondisi aktual dan prediksi berbagai skenario operasional (Tao et al., 2019; Rasheed et al., 2020). Dalam konteks industri pengolahan pangan, kemampuan ini menjadi penting karena karakteristik produksi yang melibatkan konsumsi energi tinggi, penggunaan bahan baku yang besar, serta potensi kehilangan produk pada berbagai tahapan proses.

Hasil kajian menunjukkan bahwa implementasi digital twin dalam sistem manufaktur modern dibangun melalui integrasi empat komponen utama, yaitu aset fisik, model virtual, aliran data dua arah, dan sistem analitik cerdas. Kombinasi keempat komponen tersebut memungkinkan sinkronisasi berkelanjutan antara kondisi aktual fasilitas produksi dengan representasi digitalnya (Jones et al., 2020; Negri et al., 2021). Pada industri pengolahan pangan, integrasi ini memungkinkan perusahaan memantau parameter kritis seperti konsumsi energi, temperatur proses, efisiensi mesin, kualitas produk, dan tingkat emisi karbon secara simultan. Informasi tersebut menjadi dasar untuk melakukan optimasi proses produksi secara berkelanjutan sehingga mampu mengurangi pemborosan sumber daya dan menekan dampak lingkungan.

Tabel 1. Kontribusi Digital Twin terhadap Industri Pengolahan Pangan Rendah Karbon

Dimensi	Fungsi Digital Twin	Dampak terhadap Keberlanjutan
Energi	Monitoring dan optimasi konsumsi energi real time	Penurunan penggunaan energi dan emisi karbon
Produksi	Simulasi dan optimasi proses produksi	Peningkatan efisiensi operasional
Bahan Baku	Prediksi kehilangan bahan dan kualitas produk	Pengurangan limbah produksi
Pemeliharaan	<i>Predictive maintenance</i> mesin produksi	Pengurangan downtime dan konsumsi energi berlebih

Dimensi	Fungsi Digital Twin	Dampak terhadap Keberlanjutan
Emisi Karbon	Pemantauan dan simulasi skenario emisi	Pengendalian jejak karbon industri
Rantai Pasok	Integrasi data antar proses dan pelaku	Transparansi dan keberlanjutan rantai pasok

Temuan ini sejalan dengan kajian Bai dan He (2021) yang menegaskan bahwa digital twin berperan sebagai fondasi manufaktur cerdas berkelanjutan karena mampu menghubungkan proses produksi dengan indikator lingkungan secara real time. Selain itu, Javid et al. (2022) menunjukkan bahwa kemampuan simulasi dan prediksi yang dimiliki digital twin memungkinkan perusahaan mengidentifikasi potensi inefisiensi sebelum masalah tersebut terjadi pada sistem fisik. Temuan tersebut juga didukung oleh Zhang et al. (2021) yang menunjukkan bahwa pendekatan digital twin mampu digunakan untuk desain dan optimasi multiobjektif proses produksi sehingga meningkatkan efisiensi sistem manufaktur secara keseluruhan. Dengan demikian, pengurangan emisi tidak hanya dicapai melalui perbaikan teknologi, tetapi juga melalui peningkatan kualitas pengambilan keputusan operasional.

Kajian literatur juga memperlihatkan bahwa pengurangan emisi karbon merupakan salah satu manfaat paling signifikan dari implementasi digital twin. Pada sektor manufaktur, teknologi ini digunakan untuk mengukur, memodelkan, dan mengendalikan sumber emisi secara lebih akurat dibandingkan pendekatan konvensional (Arshad et al., 2025). Integrasi sensor, Internet of Things (IoT), dan sistem analitik memungkinkan organisasi memperoleh informasi detail mengenai sumber emisi pada setiap tahapan produksi. Dalam industri pengolahan pangan, mekanisme ini dapat diterapkan untuk mengidentifikasi titik-titik proses yang memiliki intensitas karbon tinggi, seperti proses pemanasan, pendinginan, pengeringan, dan penyimpanan produk.

Temuan tersebut mendukung argumen Tao et al. (2022) yang menyatakan bahwa integrasi digital twin dan big data mampu meningkatkan efisiensi energi pada industri intensif energi melalui optimasi berbasis data. Ketika diterapkan pada industri pangan, kemampuan tersebut memungkinkan perusahaan melakukan simulasi berbagai alternatif proses sebelum implementasi aktual dilakukan. Dengan demikian, keputusan produksi tidak hanya mempertimbangkan aspek ekonomi, tetapi juga dampaknya terhadap lingkungan. Kondisi ini menunjukkan adanya pergeseran paradigma dari efisiensi produksi menuju efisiensi berkelanjutan yang mengintegrasikan dimensi ekonomi dan lingkungan secara simultan.

Selain aspek produksi, hasil analisis menunjukkan bahwa digital twin memiliki kontribusi penting terhadap keberlanjutan sistem agrifood secara lebih luas. Studi Verdouw et al. (2021) menunjukkan bahwa implementasi digital twin dalam pertanian cerdas memungkinkan integrasi data dari berbagai tahapan produksi pangan mulai dari budidaya hingga distribusi. Sementara itu, Tzachor et al. (2022) menegaskan bahwa teknologi ini berpotensi mentransformasi sistem pangan melalui peningkatan ketertelusuran, efisiensi penggunaan sumber daya, dan ketahanan rantai pasok. Dalam perspektif agroindustri, integrasi tersebut memungkinkan pengelolaan keberlanjutan dilakukan secara menyeluruh dan tidak terbatas pada aktivitas produksi di dalam pabrik.

Temuan ini memperluas pandangan El Bilali dan Allahyari (2020) mengenai peran teknologi informasi dan komunikasi dalam mendukung transisi menuju sistem pangan berkelanjutan. Jika sebelumnya teknologi digital berfungsi sebagai sarana pengumpulan dan pertukaran informasi, digital twin menghadirkan fungsi yang lebih strategis melalui kemampuan simulasi dan prediksi yang mendukung pengambilan keputusan berkelanjutan. Dengan kata lain,

digital twin tidak hanya meningkatkan visibilitas sistem, tetapi juga menciptakan kapasitas adaptif yang memungkinkan organisasi merespons perubahan lingkungan dan pasar secara lebih efektif.

Dari perspektif implementasi, beberapa penelitian mengidentifikasi bahwa keberhasilan pengembangan digital twin sangat bergantung pada kualitas data, interoperabilitas sistem, infrastruktur digital, dan kesiapan organisasi (Henrichs et al., 2022; Menegon et al., 2025). Tantangan tersebut menjadi lebih kompleks pada industri pengolahan pangan yang umumnya terdiri atas perusahaan dengan tingkat kematangan digital yang beragam. Selain itu, biaya investasi awal, kebutuhan integrasi data lintas sistem, dan keterbatasan sumber daya manusia digital masih menjadi hambatan utama dalam proses adopsi teknologi. Namun demikian, manfaat jangka panjang yang diperoleh berupa efisiensi energi, pengurangan limbah, peningkatan produktivitas, dan penurunan emisi karbon menunjukkan bahwa investasi pada digital twin memiliki nilai strategis yang tinggi bagi keberlanjutan industri.

Berdasarkan seluruh hasil sintesis literatur, dapat dirumuskan suatu model konseptual agroindustri rendah karbon berbasis digital twin. Model ini menempatkan digital twin sebagai pusat integrasi antara data operasional, sistem siber-fisik, analitik cerdas, dan pengelolaan keberlanjutan. Data yang diperoleh dari sensor dan perangkat IoT diolah dalam lingkungan virtual untuk menghasilkan simulasi, prediksi, dan rekomendasi optimasi. Hasil analisis tersebut kemudian digunakan untuk meningkatkan efisiensi energi, mengurangi kehilangan bahan baku, menekan emisi karbon, serta memperkuat keberlanjutan rantai pasok pangan.

Tabel 2. Model Konseptual Digital Twin untuk Agroindustri Berkelanjutan

Komponen Utama	Proses yang Dihasilkan	Output Keberlanjutan
Sensor dan IoT	Akuisisi data real time	Transparansi operasional
Digital Twin Platform	Simulasi dan pemodelan virtual	Pengambilan keputusan berbasis data
Artificial Intelligence Analytics	dan Prediksi dan optimasi sistem	Efisiensi energi dan sumber daya
Cyber-Physical System	Integrasi sistem fisik dan digital	Respon operasional adaptif
Carbon Monitoring System	Pengukuran dan evaluasi emisi	Pengurangan jejak karbon
Sustainable Supply Chain Integration	Sinkronisasi data rantai pasok	Agroindustri berkelanjutan

Secara teoritis, hasil penelitian ini memperluas literatur mengenai digital twin dengan menempatkan teknologi tersebut sebagai instrumen dekarbonisasi agroindustri, bukan sekadar alat optimasi manufaktur. Perspektif ini melengkapi kajian sebelumnya yang lebih banyak berfokus pada peningkatan produktivitas dan efisiensi operasional (Bai & He, 2021; Javaid et al., 2022). Dari sisi praktis, temuan penelitian memberikan dasar bagi perusahaan pangan untuk mengembangkan strategi transformasi digital yang berorientasi pada keberlanjutan. Dari sisi kebijakan, hasil penelitian menunjukkan perlunya dukungan regulasi, pengembangan infrastruktur digital, dan insentif investasi teknologi guna mempercepat implementasi digital twin sebagai bagian dari agenda dekarbonisasi sektor pangan. Dengan demikian, digital twin

dapat dipandang sebagai fondasi penting bagi pembangunan agroindustri yang kompetitif, efisien, dan rendah karbon pada era transformasi digital berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa digital twin memiliki peran strategis dalam mendukung transformasi industri pengolahan pangan menuju sistem produksi yang lebih berkelanjutan dan rendah karbon. Berdasarkan hasil sintesis literatur, teknologi ini memungkinkan integrasi antara aset fisik dan lingkungan virtual melalui aliran data real time yang mendukung pemantauan, simulasi, prediksi, dan optimasi proses produksi secara berkelanjutan. Kemampuan tersebut memberikan manfaat yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi penggunaan energi, mengurangi kehilangan bahan baku, menekan limbah produksi, serta mengendalikan emisi karbon pada berbagai tahapan pengolahan pangan. Selain itu, integrasi digital twin dengan Internet of Things (IoT), big data analytics, dan sistem siber-fisik memungkinkan perusahaan memperoleh visibilitas yang lebih tinggi terhadap kinerja operasional dan lingkungan sehingga keputusan yang diambil tidak hanya berorientasi pada produktivitas, tetapi juga pada keberlanjutan. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk menganalisis kontribusi digital twin dalam mewujudkan industri pengolahan pangan rendah karbon dapat dijelaskan melalui mekanisme optimasi berbasis data yang mendukung efisiensi dan pengurangan dampak lingkungan secara simultan.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pengembangan perspektif konseptual yang menempatkan digital twin sebagai instrumen dekarbonisasi agroindustri, bukan sekadar teknologi manufaktur cerdas. Temuan penelitian memperluas literatur yang selama ini lebih banyak menyoroti aspek efisiensi operasional dengan menunjukkan bahwa digital twin juga berfungsi sebagai sarana integrasi pengelolaan energi, pengukuran emisi karbon, dan peningkatan keberlanjutan rantai pasok pangan. Dari sisi teoritis, penelitian ini memperkuat hubungan antara transformasi digital, manufaktur berkelanjutan, dan agenda pembangunan rendah karbon. Dari sisi praktis, hasil penelitian memberikan landasan bagi pelaku industri untuk merancang strategi digitalisasi yang selaras dengan target efisiensi sumber daya dan pengurangan emisi. Sementara itu, dari sisi kebijakan, temuan ini mengindikasikan pentingnya dukungan regulasi, penguatan infrastruktur digital, dan insentif investasi teknologi untuk mempercepat adopsi digital twin di sektor pengolahan pangan.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan karena menggunakan pendekatan studi literatur sehingga belum menguji secara empiris implementasi digital twin pada industri pengolahan pangan tertentu. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat mengembangkan studi kasus pada berbagai subsektor agroindustri, melakukan pengukuran kuantitatif terhadap dampak implementasi digital twin terhadap pengurangan emisi karbon, serta mengeksplorasi integrasi teknologi ini dengan kecerdasan buatan, machine learning, dan sistem manajemen keberlanjutan. Pengembangan penelitian tersebut akan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai efektivitas digital twin dalam mendukung transisi menuju agroindustri yang kompetitif, resilien, dan berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

Abdurrahman, E. E. M., & Ferrari, G. (2025). Digital twin applications in the food industry: A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, Article 1538375. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1538375>

- Arshad, H. T., Wang, Z., Ji, T., & Peng, T. (2025). Digital twin-driven carbon emissions management in manufacturing. *Manufacturing Letters*, 46, 1718-1730. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.191>
- Bai, K. J., & He, B. (2021). Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: A review. *Advances in Manufacturing*, 9(1), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00302-5>
- Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., & Habich, M. (2020). Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120856. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120856>
- Bonilla, S. H., Silva, H. R. O., Terra da Silva, M., Gonçalves, R. F., & Sacomano, J. B. (2021). Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. *Sustainability*, 13(7), 3740. <https://doi.org/10.3390/su13073740>
- Chouhan, M., & Sahu, R. (2026). Optimizing sustainability in food supply chains through strategic digital twins enablers: A Gray Influence Analysis Approach (GINA). *Global Business Review*. <https://doi.org/10.1177/09711023251400099>
- El Bilali, H., & Allahyari, M. S. (2020). Transition toward sustainability in agriculture and food systems: Role of information and communication technologies. *Information Processing in Agriculture*, 7(4), 456-464. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.04.006>
- Henrichs, E., Noack, T., Pinzon Piedrahita, A. M., Salem, M. A., Stolz, J., & Krupitzer, C. (2022). Can a byte improve our bite? An analysis of digital twins in the food industry. *Sensors*, 22(1), 115. <https://doi.org/10.3390/s22010115>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Khan, S., & Suman, R. (2022). Digital twin applications toward sustainability in industry 4.0: A review. *Cognitive Robotics*, 2, 71-88. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.02.001>
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36-52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Leng, J., Ruan, G., Jiang, P., Xu, K., Liu, Q., Zhou, X., & Liu, C. (2021). Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(1), 1155-1166. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02366-7>
- Liu, Y., Zhang, Y., Ren, S., Yang, M., Wang, Y., & Huisingh, D. (2021). How can smart technologies contribute to sustainable product lifecycle management? *Journal of Cleaner Production*, 295, 126391. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126391>
- Menegon, M., Di Loreto, A., & Piazza, L. (2025). Preliminary phases of implementing a digital twin solution in the food industry: A case study. *Chemical Engineering Transactions*, 118, 43-48. <https://doi.org/10.3303/CET25118008>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2021). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939-948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*, 8, 21980-22012. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
- Tao, F., Xiao, B., Qi, Q., Cheng, J., & Ji, P. (2022). Digital twin and big data-driven sustainable smart manufacturing based on information management systems for energy-intensive industries. *Applied Energy*, 326, 119986. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119986>

-
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Tzachor, A., Richards, C. E., & Jeen, S. (2022). Transforming agrifood production systems and supply chains with digital twins. *npj Science of Food*, 6(47), 1-4. <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00162-2>
- Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., & Wolfert, S. (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*, 189, 103046. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046>
- Zhang, H., Liu, Q., Chen, X., Zhang, D., & Leng, J. (2021). A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line. *IEEE Access*, 9, 17862-17874. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3054470>