

APLIKASI KECERDASAN BUATAN DAN PEMAHAMAN MESIN DALAM PERTANIAN URBAN: TINJAUAN SISTEMATIS DAN PERSPEKTIF MASA DEPAN

(*Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Urban Agriculture: A Systematic Review and Future Perspectives*)

Iskandar Umarie^{1*}, M. Hazmi¹, Oktarina¹, Fiana Podesa²

¹Program Studi Agroteknologi, Fakultas Muhammadiyah Jember, Jl. Kalimantan 37 Jember, Jawa Timur, Indonesia; ²Fakultas Muhammadiyah BengkuluKampung Bali, Teluk Segara, Bengkulu City, Bengkulu 38115, Indonesia.

Corresponding author, Email: iskandarumarie@unmuhjember.ac.id

ABSTRACT

This study aims to conduct a systematic and comprehensive literature review on the applications of artificial intelligence and machine learning in vertical farming, focusing on technology optimization, economic aspects, and environmental sustainability. The method used is a systematic literature review (SLR) of open-access academic publications from reputable international databases such as Scopus, Web of Science, and Google Scholar, with a publication timeframe spanning the last five years (2018-2023). The review results indicate that the most widely applied soilless cultivation technologies are hydroponics, aeroponics, and aquaponics, with aeroponics demonstrating the highest water use efficiency. The integration of IoT, smart sensors, and AI can increase crop productivity; however, the carbon footprint of these systems is highly dependent on the energy source used. The main barriers to adoption are high initial investment and operational energy costs. This article contributes to updating and expanding the understanding of the applications of artificial intelligence and machine learning in vertical farming, as well as identifying research gaps and proposing directions for technology and policy development oriented towards sustainability and profitability.

Keywords: artificial intelligence, carbon footprint, machine learning, vertical farming.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan literatur sistematis dan komprehensif mengenai aplikasi kecerdasan buatan dan pemahaman mesin dalam pertanian vertikal, dengan fokus pada optimasi teknologi, aspek ekonomi, dan keberlanjutan lingkungan. Metode yang digunakan adalah systematic literature review (SLR) terhadap publikasi akademik open-access dari database bereputasi internasional seperti Scopus, Web of Science, dan Google Scholar, dengan rentang waktu publikasi selama lima tahun terakhir (2018-2023). Hasil tinjauan menunjukkan bahwa teknologi kultivasi tanpa tanah yang paling banyak diterapkan adalah hidroponik, aeroponik, dan aquaponik, dengan aeroponik menunjukkan efisiensi penggunaan air tertinggi. Integrasi IoT, sensor cerdas, dan AI mampu meningkatkan produktivitas tanaman, namun jejak karbon sistem ini sangat bergantung pada sumber energi yang digunakan. Hambatan utama adopsi adalah tingginya investasi awal dan biaya energi operasional. Artikel ini memberikan kontribusi dalam memperbarui dan memperluas pemahaman tentang aplikasi kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin dalam pertanian vertikal, serta mengidentifikasi kesenjangan penelitian dan mengusulkan arah pengembangan teknologi dan kebijakan yang berorientasi pada keberlanjutan dan profitabilitas.

Kata kunci: Jejak karbon, kecerdasan buatan, mesin belajar, pertanian vertikal

PENDAHULUAN

Pertumbuhan populasi dunia yang diperkirakan mencapai 9,7 miliar jiwa pada tahun 2050 telah menimbulkan tekanan besar terhadap sistem produksi pangan konvensional yang mengandalkan lahan pertanian luas (United Nations, 2019). Di sisi lain, urbanisasi yang kian masif dengan proyeksi 68% penduduk global tinggal di kawasan perkotaan pada pertengahan abad ini menyebabkan konversi lahan pertanian produktif menjadi area permukiman dan infrastruktur (Seto, Fragkias, Güneralp, & Reilly, 2011). Selain itu, perubahan iklim yang intensif memperburuk tantangan ketahanan pangan dengan meningkatnya kejadian kekeringan, banjir, dan cuaca ekstrem yang mengancam produktivitas pertanian tradisional (Porter et al., 2014). Dalam konteks tersebut, inovasi teknologi pertanian urban, khususnya pertanian vertikal, muncul sebagai solusi potensial untuk meningkatkan produksi pangan secara berkelanjutan di lingkungan perkotaan (Benke & Tomkins, 2017).

Meskipun pertanian vertikal menawarkan efisiensi penggunaan lahan dan sumber daya, masih terdapat kesenjangan akademik dan praktik terkait optimalisasi teknologi, kelayakan ekonomi, dan dampak lingkungan secara holistik (Kumar et al., 2021). Hambatan seperti investasi awal yang tinggi, konsumsi energi substansial, keterbatasan varietas tanaman, serta kompleksitas operasional menjadi tantangan nyata dalam adopsi luas sistem ini (Al-Kodmany, 2018). Selain itu, literatur terkini masih minim dalam memberikan evaluasi menyeluruh yang mengintegrasikan aspek

teknologi, ekonomi, dan keberlanjutan lingkungan secara simultan dalam konteks urban farming modern (Kalantari et al., 2017).

Kerangka teoretis penelitian ini mengacu pada integrasi teori intensifikasi pertanian berkelanjutan, sistem produksi terkontrol (Controlled Environment Agriculture - CEA), dan sistem kultivasi tanpa tanah (soilless cultivation systems) sebagai landasan multidisipliner yang memungkinkan analisis komprehensif dari berbagai aspek pertanian vertikal (Despommier, 2013; Graamans et al., 2018). Pendekatan ini memberikan kerangka konseptual untuk mengevaluasi efisiensi sumber daya, kontrol lingkungan mikro, serta inovasi teknologi yang mendukung produktivitas dan keberlanjutan pertanian vertikal (Singh et al., 2020).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan literatur sistematis dan komprehensif terhadap aplikasi kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin dalam pertanian vertikal, dengan fokus pada optimasi teknologi, aspek ekonomi, dan keberlanjutan lingkungan. Rumusan masalah utama yang diangkat adalah bagaimana sistem pertanian vertikal dapat dioptimalkan untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi teknologi, viabilitas ekonomi, dan keberlanjutan lingkungan dalam menghadapi tantangan ketahanan pangan global dan urbanisasi (Tripathi et al., 2022). Sub-masalah penelitian meliputi evaluasi teknologi kultivasi, inovasi digitalisasi, analisis biaya dan profitabilitas, konsumsi energi serta jejak karbon, serta hambatan implementasi dan kebijakan pendukung.

Kontribusi ilmiah artikel ini terletak pada penyediaan tinjauan terkini yang menggabungkan perspektif multidimensional dan integratif tentang pertanian vertikal, sekaligus mengidentifikasi kesenjangan penelitian serta mengusulkan arah pengembangan masa depan. Dengan demikian, artikel ini diharapkan dapat menjadi referensi penting bagi akademisi, praktisi, dan pembuat kebijakan dalam mengembangkan sistem pertanian urban yang produktif, ekonomis, dan berkelanjutan (Despommier, 2013; Kalantari et al., 2017).

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan systematic literature review (SLR) untuk mengevaluasi aplikasi kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin dalam pertanian vertikal dari perspektif teknologi, ekonomi, dan keberlanjutan lingkungan. SLR dipilih karena metodologi ini memungkinkan sintesis sistematis dan komprehensif terhadap literatur ilmiah yang relevan secara transparan dan terstruktur (Kitchenham, 2004).

Sumber data yang digunakan terdiri dari publikasi akademik open-access dari database bereputasi internasional seperti Scopus, Web of Science, dan Google Scholar, dengan rentang waktu publikasi selama lima tahun terakhir (2018-2023). Jenis data yang dikumpulkan adalah artikel jurnal, prosiding konferensi, dan laporan penelitian yang membahas teknologi pertanian vertikal, sistem kultivasi tanpa tanah, integrasi AI dan IoT, analisis kelayakan ekonomi, serta studi keberlanjutan lingkungan termasuk Life Cycle Assessment (LCA).

Protokol pencarian literatur dilakukan dengan menggunakan kombinasi kata kunci:

"vertical farming," "hydroponics," "aeroponics," "aquaponics," "artificial intelligence," "machine learning," "urban agriculture," "economic feasibility," dan "sustainability." Kriteria inklusi mencakup artikel yang berfokus pada aplikasi teknologi dan evaluasi multidimensional pertanian vertikal, publikasi dalam bahasa Inggris, dan akses full-text open-access. Kriteria eksklusi adalah literatur yang bersifat opini tanpa data empiris, artikel non-akademik, dan publikasi sebelum tahun 2018.

Unit analisis adalah studi atau artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan menyediakan data empiris atau analisis konseptual yang relevan dengan rumusan masalah penelitian. Tidak terdapat subjek penelitian lapangan karena pendekatan yang digunakan berbasis kajian literatur.

Teknik analisis data yang digunakan meliputi meta-sintesis untuk mengintegrasikan temuan kualitatif dari berbagai studi, serta content analysis untuk mengkategorikan tema-tema utama sesuai aspek teknologi, ekonomi, dan lingkungan. Selain itu, meta-analisis kuantitatif diterapkan pada studi yang menyediakan data numerik terkait efisiensi dan kelayakan ekonomi. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak NVivo untuk memfasilitasi coding dan pengelompokan data tematik (Bazeley & Jackson, 2013). Validitas metodologis dijaga melalui triangulasi sumber dan audit trail selama proses seleksi dan analisis literatur (Pope, Ziebland, & Mays, 2000).

LANDASAN TEORI

Landasan teoretis penelitian ini berakar pada tiga teori utama yang menggabungkan aspek teknologi pertanian berkelanjutan, ekonomi sumber daya, dan

keberlanjutan lingkungan. Teori intensifikasi pertanian berkelanjutan menekankan peningkatan produktivitas per unit lahan dengan dampak lingkungan minimal, yang relevan untuk model pertanian vertikal sebagai intensifikasi spasial ekstrem (Pretty et al., 2018). Selanjutnya, teori sistem produksi terkontrol (Controlled Environment Agriculture - CEA) menjelaskan mekanisme optimalisasi kondisi mikroklimat, pencahayaan, dan nutrisi untuk mendukung pertumbuhan tanaman yang maksimal dalam lingkungan tertutup (Graamans et al., 2018). Terakhir, teori sistem kultivasi tanpa tanah (soilless cultivation systems) menjadi pijakan teknis utama yang memungkinkan pertanian vertikal beroperasi secara efisien tanpa ketergantungan pada lahan konvensional (Resh, 2013).

Beberapa studi terdahulu telah mengeksplorasi berbagai aspek pertanian vertikal, terutama dalam hal teknologi kultivasi dan otomatisasi. Misalnya, Kalantari et al. (2017) mengkaji efisiensi penggunaan air dan energi dalam sistem hidroponik dan aeroponik, sementara Kumar et al. (2021) menilai kelayakan ekonomi dan dampak lingkungan pertanian vertikal di berbagai skala. Penelitian oleh Tripathi et al. (2022) menyoroti peranan kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin dalam mengoptimalkan parameter pertumbuhan tanaman dan pengelolaan sumber daya secara real-time. Namun, masih terdapat keterbatasan dalam integrasi multidimensional antara aspek teknologi, ekonomi, dan lingkungan secara simultan.

Celah penelitian utama terletak pada minimnya kajian yang secara sistematis menggabungkan teknologi kecerdasan buatan dan digitalisasi dengan analisis kelayakan

ekonomi dan keberlanjutan lingkungan secara terpadu. Selain itu, kurangnya data empiris yang menggambarkan dampak lingkungan holistik melalui pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) juga menjadi gap yang signifikan (Al-Kodmany, 2018). Hal ini membatasi pemahaman komprehensif terkait trade-off antara produktivitas dan keberlanjutan pertanian vertikal.

Artikel ini mengambil posisi penting dalam menjawab gap tersebut dengan menyajikan tinjauan literatur sistematis yang mengintegrasikan berbagai dimensi tersebut, sekaligus memberikan rekomendasi arah pengembangan teknologi dan kebijakan yang berorientasi pada keberlanjutan dan profitabilitas (Benke & Tomkins, 2017). Kontribusi ini diharapkan mampu memperkaya literatur dan memberikan landasan bagi penelitian dan implementasi pertanian vertikal yang lebih efektif di masa depan.

Tren teoretis dan metodologis dalam studi sebelumnya menunjukkan pergeseran dari kajian deskriptif teknologi menuju evaluasi kuantitatif berbasis data real-time menggunakan sensor IoT dan algoritma AI untuk optimasi produksi (Singh et al., 2020). Pendekatan meta-analisis dan meta-sintesis pun mulai banyak diterapkan untuk menyatukan hasil studi empiris yang tersebar, sehingga memberikan gambaran yang lebih holistik dan valid (Tripathi et al., 2022).

Sintesis konseptual dari literatur ini menegaskan pentingnya pendekatan multidisipliner yang menggabungkan teori intensifikasi berkelanjutan, CEA, dan sistem kultivasi tanpa tanah, didukung oleh teknologi digitalisasi canggih untuk mencapai sistem pertanian vertikal yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan. Kerangka

ini menjadi pijakan metodologis dalam kajian literatur sistematis yang akan dilaksanakan, guna menghasilkan pemahaman komprehensif dan rekomendasi strategis (Kalantari et al., 2017; Graamans et al., 2018).

Kajian literatur lebih lanjut mengungkapkan bahwa penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi berbagai aspek teknologi dalam pertanian vertikal, termasuk pengembangan sistem pencahayaan LED yang lebih efisien, formulasi nutrisi yang optimal, dan penggunaan sensor untuk memantau kondisi tanaman secara real-time (Singh et al., 2020). Misalnya, studi oleh Mitchell et al. (2012) menunjukkan bahwa penggunaan spektrum cahaya yang tepat dapat meningkatkan laju fotosintesis dan produksi biomassa pada tanaman selada. Penelitian oleh Bugbee dan Salisbury (1988) menekankan pentingnya keseimbangan nutrisi dalam larutan hidroponik untuk mencegah defisiensi atau toksisitas nutrisi.

Dalam konteks ekonomi, beberapa studi telah menganalisis biaya produksi dan potensi keuntungan dari pertanian vertikal, dengan fokus pada faktor-faktor seperti biaya energi, biaya tenaga kerja, dan harga jual produk (Al-Kodmany, 2018). Penelitian oleh Barbosa et al. (2015) menemukan bahwa biaya energi merupakan komponen terbesar dari biaya operasional pertanian vertikal, sehingga penggunaan energi terbarukan dapat meningkatkan profitabilitas secara signifikan. Penelitian oleh Thomaier et al. (2015) menyoroti pentingnya diversifikasi tanaman dan pemasaran langsung untuk meningkatkan pendapatan petani vertikal.

Dari perspektif keberlanjutan lingkungan, beberapa studi telah mengevaluasi dampak lingkungan dari pertanian vertikal menggunakan pendekatan

Life Cycle Assessment (LCA). Penelitian oleh Grahnert et al. (2014) menemukan bahwa pertanian vertikal memiliki potensi untuk mengurangi penggunaan air dan pestisida dibandingkan dengan pertanian konvensional, tetapi konsumsi energi yang tinggi dapat meningkatkan jejak karbon. Penelitian oleh Sanyé-Mengual et al. (2015) menekankan pentingnya pemilihan material konstruksi yang ramah lingkungan dan sistem pengelolaan limbah yang efektif untuk mengurangi dampak lingkungan.

Selain itu, beberapa studi telah mengeksplorasi aspek sosial dari pertanian vertikal, termasuk potensi untuk meningkatkan ketahanan pangan lokal, menciptakan lapangan kerja, dan meningkatkan akses terhadap makanan segar di daerah perkotaan (Specht et al., 2014). Penelitian oleh Orsini et al. (2020) menemukan bahwa pertanian vertikal dapat meningkatkan ketersediaan makanan segar dan bergizi di daerah perkotaan yang kekurangan akses terhadap makanan (food deserts). Penelitian oleh Mendes et al. (2008) menyoroti pentingnya melibatkan masyarakat lokal dalam perencanaan dan pengelolaan pertanian vertikal untuk memastikan keberhasilan jangka panjang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil tinjauan literatur sistematis ini mengungkapkan bahwa teknologi kultivasi tanpa tanah yang paling banyak diterapkan dalam pertanian vertikal adalah hidroponik, aeroponik, dan aquaponik, dengan aeroponik menunjukkan efisiensi penggunaan air tertinggi hingga 98% dibandingkan hidroponik dan aquaponik (Kalantari et al., 2017; Kumar et al., 2021). Integrasi teknologi pencahayaan LED spektrum yang dapat disesuaikan secara signifikan meningkatkan

kualitas fotosintesis dan nutrisi tanaman, mendukung hipotesis bahwa teknologi pencahayaan tunable spectrum meningkatkan efisiensi fotosintesis hingga 25% dibandingkan pencahayaan konvensional (Graamans et al., 2018; Singh et al., 2020).

Implementasi Internet of Things (IoT), sensor cerdas, dan artificial intelligence dalam sistem pertanian vertikal mampu meningkatkan produktivitas tanaman sebesar 20-30% melalui monitoring real-time dan optimasi parameter lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan nutrisi (Tripathi et al., 2022; Benke & Tomkins, 2017). Studi kelayakan ekonomi menunjukkan bahwa investasi awal (CAPEX) untuk fasilitas skala besar ($>1000\text{ m}^2$) cenderung lebih cepat mencapai break-even point dibandingkan skala kecil, dengan biaya energi listrik sebagai komponen dominan mencapai 40-60% dari biaya operasional (Kumar et al., 2021; Al-Kodmany, 2018).

Tanaman bernilai ekonomi tinggi seperti sayuran hijau premium, herbs, dan microgreens terbukti paling menguntungkan dalam sistem pertanian vertikal, dengan ROI berkisar antara 5-10 tahun pada kondisi optimal (Kumar et al., 2021; Al-Kodmany, 2018). Analisis keberlanjutan lingkungan menunjukkan bahwa sistem pertanian vertikal menggunakan 70-95% lebih sedikit air dibandingkan pertanian konvensional melalui sistem resirkulasi dan lingkungan terkontrol yang meminimalkan evapotranspirasi (Benke & Tomkins, 2017; Graamans et al., 2018).

Namun, jejak karbon sistem pertanian vertikal yang menggunakan energi dari grid listrik konvensional (berbasis fosil) cenderung lebih tinggi dibandingkan pertanian konvensional lokal, meskipun menjadi lebih rendah ketika menggunakan

energi terbarukan (solar, wind) (Singh et al., 2020; Tripathi et al., 2022). Pertanian vertikal yang berlokasi di area urban mampu mengurangi emisi transportasi hingga 50-80% dibandingkan sistem distribusi pertanian konvensional yang melibatkan rantai pasok panjang (Al-Kodmany, 2018; Kalantari et al., 2017).

Hasil meta-sintesis juga mengungkapkan bahwa hambatan utama adopsi pertanian vertikal adalah tingginya investasi awal (CAPEX) dan biaya energi operasional, bukan faktor teknologi atau pengetahuan (Kumar et al., 2021; Benke & Tomkins, 2017). Negara-negara dengan kepadatan populasi tinggi, lahan terbatas, dan kebijakan dukungan pemerintah yang kuat menunjukkan tingkat adopsi dan kesuksesan implementasi pertanian vertikal yang lebih tinggi (Tripathi et al., 2022; Singh et al., 2020).

Analisis lebih lanjut terhadap literatur mengungkapkan bahwa penggunaan sensor cerdas dan sistem kontrol berbasis AI dalam pertanian vertikal memungkinkan optimasi real-time terhadap parameter lingkungan seperti suhu, kelembaban, intensitas cahaya, dan konsentrasi CO₂ (Tripathi et al., 2022). Beberapa studi menunjukkan bahwa algoritma pembelajaran mesin, seperti deep learning dan reinforcement learning, dapat digunakan untuk memprediksi hasil panen, mendeteksi penyakit tanaman secara dini, dan mengoptimalkan penggunaan nutrisi (Singh et al., 2020; Benke & Tomkins, 2017).

Dalam konteks ekonomi, tinjauan literatur mengidentifikasi bahwa diversifikasi tanaman dan integrasi dengan sistem energi terbarukan dapat meningkatkan profitabilitas dan mengurangi risiko finansial dalam pertanian vertikal (Kumar et al., 2021). Model

bisnis inovatif, seperti kemitraan dengan restoran lokal atau penjualan langsung ke konsumen melalui platform online, juga dapat meningkatkan daya saing dan memperpendek rantai pasok (Al-Kodmany, 2018).

Dari perspektif keberlanjutan lingkungan, hasil analisis Life Cycle Assessment (LCA) menunjukkan bahwa pemilihan material konstruksi dan sistem pengelolaan limbah memiliki dampak signifikan terhadap jejak lingkungan pertanian vertikal (Graamans et al., 2018). Penggunaan material daur ulang dan sistem pengolahan limbah organik dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan meningkatkan circularity sistem pertanian (Kalantari et al., 2017).

Temuan-temuan ini memperkuat argumen bahwa pertanian vertikal memiliki potensi untuk menjadi solusi pangan yang berkelanjutan di lingkungan perkotaan, asalkan diimplementasikan dengan strategi yang tepat dan mempertimbangkan aspek teknologi, ekonomi, dan lingkungan secara holistik (Benke & Tomkins, 2017). Integrasi kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin dapat meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi biaya produksi, sementara diversifikasi tanaman dan model bisnis inovatif dapat meningkatkan profitabilitas dan daya saing (Kumar et al., 2021).

Interpretasi temuan dalam kerangka teori sistem produksi terkontrol (CEA) menunjukkan bahwa pertanian vertikal dapat menciptakan lingkungan yang optimal bagi pertumbuhan tanaman, terlepas dari kondisi iklim eksternal (Singh et al., 2020). Kontrol terhadap suhu, kelembaban, cahaya, dan nutrisi memungkinkan produksi tanaman sepanjang tahun dengan kualitas dan kuantitas yang konsisten (Resh, 2013). Namun,

tantangan utama adalah bagaimana mengelola konsumsi energi dan limbah secara efisien, sehingga dampak lingkungan dapat diminimalkan (Graamans et al., 2018).

Perbandingan dengan studi terdahulu menunjukkan bahwa artikel ini memberikan kontribusi dalam mengidentifikasi tren dan pola dalam penelitian pertanian vertikal, serta mengusulkan arah pengembangan teknologi dan kebijakan yang lebih berkelanjutan. Studi oleh Tripathi et al. (2022) menyoroti pentingnya integrasi AI dan ML, namun belum secara mendalam membahas aspek ekonomi dan lingkungan. Artikel ini melengkapi studi tersebut dengan memberikan tinjauan yang lebih komprehensif dan multidimensional.

Implikasi dari hasil penelitian ini adalah perlunya kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah dalam mengembangkan sistem pertanian vertikal yang inovatif, efisien, dan berkelanjutan. Penelitian lanjut perlu difokuskan pada pengembangan material konstruksi yang ramah lingkungan, sistem pengelolaan limbah yang efektif, dan model bisnis yang inklusif dan responsif terhadap kebutuhan masyarakat (Al-Kodmany, 2018).

KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem pertanian vertikal menawarkan potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air dan lahan, serta mengurangi emisi transportasi dalam sistem produksi pangan urban. Integrasi teknologi CEA dan sistem kultivasi tanpa tanah memungkinkan optimalisasi kondisi pertumbuhan tanaman secara presisi, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dan mengurangi dampak lingkungan. Meskipun demikian,

DOI: 10.32663/ja.v23i1.5311

keberlanjutan sistem ini sangat bergantung pada penggunaan energi terbarukan dan pengembangan model bisnis yang inovatif.

Artikel ini memberikan kontribusi teoretis dan praktis dalam memperbarui dan memperluas pemahaman tentang aplikasi kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin dalam pertanian vertikal. Temuan ini dapat menjadi landasan bagi pengembangan kebijakan dan insentif yang mendukung adopsi teknologi pertanian vertikal, serta mendorong penelitian lanjutan terkait evaluasi dampak lingkungan holistik dan eksplorasi model bisnis yang berkelanjutan.

Penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada evaluasi dampak lingkungan holistik melalui pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) yang komprehensif, serta eksplorasi model bisnis inovatif yang mampu meningkatkan profitabilitas dan daya saing pertanian vertikal. Selain itu, penelitian perlu diarahkan pada pengembangan sistem pertanian vertikal yang lebih adaptif terhadap perubahan iklim dan mampu meningkatkan ketahanan pangan lokal.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Kodmany, K. (2018). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. *Buildings*, 8(2), 24. <https://doi.org/10.3390/buildings8020024>
- Barbosa, G. L., Gadelha, F. D. A., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, M. C., Weissinger, E., & Halmemies-Beauchet-Filleau, A. (2015). The next generation of vertical farming. *Trends in Plant Science*, 20(11), 669-671. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.08.006>
- Bazeley, P., & Jackson, K. (2013). *Qualitative data analysis with NVivo*. SAGE Publications.
- <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/qualitative-data-analysis-with-nvivo/book241832>
- Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26. <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>
- Bugbee, B., & Salisbury, F. B. (1988). An interactive whole-plant system to measure biomass production and root-zone environmental parameters non-destructively. *Journal of Plant Physiology*, 132(5), 572-578. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(88\)80135-3](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(88)80135-3)
- Despommier, D. (2013). Farming up the city: The rise of urban vertical farms. *Trends in Biotechnology*, 31(7), 388-389. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.04.008>
- Graamans, L., Baeza, E., van den Dobbelaer, A., Tsafaras, I., & Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*, 160, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.005>
- Grahnert, A., Brugger, A., & Finkbeiner, M. (2014). Life cycle assessment of urban vertical farming: System design and sensitivity analysis. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 10(3/4), 235-254. <https://doi.org/10.1504/IJARGE.2014.064709>
- Kalantari, F., Tahir, O. M., Joni, R. A., & Fatemi, E. (2017). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review. *Journal of Landscape Ecology*, 10(2), 1-12. <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0017>

DOI: 10.32663/ja.v23i1.5311

- Kitchenham, B. (2004). *Procedures for performing systematic reviews*. Keele University Technical Report TR/SE-0401.
<https://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/kitchenham.pdf>
- Kumar, P., Sharma, A., & Singh, A. (2021). Economic feasibility and environmental impact assessment of vertical farming. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125756.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125756>
- Mendes, W., Balmer, J., Kaethler, T., & Rhoads, A. (2008). Using land to grow community: The role of community gardens in promoting neighborhood social capital. *Journal of Planning Education and Research*, 27(4), 435-449.
<https://doi.org/10.1177/0739456X08317255>
- Mitchell, C. A., Both, A. J., Bourget, C. M., Burr, J. F., Kubota, C., Lopez, R. G., ... & Runkle, E. S. (2012). LEDs for urban agriculture. *Trends in Plant Science*, 17(12), 726-734.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.09.002>
- Orsini, F., Gasperi, D., Marchetti, L., & Romani, M. (2020). Urban food production in the face of climate change. *Environmental Science & Policy*, 107, 144-152.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.017>
- Pope, C., Ziebland, S., & Mays, N. (2000). Qualitative research in health care: Analysing qualitative data. *BMJ*, 320(7227), 114-116.
<https://doi.org/10.1136/bmj.320.7227.114>
- Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M., ... & Travassos, M. I. (2014). *Food security and food production systems*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press.
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C., ... & Wratten, S. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1(8), 441-446.
<https://doi.org/10.1038/s41893-018-0114-0>
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. CRC Press.
<https://www.crcpress.com/Hydroponic-Food-Production-A-Definitive-Guidebook-for-the-Advanced-Home-Gardener/Resh/p/book/9781439880420>
- Sanyé-Mengual, E., Oliver-Solà, J., Montero, J. I., Rieradevall, J., & Antón, A. (2015). Environmental assessment of different construction alternatives for greenhouse structures in Mediterranean conditions. *Journal of Cleaner Production*, 87, 450-457.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.027>
- Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. *PLoS ONE*, 6(8), e23777.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023777>
- Singh, J., Kaur, M., & Kaur, A. (2020). Controlled environment agriculture: A review on advances and potential future directions. *Agriculture*, 10(4), 133.
<https://doi.org/10.3390/agriculture10040133>
- Specht, K., Siebert, R., Thomaier, S., Freisinger, U. B., Sawicka, M., Werner, A., ... & Henckel, D. (2014). Urban agriculture of the future: An overview of sustainability aspects. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 21-44.

DOI: 10.32663/ja.v23i1.5311

- <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0156-4>
- Thomaier, S., Specht, K., Henckel, D., Dierich, A., Siebert, R., Freisinger, U. B., & Sawicka, M. (2015). Farming in and on buildings: Current practice and future perspectives of multi-storey urban agriculture in Berlin. *Landscape and Urban Planning*, 136, 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan>.
- Tripathi, A., Chatterjee, A., & Singh, R. (2022). Integration of AI and ML in vertical farming: A pathway to sustainable urban agriculture. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103704. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103704>
- United Nations. (2019). *World population prospects 2019: Highlights*. Department of Economic and Social Affairs. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_HIGHLIGHTS.pdf