

**Peran Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis dalam Penerapan
Pertanian Cerdas di Era Industri 4.0**

***The Role of Remote Sensing and Geographic Information System in Smart
Farming Industry 4.0***

¹Herlistin Mooy, ²Bogarth K. Watuwaya

¹² SMK-PP Negeri Kupang, Jl. Timor Raya Km.39. Fatuleu, Kab. Kupang
08113863003 - 08113863004, Kode Pos 85371, Indonesia

¹E-mail: Bogarth@pertanian.go.id

ABSTRAK

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi telah menghantar peradaban umat manusia untuk memasuki era industri 4.0. Penerapan teknologi pada bidang pertanian telah memungkinkan upaya peningkatan produktivitas pertanian secara signifikan guna penyediaan pangan bagi populasi penduduk global yang meningkat kian pesat. Keterbatasan faktor produksi pada sektor pertanian seperti keterbatasan lahan, keterbatasan sumber air, maupun perubahan iklim bukanlah penghalang guna mencapai ketahanan pangan. Penerapan teknologi pertanian cerdas berbasis GIS dan penginderaan jauh telah berperan dalam pemecahan masalah disektor pertanian. Artikel ini merupakan ulasan dari beberapa jurnal terdahulu yang memberikan gambaran tentang apasaja peran Sistem Informasi Geografis (SIG) dan aplikasi lain seperti pengeinderaan jauh (Inderaja), sistem pemosisian global (GPS), serta sistem komputasi analisis data lainnya. Penerapan penginderaan jauh dan SIG dalam kombinasinya dengan teknologi digital melalui aplikasi terbaru memungkinkan dapat merealisasi pertanian presisi serta upaya produksi pangan secara berkelanjutan. Dalam segala keterbatasannya, artikel ini diharapkan dapat memberi sedikit gambaran terkait penerapan pertanian presisi serta peluang penelitian lanjutan lainnya.

Kata kunci: Inderaja, SIG, Pertanian Cerdas

ABSTRACT

Advances in science and technology have brought human civilization to enter the industrial era 4.0. The application of technology in agriculture has made it possible to significantly increase agricultural productivity in order to provide food for the rapidly increasing global population. Limited production factors in the agricultural sector such as limited land, limited water sources, and climate change are not barriers to achieving food security. The application of smart agricultural technology based on GIS and remote sensing has played a role in solving problems in the agricultural sector. This article is a review of several previous journals which provide an overview of the roles of Geographic Information Systems (GIS) and other applications such as remote sensing, global positioning systems (GPS), and other data analysis computational systems. The application of GIS and remote sensing in combination with digital

technology through the latest applications makes it possible to realize precision agriculture and sustainable food production efforts. In all its limitations, it is hoped that this article can provide a brief overview regarding the application of precision agriculture and other advanced research opportunities.

Key words: *Remote Sensing, GIS, Smart Farming*

PENDAHULUAN

Tren peningkatan populasi penduduk global terus meningkat. Peningkatan ini diproyeksikan tumbuh mendekati 10 miliar pada tahun 2050, sehingga dibutuhkan 50% bahan makanan lebih banyak dibanding tahun awal tahun 2000 untuk memenuhi kebutuhan global (FAO, 2022). Upaya ini membutuhkan perhatian yang luar biasa karena harus dihadapi bersamaan dengan tantangan perubahan iklim, terbatasnya perluasan lahan subur, dan berkurangnya sumber daya air. Selain itu, produksi pangan yang diantisipasi juga perlu menekankan praktik pengelolaan lahan pertanian berkelanjutan untuk menjaga keberlanjutan kesehatan lahan, melestarikan sumber daya air, dan melindungi keanekaragaman hayati (Alam & Ahamed, 2022).

Ketercapaian ketahanan pangan dapat diraih melalui penerapan teknologi yang dapat memungkinkan penggunaan input pertanian secara efisien dan mengurangi kerugian lingkungan sambil berkontribusi pada peningkatan dan produksi yang berkelanjutan. Saat ini Revolusi Industri 4.0 sangat berperan besar dalam setiap aspek kehidupan. Revolusi industri 4.0 (Morrone et al., 2022) ditandai dengan penggunaan komponen-komponen pendukung berbasis teknologi digital. Beberapa komponen teknologi yang ada dan sedang berkembang pesat adalah sistem informasi geografis (SIG), penginderaan jauh (Inderaja) yang didukung oleh pemanfaatan Global Positioning System (GPS), Kecerdasan Buatan (AI), Analisis Data Besar, dan *Internet of Things (IoT)* (Delgado et al., 2019; Sishodia et al., 2020). Pada sektor pertanian, teknologi penginderaan jauh dan SIG berperan penting dalam pencapaian tujuan melalui berbagai pemanfaatan seperti pemantauan tanaman dan tanah yang efisien serta dikombinasikan dengan potongan informasi lainnya, memberikan wawasan berbasis data untuk pengelolaan usaha pertanian yang ditargetkan atau spesifik lokasi (spasial) sehingga dapat dipastikan peningkatannya (Amiri-Zarandi et al., 2022; Watuwaya et al., 2023; Watuwaya, 2022).

Teknologi inderaja dan SIG telah berdampak pada berbagai domain keilmuan, meliputi ilmu geografi, pertanian, ilmu lingkungan, sumber daya alam, kehutanan, manufaktur, perbankan, layanan kesehatan serta masih banyak lagi (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; Watuwaya, 2022). Beberapa dekade terakhir telah terlihat adanya peningkatan yang signifikan dalam penerapan SIG sebagai alat untuk beragam aplikasi dalam pertanian baik di skala lokal, regional, nasional, atau global. Penerapan aplikasi ini sering melibatkan penggunaan SIG bersama dengan teknologi mitra seperti penginderaan jauh, GPS, dan analisis data menuju pemahaman mendalam tentang pertanian atau wilayah tertentu dan memfasilitasi intervensi atau tindakan protektif untuk tanaman dan/atau lahan.

Data SIG terkait dengan sistem referensi umum, keuntungan lain yang ditawarkan SIG adalah bahwa data yang sama dapat digunakan untuk aplikasi atau tujuan yang berbeda dan juga dapat memasukkan data-data lain dan menggabungkannya dengan data yang sudah ada untuk memperoleh informasi baru. Kontribusi SIG yang kuat dan berdampak dalam berbagai domain dapat dikaitkan dengan penggunaan gabungan SIG dan dua teknologi geospasial utama lainnya: GPS

dan penginderaan jauh. Masing-masing dari ketiga perangkat ini memainkan peran penting dalam informasi spasial (Amiri-Zarandi et al., 2022; Delgado et al., 2019; Quy et al., 2022; Sishodia et al., 2020).

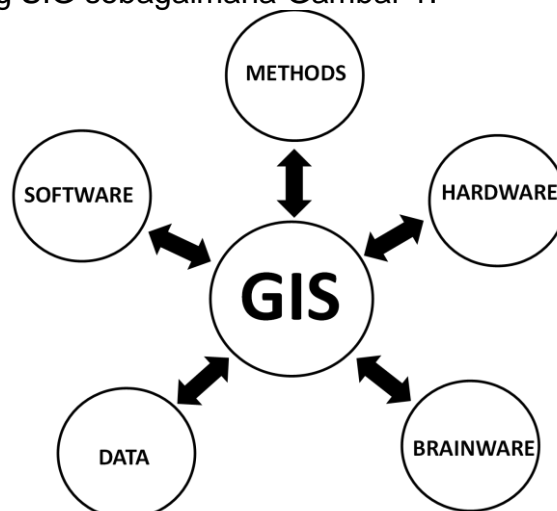
MATERI DAN METODE

Metode deskriptif kuantitatif melalui studi literatur terkait riset pada sektor pertanian dalam aplikasinya menggunakan perangkat SIG dan Inderaja digunakan sebagai dasar pemahaman untuk memperkaya wawasan pembaca. Artikel ini memperkenalkan kepada pembaca terhadap peran Sistem Informasi Geografis dan penginderaan jauh dalam penerapan pertanian cerdas di Era Industri 4.0 dalam mendukung sektor pertanian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem Informasi Geografis (SIG)

Aplikasi SIG dianggap sebagai otak pada pertanian presisi (Mathenge et al., 2022) berdasarkan pada perannya dalam mendukung pengumpulan, penyimpanan, pengambilan, dan analisis data pada fitur dan lokasi, serta kegunaannya sebagai solusi berbasis data, terutama dalam manajemen spesifik lokasi. Informasi dalam peta digital SIG berbeda dari peta konvensional pada umumnya, karena menyimpan beberapa lapisan informasi setiap lapisan memberikan informasi atau peta tentang atribut tertentu seperti survei tanah, curah hujan, status nutrisi, serangan hama, hasil, dan lainnya. Selain itu, SIG menyediakan kemampuan analitik dalam menggunakan alat statistik dan analitik geospasial (Raj et al., 2021; Watuwaya et al., 2023). Komponen pendukung SIG sebagaimana Gambar 1.



Gambar 1 Komponen pendukung Geographic Information System

Sistem Penentuan Posisi Global (*Global Positioning System: GPS*)

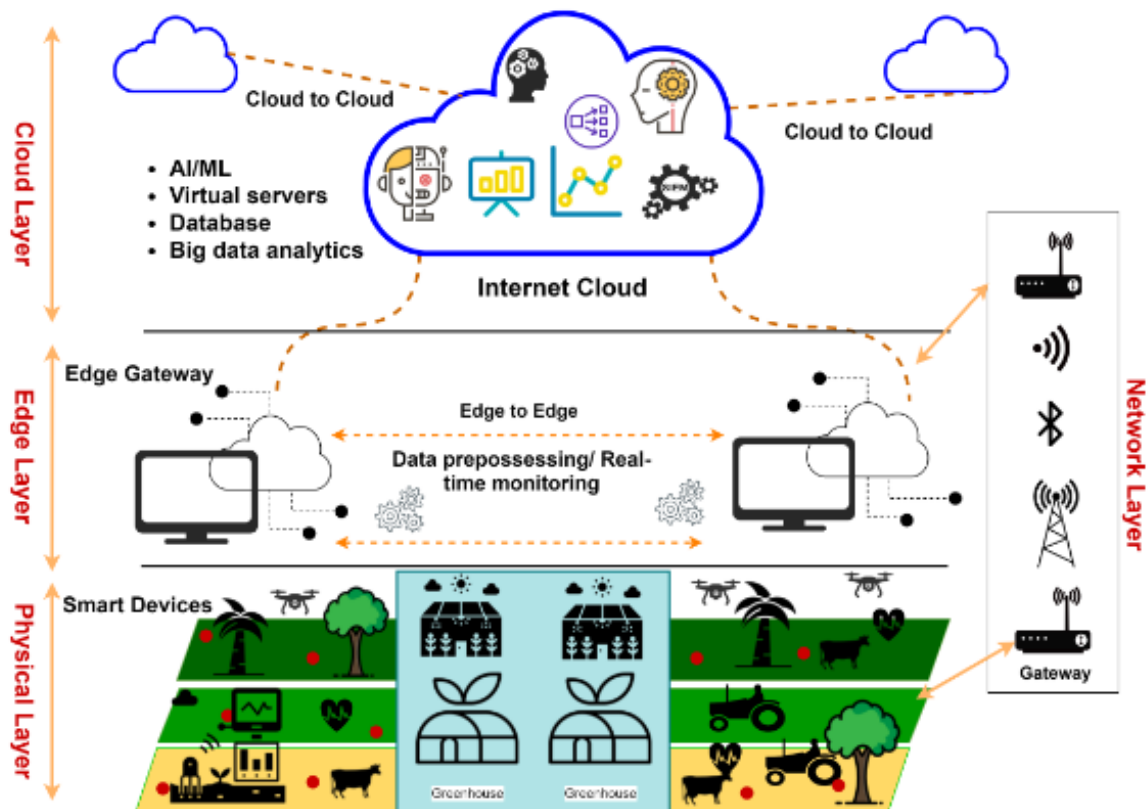
Sistem penentuan posisi/navigasi berbasis jaringan satelit ini memungkinkan penentuan informasi posisi dengan menyediakan garis lintang, garis bujur, dan elevasi suatu lokasi. Informasi lokasi yang dikumpulkan oleh GPS penerima memungkinkan petani dan peneliti untuk mengidentifikasi lahan secara presisi, memetakan batas lahan, badan air, area yang terinfestasi atau bermasalah di lapangan, dan untuk memahami hubungan dengan beberapa atribut lain di dalam dan di luar batas lahan bidang yang diberikan (Ünal et al., 2020; Watuwaya et al., 2022). Dengan data lokasi

yang dikumpulkan oleh GPS penerima, petani juga dapat memetakan masalah yang disebabkan oleh gulma atau penyakit. Data lapangan yang sama dapat digunakan untuk mengendalikan mesin penyemprot pestisida agar pesawat terbang lebih presisi di atas lahan target dan dapat mengurangi penggunaan bahan kimia.

Pemetaan lapangan dengan ketelitian tinggi memungkinkan penerapan nutrisi, pestisida, herbisida, dan air yang spesifik lokasi, sehingga meningkatkan produktivitas dan mengurangi biaya input. Inilah inti dari pertanian cerdas (Prajapati et al., 2023). Ilustrasi pemanfaatan GPS dalam sektor pertanian dapat dilihat pada gambar 2 dibawah.

Penginderaan Jauh (Inderaja)

Penginderaan jauh, dengan beragam metode dan penerapannya di bidang pertanian, telah merevolusi pemantauan tanaman dan intervensi untuk meningkatkan produktivitas pertanian (Khanal et al., 2020; Sishodia et al., 2020). Inderaja, dikombinasikan dengan GPS, SIG, dan alat lainnya sangat penting untuk mengimplementasikan tujuan pertanian presisi. Kombinasi ini sangat penting untuk memungkinkan beberapa aplikasi yang memberikan dasar untuk pengelolaan lahan spesifik lokasi dan termasuk pemetaan tanah, pemantauan pertumbuhan tanaman (Martos et al., 2021; Segarra et al., 2020), estimasi kelembaban dan kesuburan tanah, deteksi biotik seperti serangan hama dan penyakit dan abiotik seperti kekeringan dan banjir, tekanan dan estimasi hasil pertanian (Pascucci et al., 2020; Weiss et al., 2020).



Gambar 2 Pemanfaatan GPS dalam Pertanian secara real time (Yazdinejad et al., 2021)

Peran SIG dalam Pertanian Cerdas

Pertanian digital dianggap sebagai permulaan revolusi keempat. Permulaan pertanian digital telah sepenuhnya mengubah metode bertani berkat kemajuan teknologi geospasial, sensor, kecerdasan buatan, robotika, dan alat dan teknologi lainnya (Dhanaraju et al., 2022; Gokool et al., 2023; Hassan et al., 2022; Quy et al., 2022; Ünal et al., 2020). Kemampuan untuk secara tepat mengidentifikasi masalah di lahan pertanian dan pemantauan serta pengelolaan semua langkah di seluruh rantai nilai pertanian membutuhkan data citra dan non-citra bersama dengan konteks spasial (Fuentes & Chang, 2022; Vrchoťa et al., 2022).

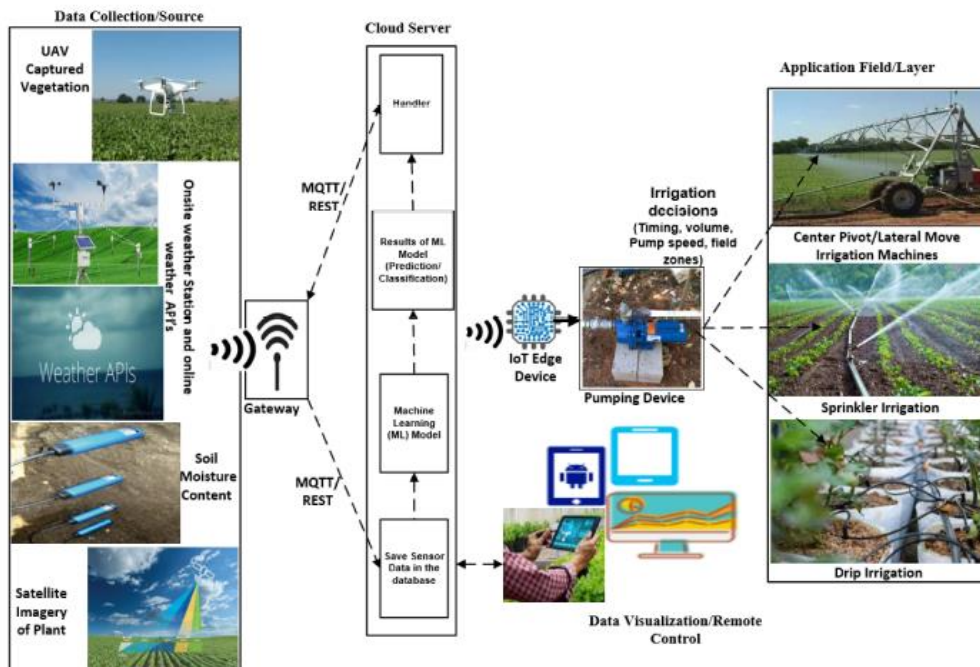
Sistem Informasi Geografis dengan alat komponen dan modul analitiknya, dan data yang dikumpulkan oleh teknologi mitranya seperti penginderaan jarak jauh dan GPS memberikan visualisasi informasi yang intuitif dan jelas untuk pengambilan keputusan berbasis data untuk meningkatkan produktivitas tanaman (Sishodia et al., 2020; Weiss et al., 2020). Sementara SIG telah digunakan untuk aplikasi pertanian selama beberapa kurun waktu, sejumlah aplikasi telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir seiring dengan kemajuan teknologi. Aplikasi yang paling umum digunakan dalam pertanian presisi sebagaimana berikut:

1. Penilaian Kesesuaian dan Perencanaan Penggunaan Lahan

Pada era dimana kita menghadapi tantangan untuk menyiapkan makanan bagi miliaran orang, sementara lahan subur semakin menyusut maka diperlukan optimalisasi penggunaan sumber daya alam untuk memaksimalkan manfaatnya. Aplikasi SIG menyediakan platform yang sangat baik untuk menilai kualitas lahan untuk aplikasi yang sesuai. Pendekatan multi-criteria decision-making (MCDM) berbasis SIG adalah pilihan paling populer di kalangan peneliti untuk perencanaan penggunaan lahan (Mangan et al., 2022; Min Htoo et al., 2022; Watuwaya, 2022). Peneliti menggunakan berbagai fitur yang ditawarkan oleh SIG seperti distribusi jenis tanah, peta tekstur tanah, distribusi air tanah dalam, distribusi kesuburan tanah, distribusi polusi tanah, konduktivitas hidrolis tanah, kemiringan lereng, tekstur tanah, kedalaman air permukaan, dan konduktivitas elektik air tanah, kondisi iklim, topografi, dan data satelit, serta mengidentifikasi berbagai interaksi, ketergantungan, dan dampak dari faktor-faktor yang berinteraksi tersebut terhadap pemanfaatan lahan berkelanjutan (Alam & Ahamed, 2022; Watuwaya, 2022).

2. Pengelolaan Sumber Daya Air

Pengelolaan sumber daya air adalah kunci keberhasilan usaha pertanian. Saat ketersediaan air bersih terbatas dan hanya bergantung pada curah hujan menjadi faktor pembatas pada usaha pertanian (Wanniarachchi & Sarukkalige, 2022). Pemanfaatan SIG dalam penentuan jaringan irigasi merupakan salah satu contoh terbaik untuk memenuhi kebutuhan air. Mekanisme penjadwalan irigasi dan pemilihan langkah-langkah penghematan air selama bulan basah dan bulan kering dapat mendukung intensifikasi pertanian beririgasi termasuk merencanakan tindakan konservasi dan pencegahan kekeringan (Attia et al., 2022; Kumari et al., 2019).



Gambar 3 Bagan arsitektur irigasi berbasis machine learning sebagai dasar pertanian digital (Abioye et al., 2022)

3. Pengelolaan Kesehatan dan Kesuburan Tanah

Kesuburan tanah berbanding lurus dengan produktivitas, hal ini berkaitan dengan kontrol ketersediaan nutrisi dan air untuk tanaman. Kesuburan tanah telah menurun karena berbagai faktor seperti polusi, pertambangan, penggembalaan berlebihan, genangan air, serta penggunaan bahan kimia pertanian yang berlebih, serta erosi. Sangatlah penting untuk menentukan status kesehatan dan kesuburan tanah untuk merencanakan praktek-praktek yang efektif untuk pengelolaan spesifik lokasi atau pertanian presisi (AbdelRahman et al., 2022; Gasmi et al., 2022). Unsur hara makro tanah (N, P, dan K), unsur hara mikro (Zn, Mn, dan Fe), pH, karbon organik tanah, kapasitas menahan air, status erosi, dan kadar air merupakan fitur yang banyak digunakan untuk menilai status kesuburan tanah (Pásztor, 2021). Interpolasi spasial, *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) (Çelik, 2019; Watuwaya, 2022), dan *Ordered Weighted Averaging* (OWA) adalah salah satu teknik analisis geospasial yang dapat memberikan variabilitas spatiotemporal tanah status kesehatan dan fertilitas serta ancaman erosi kepada para pengambil keputusan (Arabameri et al., 2020; Zabihi et al., 2019).

4. Penilaian dan Intervensi Kerusakan Biotik dan Abiotik

Beberapa riset telah melaporkan bahwa kerusakan tanaman biotik, yang disebabkan oleh serangan serangga, jamur, dan hama lainnya, dapat menyebabkan kehilangan hasil hingga 15-70% (Kanwal et al., 2022; Shafi et al., 2019). Hal ini berdampak pada rantai permintaan dan pasokan dan juga mempengaruhi ekonomi petani. Perubahan pola cuaca membuat tanaman mudah terserang hama dan penyakit. Ketersediaan metode perlindungan tanaman cukup bermanfaat untuk mengatasi kesehatan tanaman, namun kurangnya informasi yang akurat memicu kerusakan tak terkendali.

Teknologi SIG memiliki potensi besar untuk pengelolaan hama dan penyakit spesifik lokasi. Penginderaan jauh dan sistem peringatan dini berbasis SIG sangat

bermanfaat bagi petani untuk memperoleh hasil dan mengurangi kerugian ekonomi. (Abou-Shaara et al., 2022) menganjurkan bahwa sistem peramalan hama dan penyakit memungkinkan petani menerapkan tindakan pengendalian pada waktunya untuk mengurangi biaya produksi. Selain sistem peringatan dini, peta kepadatan populasi OPT juga memainkan peran penting dalam mengidentifikasi akar permasalahan dan memberikan saran kepada petani. (Hassan et al., 2022) dalam risetnya melaporkan pemantauan tanaman padi menggunakan foto udara dan GIS untuk penilaian kesehatan tanah untuk meningkatkan hasil panen secara spasial, sedangkan (Kuswidiyanto et al., 2022) dalam artikelnya melaporkan penggunaan *Hyperspectral Remote Sensing* untuk deteksi penyakit berdasarkan algoritma deep learning.

5. Pemantauan Tanaman dan Prediksi Panen

Pemantauan pertumbuhan tanaman, kesehatan, dan prediksi hasil yang akurat atau hampir akurat sangatlah penting tidak hanya untuk memperkirakan pengembalian ekonomi tetapi juga untuk menilai produksi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa metode estimasi hasil tanaman tradisional dapat menyebabkan penilaian yang buruk dan penilaian area tanaman yang tidak akurat (Reynolds et al., 2000). Selain itu, metode ini memerlukan pengumpulan data tanaman dan hasil panen yang memakan waktu, tenaga kerja, dan mahal. Disinilah peran teknologi seperti penginderaan jauh, GPS, dan SIG memberikan andil besar karena dapat digunakan untuk menilai variabilitas temporal dan spasial dari dinamika tanaman dan output hasil. Data geospasial penginderaan jauh yang diperoleh oleh satelit, pesawat terbang, atau kendaraan udara tak berawak (UAV) dapat digunakan untuk mengumpulkan informasi tentang beberapa fitur tanaman dan karakteristik tanah yang mendukung pertumbuhannya sehingga memungkinkan penilaian kesehatan tanaman (Fuentes & Chang, 2022; Gokool et al., 2023).

Teknologi VRT (*Variable Rate Technology*) memungkinkan petani untuk memvariasikan tingkat masukan tanaman seperti pupuk, amandemen tanah, irigasi dan bahan kimia pertanian. Penggunaan teknologi VRT didasarkan pada kenyataan bahwa bidang pertanian umumnya tidak seragam, dan karenanya tidak boleh dikelola secara seragam (Ammoniacci et al., 2021; Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; Vizzari et al., 2019).

6. Precision Livestock Farming

Pengelolaan produksi ternak dengan menggunakan prinsip dan alat pertanian presisi dikenal sebagai peternakan presisi. Kebutuhan akan nutrisi ternak, produksi susu, produksi telur, diagnosis dan pemantauan penyakit, fitur perilaku ternak dan lingkungan fisik, seperti lingkungan mikro termal dan emisi gas polutan, adalah proses yang sesuai untuk menerapkan metode peternakan presisi (Benjamin & Yik, 2019; Rowe et al., 2019; Tzanidakis et al., 2023). Sistem peternakan presisi mencakup pemantauan produksi susu untuk menilai kadar lemak dan mikroba, membantu mengidentifikasi kemungkinan penyakit, serta sistem pemberian makan otomatis baru, sistem penimbangan, robot pembersih, pendorong pakan dan kemungkinan-kemungkinan lainnya (Morrone et al., 2022; Unal et al., 2020) bahkan penentuan kesesuaian lahan bagi budidaya tanaman pakan ternak (Watuwaya, 2022)

Pertanian Presisi

Pertanian Presisi sering juga disebut sebagai pengelolaan tanaman spesifik lokasi, adalah penerapan teknologi dan prinsip untuk mengelola variabilitas spasial

dan temporal yang terkait dengan semua aspek produksi pertanian mendefinisikannya sebagai sistem yang mengintegrasikan informasi dengan produksi tanaman yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan profitabilitas produksi pertanian jangka panjang, spesifik lokasi, dan keseluruhan sambil meminimalkan dampak yang tidak diinginkan pada ekosistem (Elsharkawy et al., 2022; Mukhamedova et al., 2022).

Sasaran operasional dari pertanian presisi mencakup pengelolaan input yang lebih baik seperti benih, pupuk, pestisida, herbisida, dan air dengan menggunakan jumlah input yang tepat di tempat yang tepat, dan pada waktu yang tepat. Beberapa alat dan sistem penting seperti GPS, SIG, dan Inderaja diperlukan untuk pengumpulan informasi geospasial yang tepat waktu tentang kebutuhan tanah-tanaman-ternak menuju wawasan pertambangan diikuti dengan memanfaatkan wawasan tersebut untuk meresepkan dan menerapkan perawatan spesifik lokasi untuk meningkatkan produktivitas pertanian sementara berkontribusi terhadap keberlanjutan dan melindungi lingkungan (Zakarya et al., 2021).

Smart Farming atau Pertanian Presisi memiliki potensi untuk meningkatkan ketahanan pangan global dan mengurangi dampak pertanian terhadap lingkungan, namun untuk dapat mewujudkan potensi ini, teknologi ini perlu dilindungi dari serangan *cyber crime* di dunia maya (Yazdinejad et al., 2021) selain itu, dibutuhkan koneksi internet yang tidak terbatas atau terus menerus agar berhasil. Seperti yang disebutkan sebelumnya, pertanian pintar memanfaatkan teknologi tinggi yang membutuhkan keterampilan dan ketelitian teknis untuk membuatnya sukses. Ini membutuhkan pemahaman tentang robotika dan TIK. Dibeberapa negara masih banyak petani tidak memiliki keterampilan ini. Bahkan menemukan seseorang dengan kemampuan teknis ini masih sulit atau bahkan mahal. Keuntungan dan Kerugian dari Pertanian Cerdas, ini bisa menjadi faktor penghambat yang menghalangi banyak petani yang ingin mengadopsinya. Beberapa keterbatasan dalam penerapan pertanian cerdas ini terus diminimalisir melalui serangkaian penelitian dan ujicoba sehingga cita – cita utama untuk memenuhi kebutuhan pangan dapat terpenuhi dengan input yang lebih rendah.

KESIMPULAN

Pada era industri 4.0 penerapan pertanian cerdas ditandai dengan penggunaan komponen-komponen pendukung berbasis teknologi digital. Beberapa komponen teknologi yang ada dan sedang berkembang pesat adalah sistem informasi geografis (SIG), penginderaan jauh (Inderaja) yang didukung oleh pemanfaatan Global Positioning System (GPS), Kecerdasan Buatan (AI), Analisis Data Besar, dan *Internet of Things (IoT)*. Berbagai macam keunggulan ini dapat mendukung keberhasilan usaha pertanian dalam memenuhi kebutuhan hidup manusia. Beberapa kelemahan dalam penggunaan teknologi ini terus dikembangkan guna meningkatkan keamanan dalam penggunaannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel Rahman, M. A. E., Metwaly, M. M., Afifi, A. A., D'Antonio, P., & Scopa, A. (2022). Assessment of Soil Fertility Status under Soil Degradation Rate Using Geomatics in West Nile Delta. *Land*, 11(8), 1256. <https://doi.org/10.3390/land11081256>
- Abioye, E. A., Hensel, O., Esau, T. J., Elijah, O., Abidin, M. S. Z., Ayobami, A. S.,

- Yerima, O., & Nasirahmadi, A. (2022). Precision Irrigation Management Using Machine Learning and Digital Farming Solutions. *AgriEngineering*, 4(1), 70–103. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4010006>
- Abou-Shaara, H. F., Amiri, E., & Parys, K. A. (2022). Tracking the Effects of Climate Change on the Distribution of *Plecia nearctica* (Diptera, Bibionidae) in the USA Using MaxEnt and GIS. *Diversity*, 14(8), 690. <https://doi.org/10.3390/d14080690>
- Alam, K. F., & Ahamed, T. (2022). Assessment of Land Use Land Cover Changes for Predicting Vulnerable Agricultural Lands in River Basins of Bangladesh Using Remote Sensing and a Fuzzy Expert System. *Remote Sensing*, 14(21), 5582. <https://doi.org/10.3390/rs14215582>
- Amiri-Zarandi, M., Dara, R. A., Duncan, E., & Fraser, E. D. G. (2022). Big Data Privacy in Smart Farming: A Review. *Sustainability*, 14(15), 9120. <https://doi.org/10.3390/su14159120>
- Ammoniacci, M., Kartsiotis, S.-P., Perria, R., & Storchi, P. (2021). State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture. *Agriculture*, 11(3), 201. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030201>
- Arabameri, A., Tiefenbacher, J. P., Blaschke, T., Pradhan, B., & Tien Bui, D. (2020). Morphometric Analysis for Soil Erosion Susceptibility Mapping Using Novel GIS-Based Ensemble Model. *Remote Sensing*, 12(5), 874. <https://doi.org/10.3390/rs12050874>
- Attia, A., Qureshi, A. S., Kane, A. M., Alikhanov, B., Kheir, A. M. S., Ullah, H., Datta, A., & Samasse, K. (2022). Selection of Potential Sites for Promoting Small-Scale Irrigation across Mali Using Remote Sensing and GIS. *Sustainability*, 14(19), 12040. <https://doi.org/10.3390/su141912040>
- Benjamin, M., & Yik, S. (2019). Precision Livestock Farming in Swine Welfare: A Review for Swine Practitioners. *Animals*, 9(4), 133. <https://doi.org/10.3390/ani9040133>
- Çelik, R. (2019). Evaluation of Groundwater Potential by GIS-Based Multicriteria Decision Making as a Spatial Prediction Tool: Case Study in the Tigris River Batman-Hasankeyf Sub-Basin, Turkey. *Water*, 11(12), 2630. <https://doi.org/10.3390/w11122630>
- Delgado, J. A., Short, N. M., Roberts, D. P., & Vandenberg, B. (2019). Big Data Analysis for Sustainable Agriculture on a Geospatial Cloud Framework. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00054>
- Dhanaraju, M., Chenniappan, P., Ramalingam, K., Pazhanivelan, S., & Kaliaperumal, R. (2022). Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture. *Agriculture*, 12(10), 1745. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>
- Elsharkawy, M. M., Sheta, A. E. A. S., D'Antonio, P., Abdelwahed, M. S., & Scopa, A. (2022). Tool for the Establishment of Agro-Management Zones Using GIS Techniques for Precision Farming in Egypt. *Sustainability*, 14(9), 5437. <https://doi.org/10.3390/su14095437>
- FAO UN. (2022). *The future of food and agriculture – Drivers and triggers for transformation*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0959en>
- Fuentes, S., & Chang, J. (2022). Methodologies Used in Remote Sensing Data Analysis and Remote Sensors for Precision Agriculture. *Sensors*, 22(20), 7898. <https://doi.org/10.3390/s22207898>
- Gasmi, A., Gomez, C., Chehbouni, A., Dhiba, D., & El Gharous, M. (2022). Using

- PRISMA Hyperspectral Satellite Imagery and GIS Approaches for Soil Fertility Mapping (FertiMap) in Northern Morocco. *Remote Sensing*, 14(16), 4080. <https://doi.org/10.3390/rs14164080>
- Gokool, S., Mahomed, M., Kunz, R., Clulow, A., Sibanda, M., Naiken, V., Chetty, K., & Mabhaudhi, T. (2023). Crop Monitoring in Smallholder Farms Using Unmanned Aerial Vehicles to Facilitate Precision Agriculture Practices: A Scoping Review and Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 15(4), 3557. <https://doi.org/10.3390/su15043557>
- Hassan, S. I., Alam, M. M., Zia, M. Y. I., Rashid, M., Illahi, U., & Su'ud, M. M. (2022). Rice Crop Counting Using Aerial Imagery and GIS for the Assessment of Soil Health to Increase Crop Yield. *Sensors*, 22(21), 8567. <https://doi.org/10.3390/s22218567>
- Kanwal, S., Khan, M. A., Saleem, S., Tahir, M. N., Muntaha, S. T., Samreen, T., Javed, S., Nazir, M. Z., & Shahzad, B. (2022). Integration of Precision Agriculture Techniques for Pest Management. *The 1st International Precision Agriculture Pakistan Conference 2022 (PAPC 2022)—Change the Culture of Agriculture*, 19. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022023019>
- Khanal, S., KC, K., Fulton, J. P., Shearer, S., & Ozkan, E. (2020). Remote Sensing in Agriculture—Accomplishments, Limitations, and Opportunities. *Remote Sensing*, 12(22), 3783. <https://doi.org/10.3390/rs12223783>
- Kumari, M. K. N., Sakai, K., Kimura, S., Yuge, K., & Gunarathna, M. H. J. P. (2019). Classification of Groundwater Suitability for Irrigation in the Ulagalla Tank Cascade Landscape by GIS and the Analytic Hierarchy Process. *Agronomy*, 9(7), 351. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070351>
- Kuswidiyanto, L. W., Noh, H.-H., & Han, X. (2022). Plant Disease Diagnosis Using Deep Learning Based on Aerial Hyperspectral Images: A Review. *Remote Sensing*, 14(23), 6031. <https://doi.org/10.3390/rs14236031>
- Mangan, P., Pandi, D., Haq, M. A., Sinha, A., Nagarajan, R., Dasani, T., Keshta, I., & Alshehri, M. (2022). Analytic Hierarchy Process Based Land Suitability for Organic Farming in the Arid Region. *Sustainability*, 14(8), 4542. <https://doi.org/10.3390/su14084542>
- Martos, V., Ahmad, A., Cartujo, P., & Ordoñez, J. (2021). Ensuring Agricultural Sustainability through Remote Sensing in the Era of Agriculture 5.0. *Applied Sciences*, 11(13), 5911. <https://doi.org/10.3390/app11135911>
- Mathenge, M., Sonneveld, B. G. J. S., & Broerse, J. E. W. (2022). Application of GIS in Agriculture in Promoting Evidence-Informed Decision Making for Improving Agriculture Sustainability: A Systematic Review. *Sustainability*, 14(16), 9974. <https://doi.org/10.3390/su14169974>
- Min Htoo, T., Yabar, H., & Mizunoya, T. (2022). GIS-Based Cluster and Suitability Analysis of Crop Residues: A Case Study in Yangon Region, Myanmar. *Applied Sciences*, 12(22), 11822. <https://doi.org/10.3390/app122211822>
- Morrone, S., Dimauro, C., Gambella, F., & Cappai, M. G. (2022). Industry 4.0 and Precision Livestock Farming (PLF): An up to Date Overview across Animal Productions. *Sensors*, 22(12), 4319. <https://doi.org/10.3390/s22124319>
- Mukhamedova, K. R., Cherepkova, N. P., Korotkov, A. V., Dugasheva, Z. B., & Tvaronavičienė, M. (2022). Digitalisation of Agricultural Production for Precision Farming: A Case Study. *Sustainability*, 14(22), 14802. <https://doi.org/10.3390/su142214802>
- Pascucci, S., Pignatti, S., Casa, R., Darvishzadeh, R., & Huang, W. (2020). Special Issue “Hyperspectral Remote Sensing of Agriculture and Vegetation.” *Remote*

- Sensing*, 12(21), 3665. <https://doi.org/10.3390/rs12213665>
- Pásztor, L. (2021). Advanced GIS and RS Applications for Soil and Land Degradation Assessment and Mapping. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), 128. <https://doi.org/10.3390/ijgi10030128>
- Prajapati, J. B., Barad, R., Patel, M. B., Saini, K., Prajapati, D., & Engineer, P. (2023). *Smart Farming Ingredients* (pp. 31–49). <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-6413-7.ch003>
- Quy, V. K., Hau, N. Van, Anh, D. Van, Quy, N. M., Ban, N. T., Lanza, S., Randazzo, G., & Muzirafuti, A. (2022). IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges. *Applied Sciences*, 12(7), 3396. <https://doi.org/10.3390/app12073396>
- Raj, E. F. I., Appadurai, M., & Athiappan, K. (2021). *Precision Farming in Modern Agriculture* (pp. 61–87). https://doi.org/10.1007/978-981-16-6124-2_4
- Reynolds, C. A., Yitayew, M., Slack, D. C., Hutchinson, C. F., Huete, A., & Petersen, M. S. (2000). Estimating crop yields and production by integrating the FAO Crop Specific Water Balance model with real-time satellite data and ground-based ancillary data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(18), 3487–3508. <https://doi.org/10.1080/014311600750037516>
- Rowe, Dawkins, & Gebhardt-Henrich. (2019). A Systematic Review of Precision Livestock Farming in the Poultry Sector: Is Technology Focussed on Improving Bird Welfare? *Animals*, 9(9), 614. <https://doi.org/10.3390/ani9090614>
- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy*, 10(2), 207. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>
- Segarra, J., Buchailot, M. L., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2020). Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. *Agronomy*, 10(5), 641. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050641>
- Shafi, U., Mumtaz, R., García-Nieto, J., Hassan, S. A., Zaidi, S. A. R., & Iqbal, N. (2019). Precision Agriculture Techniques and Practices: From Considerations to Applications. *Sensors*, 19(17), 3796. <https://doi.org/10.3390/s19173796>
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Tzanidakis, C., Tzamaloukas, O., Simitzis, P., & Panagakis, P. (2023). Precision Livestock Farming Applications (PLF) for Grazing Animals. *Agriculture*, 13(2), 288. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020288>
- Ünal, İ., Kabaş, Ö., & Sözer, S. (2020). Real-Time Electrical Resistivity Measurement and Mapping Platform of the Soils with an Autonomous Robot for Precision Farming Applications. *Sensors*, 20(1), 251. <https://doi.org/10.3390/s20010251>
- Vizzari, M., Santaga, F., & Benincasa, P. (2019). Sentinel 2-Based Nitrogen VRT Fertilization in Wheat: Comparison between Traditional and Simple Precision Practices. *Agronomy*, 9(6), 278. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060278>
- Vrchota, J., Pech, M., & Švepešová, I. (2022). Precision Agriculture Technologies for Crop and Livestock Production in the Czech Republic. *Agriculture*, 12(8), 1080. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081080>
- Wanniarachchi, S., & Sarukkalige, R. (2022). A Review on Evapotranspiration Estimation in Agricultural Water Management: Past, Present, and Future. *Hydrology*, 9(7), 123. <https://doi.org/10.3390/hydrology9070123>
- Watuwaya, B. K., Syamsu, J. A., Budiman, & Useng, D. (2023). *The role of remote sensing and GIS to support grassland identification. case study: East Sumba*

- Regency, East Nusa Tenggara Province, Indonesia. 110004. <https://doi.org/10.1063/5.0144198>
- Watuwaya, Bogarth K. (2022). *Analisis Spasial dan Kesesuaian Lahan Padang Rumput Alam bagi Introduksi Lamtoro Tarramba (Leucaena leucocephala cv tarramba) di Kabupaten Sumba Timur Provinsi Nusa Tenggara Timur* [Hasanuddin]. <http://repository.unhas.ac.id/id/eprint/18339/>
- Watuwaya, Bogarth K., Syamsu, J. A., Budiman, B., & Useng, D. (2022). Forage productivity in native grasslands of Haharu Sub-district, East Sumba District, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 23(3). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230321>
- Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>
- Yazdinejad, A., Zolfaghari, B., Azmoodeh, A., Dehghantanha, A., Karimipour, H., Fraser, E., Green, A. G., Russell, C., & Duncan, E. (2021). A Review on Security of Smart Farming and Precision Agriculture: Security Aspects, Attacks, Threats and Countermeasures. *Applied Sciences*, 11(16), 7518. <https://doi.org/10.3390/app11167518>
- Zabihi, H., Alizadeh, M., Kibet Langat, P., Karami, M., Shahabi, H., Ahmad, A., Nor Said, M., & Lee, S. (2019). GIS Multi-Criteria Analysis by Ordered Weighted Averaging (OWA): Toward an Integrated Citrus Management Strategy. *Sustainability*, 11(4), 1009. <https://doi.org/10.3390/su11041009>
- Zakarya, Y. M., Metwaly, M. M., AbdelRahman, M. A. E., Metwalli, M. R., & Koubouris, G. (2021). Optimized Land Use through Integrated Land Suitability and GIS Approach in West El-Minia Governorate, Upper Egypt. *Sustainability*, 13(21), 12236. <https://doi.org/10.3390/su132112236>