



Tinjauan Teoretis Pemanfaatan Teknologi Drone Dalam Pemantauan Kesehatan Tanaman Pada Pertanian Presisi

Theoretical Review on the Utilization of Drone Technology in Plant Health Monitoring for Precision Agriculture

**Parwito¹⁾; Lalan Darham Daulay²⁾; Eko Sumartono³⁾; Hendri Bustamam⁴⁾;
Ismail Arifin⁵⁾**

¹⁾Progam Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Ratu Samban, Bengkulu, Indonesia

²⁾Progam Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Prof. Dr. Hazairin,SH, Bengkulu, Indonesia

³⁾Progam Studi Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Dehasen Bengkulu, Indonesia

⁴⁾Progam Studi Perlindungan Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Indonesia

⁵⁾Progam Studi Rekam Medis dan Informasi Kesehatan, Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Sapta Bakti, Bengkulu, Indonesia

*Email: parwitougm@gmail.com

How to Cite :

Parwito., Daulay, L. D., Sumartono, E., Bustamam, H., Arifin, I. (2025). Tinjauan Teoretis Pemanfaatan Teknologi Drone Dalam Pemantauan Kesehatan Tanaman Pada Pertanian Presisi. *Sinta Journal* ,6 (2), 401–414 DOI: <https://doi.org/10.37638/sinta.6.2.401–414>

ABSTRAK

ARTICLE HISTORY

Received [14 October 2025]

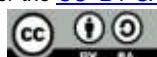
Revised [15 November 2025]

Accepted [02 December 2025]

KEYWORDS

drone technology, precision agriculture, plant monitoring, vegetation indices, plant health

This is an open access article under the [CC-BY-SA](#) license



Pertanian presisi merupakan pendekatan modern yang mengintegrasikan teknologi informasi untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi dalam sektor pertanian. Teknologi drone atau wahana udara nir awak telah menjadi instrumen penting dalam pemantauan kesehatan tanaman secara real-time dengan tingkat akurasi yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara teoretis pemanfaatan teknologi drone dalam pemantauan kesehatan tanaman pada sistem pertanian presisi. Metode yang digunakan adalah kajian pustaka dengan menganalisis berbagai literatur ilmiah terkait aplikasi drone, sensor multispektral, pengolahan citra, dan interpretasi data kesehatan tanaman. Hasil analisis menunjukkan bahwa teknologi drone yang dilengkapi dengan sensor multispektral dan hiperspektral mampu mendeteksi stres tanaman, defisiensi nutrisi, serangan hama dan penyakit pada tahap awal dengan akurasi mencapai 85-95 persen. Pengolahan data menggunakan algoritma machine learning dan indeks vegetasi seperti NDVI, NDRE, dan GNDVI memberikan informasi spasial yang presisi untuk pengambilan keputusan. Implementasi teknologi ini dapat meningkatkan efisiensi penggunaan input pertanian hingga 30 persen dan produktivitas hasil panen hingga 20 persen. Kesimpulan dari

kajian ini adalah teknologi drone memiliki potensi besar dalam transformasi praktik pertanian menuju sistem yang lebih presisi, berkelanjutan, dan produktif.

ABSTRACT

Precision agriculture is a modern approach that integrates information technology to improve productivity and efficiency in the agricultural sector. Drone technology, or unmanned aerial vehicles, has become an essential tool for real-time plant health monitoring with high accuracy. This study aims to theoretically analyze the utilization of drone technology in plant health monitoring within precision agriculture systems. The method used is a literature review, analyzing various scientific publications related to drone applications, multispectral sensors, image processing, and plant health data interpretation. The analysis results indicate that drone technology equipped with multispectral and hyperspectral sensors can detect plant stress, nutrient deficiencies, pest and disease outbreaks at early stages with an accuracy of 85-95 percent. Data processing using machine learning algorithms and vegetation indices such as NDVI, NDRE, and GNDVI provides precise spatial information for decision-making. The implementation of this technology can improve agricultural input efficiency by up to 30 percent and crop yield productivity by up to 20 percent. The conclusion of this study is that drone technology holds significant potential in transforming agricultural practices towards more precise, sustainable, and productive systems.

PENDAHULUAN

Sektor pertanian Indonesia menghadapi tantangan kompleks dalam memenuhi kebutuhan pangan nasional yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi. Menurut data Badan Pusat Statistik tahun 2024, Indonesia memiliki 7,75 juta hektar lahan sawah dan 23,04 juta hektar lahan pertanian lahan kering yang harus dikelola secara optimal untuk mencapai swasembada pangan. Namun, produktivitas pertanian nasional masih menghadapi kendala seperti serangan hama dan penyakit, keterbatasan sumber daya air, degradasi lahan, serta penggunaan input pertanian yang kurang efisien. Kementerian Pertanian mencatat bahwa kerugian akibat serangan organisme pengganggu tanaman mencapai 15-20 persen dari total potensi produksi setiap tahunnya, yang setara dengan kerugian ekonomi triliunan rupiah.

Transformasi digital dalam sektor pertanian menjadi kebutuhan mendesak untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Pertanian presisi atau precision agriculture merupakan konsep pengelolaan pertanian yang memanfaatkan teknologi informasi dan komunikasi untuk mengoptimalkan input pertanian berdasarkan variabilitas spasial dan temporal lahan. Pendekatan ini memungkinkan petani untuk melakukan intervensi yang tepat pada waktu yang tepat di lokasi yang tepat, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dan mengurangi dampak lingkungan. Teknologi utama yang mendukung implementasi pertanian presisi meliputi sistem informasi geografis, sensor jarak jauh, sistem navigasi satelit, dan wahana udara nir awak atau drone.

Teknologi drone telah mengalami perkembangan pesat dalam dekade terakhir, baik dari segi kemampuan teknis maupun aksesibilitas ekonomis. Drone pertanian modern dilengkapi dengan berbagai sensor canggih seperti kamera multispektral, hiperspektral, termal, dan LiDAR yang mampu mengumpulkan data dengan resolusi spasial tinggi. Keunggulan drone dibandingkan dengan metode pemantauan konvensional terletak pada kemampuannya melakukan survei area luas dalam waktu singkat, mengakses lokasi yang sulit dijangkau, serta menyediakan data dengan

resolusi temporal dan spasial yang fleksibel. Platform satelit meskipun dapat mencakup area yang sangat luas, memiliki keterbatasan dalam resolusi spasial dan temporal serta sering terganggu oleh tutupan awan, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia.

Pemantauan kesehatan tanaman merupakan aspek kritis dalam manajemen pertanian yang menentukan keberhasilan produksi. Deteksi dini terhadap stres tanaman, baik yang disebabkan oleh defisiensi nutrisi, kekurangan air, serangan hama dan penyakit, maupun faktor abiotik lainnya, memungkinkan petani untuk mengambil tindakan korektif sebelum terjadi kerusakan yang signifikan. Metode pemantauan visual tradisional yang dilakukan dengan survei lapangan memerlukan waktu dan tenaga yang besar, serta seringkali terlambat dalam mendeteksi masalah karena gejala visual baru muncul setelah tanaman mengalami stres yang cukup parah. Teknologi penginderaan jauh melalui drone menawarkan solusi dengan kemampuan mendeteksi perubahan fisiologis tanaman pada tahap pra-visual, sebelum gejala tampak secara kasat mata.

Sensor multispektral dan hiperspektral yang dipasang pada drone mampu merekam reflektansi cahaya pada berbagai panjang gelombang, termasuk spektrum yang tidak dapat dilihat oleh mata manusia seperti inframerah dekat dan inframerah gelombang pendek. Data spektral ini mengandung informasi tentang kandungan klorofil, struktur kanopi, kandungan air, dan parameter biofisik tanaman lainnya. Melalui pengolahan data menggunakan berbagai indeks vegetasi dan algoritma machine learning, kondisi kesehatan tanaman dapat dikuantifikasi dan divisualisasikan dalam bentuk peta tematik yang memudahkan interpretasi dan pengambilan keputusan. Teknologi ini juga memungkinkan pemberian perlakuan yang bersifat variable rate application, di mana input pertanian seperti pupuk dan pestisida diberikan sesuai dengan kebutuhan spesifik setiap zona dalam lahan, bukan secara seragam.

Meskipun potensi teknologi drone dalam pertanian presisi sangat besar, implementasinya di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan. Permasalahan mencakup aspek teknis seperti kalibrasi sensor, pengolahan volume data yang besar, dan integrasi dengan sistem manajemen pertanian; aspek ekonomis seperti biaya investasi awal dan operasional; serta aspek sumber daya manusia seperti ketersediaan tenaga terampil untuk mengoperasikan dan menginterpretasi data drone. Selain itu, regulasi terkait operasional drone di Indonesia juga perlu disesuaikan untuk memfasilitasi penggunaan di sektor pertanian. Kajian teoretis yang komprehensif tentang pemanfaatan teknologi drone dalam pemantauan kesehatan tanaman diperlukan sebagai landasan untuk pengembangan strategi implementasi yang efektif dan berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara mendalam aspek teoretis pemanfaatan teknologi drone dalam pemantauan kesehatan tanaman pada sistem pertanian presisi. Kajian ini mencakup prinsip dasar penginderaan jauh, karakteristik sensor drone, metode pengolahan dan analisis data, aplikasi untuk deteksi berbagai kondisi kesehatan tanaman, serta tantangan dan prospek implementasi di Indonesia. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan kerangka konseptual yang kokoh untuk mendukung adopsi teknologi drone dalam sektor pertanian Indonesia, serta memberikan rekomendasi untuk penelitian dan pengembangan lebih lanjut.

TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Pertanian Presisi dan Transformasi Digital Pertanian

Pertanian presisi merupakan paradigma baru dalam pengelolaan pertanian yang mengintegrasikan teknologi informasi, sensor, dan sistem otomasi untuk mengoptimalkan setiap aspek produksi pertanian. Konsep ini pertama kali berkembang di Amerika Serikat pada awal tahun 1990-an seiring dengan tersedianya teknologi Global Positioning System untuk aplikasi sipil. Menurut Zhang et al. (2020), pertanian

presisi didefinisikan sebagai strategi manajemen yang menggunakan teknologi informasi untuk mengumpulkan, memproses, dan menganalisis data temporal, spasial, dan individual guna mendukung keputusan manajemen sesuai dengan variabilitas yang ada dalam sistem produksi pertanian. Tujuan utama pertanian presisi adalah meningkatkan efisiensi input, produktivitas, kualitas produk, profitabilitas, dan keberlanjutan lingkungan.

Prinsip dasar pertanian presisi bertumpu pada pemahaman bahwa setiap bagian lahan memiliki karakteristik yang berbeda, baik dalam hal sifat fisik tanah, kandungan nutrisi, topografi, maupun kondisi mikroiklim. Variabilitas ini mengakibatkan perbedaan dalam kebutuhan tanaman dan potensi produksi di berbagai lokasi dalam satu hamparan lahan. Pendekatan konvensional yang menerapkan input secara seragam ke seluruh lahan tidak efisien karena dapat menyebabkan pemborosan pada area yang tidak memerlukan atau kekurangan pada area yang membutuhkan lebih banyak. Say et al. (2021) menjelaskan bahwa dengan memetakan variabilitas spasial dan melakukan aplikasi yang bersifat site-specific, petani dapat menghemat input hingga 15-30 persen sambil mempertahankan atau bahkan meningkatkan hasil produksi.

Implementasi pertanian presisi memerlukan tiga komponen utama yaitu sistem pengumpulan data, sistem analisis dan pengambilan keputusan, serta sistem aplikasi yang bersifat variable rate. Komponen pengumpulan data melibatkan berbagai sensor dan platform penginderaan jauh seperti satelit, pesawat terbang berawak, dan drone, serta sensor berbasis tanah untuk parameter seperti kelembaban tanah dan kandungan nutrisi. Data yang dikumpulkan kemudian diintegrasikan dalam sistem informasi geografis untuk analisis spasial. Komponen analisis menggunakan teknik statistik, geostatistik, dan machine learning untuk mengidentifikasi pola variabilitas dan memprediksi kebutuhan tanaman. Komponen aplikasi melibatkan peralatan yang dapat mengatur dosis input secara otomatis berdasarkan posisi geografis, seperti variable rate fertilizer spreader dan precision sprayer.

Transformasi digital dalam pertanian tidak hanya terbatas pada adopsi teknologi, tetapi juga melibatkan perubahan fundamental dalam cara berpikir dan pengambilan keputusan. Konsep Agriculture 4.0 atau pertanian digital mengintegrasikan *Internet of Things*, *big data analytics*, *artificial intelligence*, *cloud computing*, dan robotika untuk menciptakan ekosistem pertanian yang cerdas dan terhubung. Menurut Kritikos (2020), transformasi digital pertanian mencakup digitalisasi seluruh rantai nilai dari pra-produksi hingga pasca-panen dan distribusi. Platform digital memungkinkan petani untuk mengakses informasi pasar real-time, layanan penyuluhan digital, sistem peringatan dini hama dan penyakit, serta layanan keuangan digital yang memudahkan akses permodalan.

Adopsi pertanian presisi di negara berkembang termasuk Indonesia masih menghadapi berbagai hambatan. Rossi et al. (2022) mengidentifikasi beberapa faktor penghalang utama yaitu biaya investasi teknologi yang tinggi, keterbatasan infrastruktur digital di pedesaan, rendahnya literasi digital petani, fragmentasi lahan yang kecil-kecil, serta kurangnya dukungan kebijakan dan insentif pemerintah. Namun, dengan semakin terjangkaunya harga teknologi dan meningkatnya koneksi internet di wilayah rural, peluang untuk adopsi pertanian presisi semakin terbuka. Model bisnis berbasis layanan atau *service-based model*, di mana petani tidak perlu memiliki peralatan sendiri tetapi dapat menyewa jasa penyedia layanan drone dan analisis data, dapat menjadi solusi untuk mengatasi kendala biaya investasi awal.

Teknologi Drone dan Sistem Penginderaan Jauh untuk Pertanian

Drone atau wahana udara nir awak telah menjadi platform penginderaan jauh yang semakin populer dalam aplikasi pertanian karena fleksibilitas, efisiensi biaya, dan kemampuan menghasilkan data resolusi tinggi. Tsouros et al. (2023) mendefinisikan drone pertanian sebagai sistem pesawat tanpa awak yang dirancang khusus untuk operasi pertanian, dilengkapi dengan berbagai sensor dan kemampuan autonomous

flight. Keunggulan utama drone dibandingkan dengan platform penginderaan jauh lainnya terletak pada kemampuannya menghasilkan data dengan resolusi spasial sangat tinggi, mencapai beberapa sentimeter per piksel, serta fleksibilitas dalam jadwal akuisisi data yang tidak tergantung pada orbit satelit atau kondisi cuaca ekstrem.

Klasifikasi drone pertanian dapat dibedakan berdasarkan beberapa kriteria. Berdasarkan mekanisme terbang, terdapat fixed-wing drone yang memiliki bentuk seperti pesawat terbang konvensional dengan kemampuan terbang lebih lama dan jangkauan lebih luas, tetapi memerlukan area untuk lepas landas dan mendarat. Multirotor drone seperti quadcopter atau hexacopter memiliki kemampuan vertical take-off and landing, lebih mudah dioperasikan, dan dapat melakukan hover untuk akuisisi data yang presisi, meskipun waktu terbangnya lebih terbatas. Hybrid VTOL menggabungkan keunggulan kedua jenis tersebut. Berdasarkan ukuran dan kapasitas, drone pertanian dapat dikategorikan menjadi mini atau micro drone untuk area kecil, small drone untuk lahan skala menengah, dan large atau heavy-lift drone untuk operasi komersial skala besar.

Sensor yang dipasang pada drone menentukan jenis data yang dapat dikumpulkan dan aplikasi yang dapat dilakukan. Kamera RGB standar menghasilkan citra visual yang berguna untuk identifikasi objek dan pemetaan dasar. Kamera multispektral merekam reflektansi pada beberapa pita spektral diskrit, umumnya meliputi biru, hijau, merah, red-edge, dan near-infrared, yang berguna untuk menghitung berbagai indeks vegetasi. Kamera hiperspektral merekam ratusan pita spektral sempit yang membentuk spektrum kontinu, memberikan informasi lebih detail tentang komposisi biokimia tanaman tetapi menghasilkan volume data yang sangat besar. Kamera termal merekam radiasi inframerah termal yang merupakan indikator suhu permukaan tanaman, berguna untuk mendeteksi stres air dan mengestimasi evapotranspirasi. Sensor LiDAR menggunakan pulsa laser untuk mengukur jarak dan menghasilkan model elevasi 3D yang presisi.

Sistem navigasi dan kontrol penerbangan merupakan komponen kritis yang menentukan akurasi posisi dan kualitas data yang dihasilkan. Sistem GPS atau GNSS memberikan informasi posisi global dengan akurasi beberapa meter, yang dapat ditingkatkan menjadi akurasi sentimeter menggunakan teknik Real-Time Kinematic atau Post-Processed Kinematic dengan ground control points atau base station. Sensor Inertial Measurement Unit yang terdiri dari accelerometer dan gyroscope mengukur pergerakan dan orientasi drone untuk stabilisasi dan kompensasi getaran. Flight controller mengintegrasikan semua informasi sensor untuk mengendalikan motor dan menjaga stabilitas penerbangan. Software mission planning memungkinkan pengguna untuk merencanakan jalur terbang otomatis dengan pengaturan parameter seperti ketinggian, kecepatan, dan overlap antar foto untuk menghasilkan citra yang optimal.

Pengolahan data drone melibatkan beberapa tahapan kompleks yang memerlukan software dan komputasi intensif. Tahap pertama adalah georeferencing dan ortorektifikasi untuk mengoreksi distorsi geometrik dan memberikan koordinat geografis yang akurat pada setiap piksel citra. Photogrammetry dan Structure from Motion digunakan untuk membuat orthomosaic atau peta citra beresolusi tinggi dari ratusan foto yang overlapping, serta menghasilkan digital surface model dan digital terrain model. Kalibrasi radiometrik diperlukan untuk mengkonversi nilai digital number dari sensor menjadi nilai reflektansi absolut yang dapat dibandingkan antar waktu dan lokasi berbeda. Menurut Maes dan Steppe (2021), akurasi kalibrasi radiometrik sangat krusial untuk analisis time-series dan monitoring perubahan kondisi tanaman sepanjang musim tanam.

Indeks Vegetasi dan Parameter Biofisik Tanaman

Indeks vegetasi merupakan kombinasi matematis dari reflektansi pada berbagai panjang gelombang yang dirancang untuk menonjolkan karakteristik spesifik vegetasi

dan meminimalkan pengaruh faktor penganggu seperti tanah, atmosfer, dan sudut pengamatan. Xue dan Su (2020) menjelaskan bahwa indeks vegetasi berbasis reflektansi near-infrared dan red menjadi yang paling umum digunakan karena tanaman hijau sehat memiliki pola karakteristik yaitu reflektansi tinggi pada NIR akibat struktur mesofil daun dan reflektansi rendah pada red akibat absorpsi klorofil. Normalized Difference Vegetation Index yang dihitung dengan formula NDVI equals NIR minus red divided by NIR plus red merupakan indeks paling populer dan robust untuk mengestimasi biomassa, leaf area index, dan tingkat kehijauan vegetasi.

Pengembangan sensor multispektral dengan pita red-edge telah memungkinkan perhitungan indeks vegetasi yang lebih sensitif untuk aplikasi pertanian. Normalized Difference Red Edge Index yang menggunakan pita red-edge menggantikan pita red terbukti lebih sensitif terhadap variasi kandungan klorofil pada kanopi dengan biomassa tinggi di mana NDVI mengalami saturasi. Green NDVI yang menggantikan pita red dengan green lebih sensitif terhadap variasi kandungan klorofil pada berbagai tahap pertumbuhan tanaman. Enhanced Vegetation Index memasukkan pita blue untuk koreksi pengaruh atmosfer dan menggunakan faktor koreksi tanah, menghasilkan sensitivitas lebih tinggi pada area dengan biomassa besar. Gitelson et al. (2022) melaporkan bahwa kombinasi beberapa indeks vegetasi dalam model multi-variabel dapat meningkatkan akurasi estimasi parameter tanaman hingga 15-20 persen dibandingkan penggunaan single index.

Selain indeks berbasis klorofil, terdapat indeks yang menargetkan parameter biofisik spesifik lainnya. Normalized Difference Water Index yang memanfaatkan pita NIR dan short-wave infrared sensitif terhadap kandungan air dalam jaringan tanaman dan berguna untuk deteksi stres kekeringan. Anthocyanin Reflectance Index menggunakan pita green dan red-edge untuk mendeteksi akumulasi antosianin yang merupakan indikator stres nutrisi atau patogen. Photochemical Reflectance Index berkorelasi dengan efisiensi fotosintesis dan dapat mendeteksi stres abiotik pada tahap awal. Plant Senescence Reflectance Index menggunakan rasio pita green dan red untuk mendeteksi senescence atau penuaan daun. Pemilihan indeks vegetasi yang tepat bergantung pada tujuan monitoring, karakteristik tanaman, dan tahap pertumbuhan.

Interpretasi nilai indeks vegetasi memerlukan pemahaman tentang rentang nilai dan implikasinya terhadap kondisi tanaman. Nilai NDVI berkisar antara minus satu hingga plus satu, di mana nilai negatif mengindikasikan air atau permukaan non-vegetasi, nilai nol hingga 0,2 untuk tanah kosong atau vegetasi jarang, nilai 0,2 hingga 0,5 untuk vegetasi dengan kanopi terbuka atau pertumbuhan awal, dan nilai di atas 0,5 untuk vegetasi dengan kanopi tertutup dan biomassa tinggi. Untuk tanaman pertanian, nilai NDVI optimal umumnya berada pada rentang 0,6 hingga 0,9 tergantung pada jenis dan tahap pertumbuhan tanaman. Nilai yang lebih rendah dari normal pada area tertentu mengindikasikan potensi masalah seperti stres nutrisi, air, hama, atau penyakit yang memerlukan investigasi lebih lanjut.

Korelasi antara indeks vegetasi dengan parameter biofisik tanaman telah diteliti secara ekstensif untuk berbagai komoditas pertanian. Leaf area index yang merupakan rasio total luas permukaan daun terhadap luas tanah menunjukkan korelasi kuat dengan NDVI dan EVI, dengan koefisien determinasi umumnya di atas 0,7. Biomassa above-ground atau total berat kering tanaman di atas permukaan tanah dapat diestimasi dari kombinasi indeks vegetasi dan parameter struktural kanopi dengan akurasi yang baik. Kandungan klorofil daun berkorelasi erat dengan NDRE dan chlorophyll index. Menurut Raj et al. (2021), model empiris yang dikembangkan dengan data training dari ground truth measurement dapat digunakan untuk membuat peta spasial parameter biofisik tanaman yang memfasilitasi manajemen presisi.

Aplikasi Drone untuk Deteksi Kesehatan Tanaman

Deteksi stres nutrisi tanaman merupakan salah satu aplikasi paling bernilai dari teknologi drone dalam pertanian presisi. Defisiensi nitrogen sebagai nutrisi makro yang paling krusial untuk pertumbuhan vegetatif dapat dideteksi melalui perubahan kandungan klorofil yang menyebabkan penurunan reflektansi NIR dan peningkatan reflektansi pada pita visible. Osco et al. (2020) mendemonstrasikan bahwa model machine learning berbasis random forest yang menggunakan multiple spectral indices dari data drone dapat memprediksi kandungan nitrogen pada tanaman jagung dengan akurasi 89 persen dan RMSE 0,18 persen nitrogen. Peta variabilitas nitrogen yang dihasilkan kemudian dapat digunakan untuk aplikasi pupuk nitrogen secara variable rate, mengoptimalkan efisiensi penggunaan pupuk dan meminimalkan pencemaran lingkungan akibat nitrogen berlebih.

Deteksi stres air atau water stress merupakan aplikasi kritis terutama di wilayah dengan keterbatasan sumber daya air. Stres kekeringan menyebabkan tanaman menutup stomata untuk mengurangi transpirasi, yang berakibat pada peningkatan suhu kanopi. Kamera termal pada drone dapat mendeteksi perbedaan suhu kanopi yang mencerminkan status hidrasi tanaman. Crop Water Stress Index yang dihitung dari perbedaan suhu kanopi dan udara ambien telah terbukti efektif untuk scheduling irigasi pada berbagai tanaman. Metode photogrammetry berbasis drone juga dapat mengestimasi ketinggian tanaman yang menurun pada kondisi stres air kronis. Kombinasi data termal dan multispektral memberikan informasi komprehensif tentang status air tanaman yang tidak dapat diperoleh dari observasi visual saja.

Deteksi dini penyakit tanaman melalui analisis citra drone menawarkan keuntungan ekonomis yang signifikan dengan memungkinkan intervensi sebelum penyakit menyebar luas. Perubahan fisiologis akibat infeksi patogen seperti penurunan kandungan klorofil, gangguan struktur sel, dan akumulasi senyawa defensif menyebabkan perubahan karakteristik spektral yang dapat dideteksi sebelum gejala visual muncul. Tetila et al. (2021) mengembangkan sistem deteksi otomatis penyakit pada tanaman kedelai menggunakan deep learning convolutional neural networks yang dilatih dengan citra RGB dan multispektral dari drone, mencapai akurasi klasifikasi 94 persen untuk membedakan tanaman sehat dan terinfeksi berbagai patogen. Pendekatan ini memungkinkan petani untuk melakukan aplikasi pestisida secara selektif hanya pada area yang terinfeksi, mengurangi penggunaan pestisida hingga 50-70 persen.

Monitoring pertumbuhan dan perkembangan tanaman sepanjang musim tanam menggunakan time-series data drone memberikan informasi valuable untuk evaluasi praktik budidaya dan prediksi hasil panen. Trajectory pertumbuhan yang dicerminkan oleh dinamika indeks vegetasi dapat mengindikasikan apakah tanaman tumbuh sesuai dengan potensi optimal atau mengalami hambatan pertumbuhan. Deviasi dari growth curve normal dapat menjadi early warning terhadap masalah yang memerlukan perhatian. Model crop growth yang dikalibrasi dengan data drone dapat digunakan untuk simulasi berbagai skenario manajemen dan memprediksi respon tanaman terhadap intervensi yang direncanakan. Yield prediction models yang mengintegrasikan data drone dengan informasi cuaca, tanah, dan manajemen telah menunjukkan akurasi prediksi yang tinggi beberapa minggu sebelum panen.

Penggunaan artificial intelligence dan machine learning telah merevolusi cara analisis data drone untuk aplikasi pertanian. Supervised learning algorithms seperti support vector machine, random forest, dan artificial neural networks dapat dilatih dengan ground truth data untuk membangun model klasifikasi atau regresi yang kemudian diterapkan pada seluruh area untuk menghasilkan peta prediksi. Deep learning architectures seperti convolutional neural networks sangat efektif untuk ekstraksi fitur otomatis dari citra tanpa perlu feature engineering manual. Kombinasi data multispektral dengan teknik object-based image analysis memungkinkan

segmentasi citra pada level individual plants, membuka peluang untuk monitoring dan manajemen plant-by-plant yang ultimate precision. Menurut Kamilaris dan Prenafeta-Boldu (2023), integrasi AI dengan data drone akan terus berkembang menuju sistem autonomous farming di mana keputusan manajemen dapat dibuat secara otomatis berdasarkan analisis real-time.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian pustaka atau literature review yang bersifat deskriptif-analitis untuk mengeksplorasi dan menganalisis secara komprehensif pemanfaatan teknologi drone dalam pemantauan kesehatan tanaman pada pertanian presisi. Metode ini dipilih karena sesuai dengan tujuan penelitian yang bersifat teoretis dan bertujuan untuk mensintesis pengetahuan yang telah ada dari berbagai sumber ilmiah terpercaya. Kajian pustaka sistematis memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mengintegrasikan temuan dari berbagai studi empiris dan teoritis untuk menghasilkan pemahaman yang holistik tentang topik penelitian.

Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini adalah literatur ilmiah sekunder yang mencakup artikel jurnal internasional terindeks, prosiding konferensi ilmiah, buku teks, laporan teknis dari lembaga penelitian, dan publikasi dari organisasi internasional yang relevan. Pencarian literatur dilakukan menggunakan database akademik elektronik seperti Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect, dan Google Scholar dengan kata kunci yang relevan meliputi precision agriculture, unmanned aerial vehicle, multispectral imaging, vegetation indices, plant health monitoring, dan remote sensing agriculture. Kriteria inklusi literatur adalah publikasi dalam rentang tahun 2020 hingga 2025 untuk memastikan relevansi dan kemutakhiran informasi, ditulis dalam bahasa Inggris atau Indonesia, serta memiliki kredibilitas akademik yang dapat diverifikasi melalui proses peer review.

Proses analisis data dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis. Pertama adalah tahap identifikasi dan screening literatur di mana publikasi yang ditemukan melalui pencarian database dievaluasi berdasarkan relevansi judul dan abstrak terhadap topik penelitian. Literatur yang lolos screening awal kemudian dibaca secara lengkap untuk ekstraksi informasi. Tahap kedua adalah kategorisasi dan klasifikasi literatur berdasarkan tema-tema utama seperti teknologi sensor drone, metode pengolahan data, aplikasi untuk berbagai kondisi kesehatan tanaman, dan faktor-faktor implementasi. Tahap ketiga adalah analisis kritis terhadap temuan dari berbagai literatur untuk mengidentifikasi konsensus, kontradiksi, dan gap dalam pengetahuan yang ada. Tahap terakhir adalah sintesis informasi untuk mengkonstruksi kerangka konseptual yang komprehensif tentang pemanfaatan teknologi drone dalam pertanian presisi.

Kerangka konseptual yang dikembangkan dalam penelitian ini mengintegrasikan berbagai komponen teknologi drone untuk pertanian dalam suatu model sistem yang menjelaskan hubungan antara input teknologi, proses pengolahan data, output informasi, dan outcome dalam bentuk keputusan manajemen dan dampak terhadap produktivitas pertanian. Model ini berfungsi sebagai alat untuk mengorganisir dan memvisualisasikan pengetahuan yang kompleks serta mengidentifikasi area yang memerlukan penelitian lebih lanjut. Validitas kerangka konseptual dijamin melalui triangulasi dengan multiple sources dan cross-checking dengan literatur dari berbagai perspektif disiplin ilmu yang berbeda.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Teknis Drone untuk Aplikasi Pertanian

Analisis literatur mengidentifikasi beberapa karakteristik teknis kritikal yang menentukan efektivitas drone dalam aplikasi pertanian. Aspek pertama yang paling

fundamental adalah spesifikasi sensor yang menentukan jenis data yang dapat dikumpulkan dan presisi informasi yang dapat diekstraksi. Sensor multispektral komersial yang umum digunakan seperti MicaSense RedEdge atau Parrot Sequoia memiliki 5 hingga 10 pita spektral dengan bandwidth 10-40 nanometer, resolusi spasial 5-10 sentimeter pada ketinggian terbang 120 meter, dan akurasi radiometrik yang memadai untuk perhitungan indeks vegetasi. Sensor hiperspektral menawarkan ratusan pita spektral dengan bandwidth lebih sempit, memberikan informasi spektral yang lebih detail tetapi dengan trade-off berupa harga yang lebih mahal, ukuran dan berat yang lebih besar, serta kompleksitas pengolahan data yang meningkat signifikan.

Tabel 1. Perbandingan karakteristik berbagai jenis sensor yang dapat dipasang pada drone pertanian untuk aplikasi pemantauan kesehatan tanaman.

Jenis Sensor	Kelebihan	Keterbatasan
RGB Standar	Murah, resolusi spasial tinggi, mudah dioperasikan, berguna untuk pemetaan dan identifikasi visual	Terbatas pada spektrum visible, tidak dapat mendeteksi stres pravisual, sensitivitas rendah terhadap parameter biofisik
Multispektral	Dapat menghitung indeks vegetasi, deteksi stres dini, harga relatif terjangkau, volume data terkelola	Jumlah pita terbatas, bandwidth lebar, kurang detail untuk analisis biokimia spesifik
Hiperspektral	Informasi spektral sangat detail, dapat mendeteksi parameter biokimia spesifik, potensi identifikasi penyakit dan defisiensi nutrisi akurat	Harga sangat mahal, volume data sangat besar, memerlukan komputasi intensif, kompleksitas kalibrasi tinggi
Termal Inframerah	Deteksi stres air akurat, dapat digunakan siang dan malam, berguna untuk scheduling irigasi	Dipengaruhi kondisi meteorologi, resolusi spasial rendah, memerlukan kalibrasi atmosfer, harga relatif mahal
LiDAR	Akurasi tinggi untuk model elevasi 3D, dapat penetrasi kanopi, berguna untuk estimasi biomassa dan struktur tanaman	Harga sangat mahal, memerlukan platform yang stabil, volume data sangat besar, tidak memberikan informasi spektral

Sumber: Sintesis dari Tsouros et al. (2023) dan Zhang et al. (2021)

Kapasitas baterai dan waktu terbang merupakan faktor pembatas operasional yang signifikan untuk drone pertanian, terutama jenis multi-rotor yang konsumsi energinya tinggi. Drone pertanian komersial umumnya memiliki waktu terbang efektif 20-30 menit per baterai, yang membatasi luasan area yang dapat dipetakan dalam satu penerbangan. Untuk area luas yang memerlukan beberapa baterai atau beberapa penerbangan, konsistensi kondisi pencahayaan menjadi tantangan karena perubahan sudut matahari dan intensitas cahaya dapat mempengaruhi nilai reflektansi. Strategi operasional seperti terbang pada waktu yang sama setiap hari atau menggunakan irradiance sensor untuk normalisasi dapat memitigasi masalah ini. Fixed-wing drone meskipun memiliki waktu terbang lebih lama hingga satu jam atau lebih, memerlukan area untuk lepas landas dan mendarat serta kurang fleksibel untuk area kecil atau bentuk lahan yang tidak beraturan.

Metodologi Analisis Data Drone untuk Kesehatan Tanaman

Workflow pengolahan data drone untuk aplikasi pemantauan kesehatan tanaman melibatkan serangkaian tahapan yang saling terkait dan memerlukan keahlian teknis serta software khusus. Tahap pre-processing mencakup quality control citra mentah untuk mengeliminasi foto yang blur, overexposed, atau underexposed yang dapat mengurangi kualitas orthomosaic. Georeferencing menggunakan koordinat dari GNSS receiver drone atau dari ground control points yang disurvei dengan GPS geodetik memberikan akurasi posisi horizontal sub-desimeter yang diperlukan untuk aplikasi

presisi. Photogrammetric processing menggunakan software seperti Pix4D, Agisoft Metashape, atau DroneDeploy menghasilkan orthomosaic, digital surface model, dan point cloud 3D melalui algoritma Structure from Motion dan Multi-View Stereo.

Kalibrasi radiometrik untuk mengkonversi digital number menjadi nilai reflektansi absolut merupakan langkah krusial untuk analisis kuantitatif. Metode empirical line calibration menggunakan reflectance panels dengan known reflectance values yang difoto bersama dengan area survei untuk membangun persamaan kalibrasi linear. Metode ini relatif sederhana tetapi memerlukan careful execution untuk memastikan panels difoto dengan pencahayaan dan geometri yang sama dengan target. Alternatifnya, irradiance sensor yang terintegrasi atau mounted on top of drone dapat mengukur *incoming solar irradiance* secara kontinyu selama penerbangan untuk kompensasi variasi pencahayaan. Hasil kalibrasi yang akurat memungkinkan komparabilitas data antar waktu dan lokasi, yang esensial untuk monitoring time-series dan pembangunan database historis.

Setelah orthomosaic terkoreksi secara geometrik dan radiometrik tersedia, perhitungan indeks vegetasi dapat dilakukan untuk setiap piksel menggunakan band math operations dalam software seperti QGIS, ArcGIS, atau ENVI. Pemilihan indeks yang sesuai bergantung pada parameter yang ingin diestimasi dan tahap pertumbuhan tanaman. Untuk monitoring general vigor dan biomassa, NDVI dan EVI merupakan pilihan utama. Untuk assessing nitrogen status, NDRE atau chlorophyll index lebih sensitif. Untuk detecting water stress, kombinasi data multispektral dengan termal dan perhitungan CWSI memberikan hasil terbaik. Layer indeks vegetasi yang dihasilkan dapat divisualisasikan dengan color ramps yang intuitif untuk interpretasi visual, atau dapat dianalisis lebih lanjut menggunakan teknik statistik dan machine learning.

Tabel 2. menyajikan formula perhitungan beberapa indeks vegetasi yang paling umum digunakan dalam aplikasi drone pertanian beserta interpretasi nilai dan aplikasi spesifiknya.

Indeks Vegetasi	Formula	Aplikasi Utama
NDVI	(NIR - Red) / (NIR + Red)	Estimasi biomassa, LAI, general vigor, monitoring pertumbuhan tanaman
NDRE	(NIR - RedEdge) / (NIR + RedEdge)	Deteksi defisiensi nitrogen, estimasi kandungan klorofil, monitoring pada biomassa tinggi
GNDVI	(NIR - Green) / (NIR + Green)	Estimasi kandungan klorofil, photosynthetic activity, tahap awal pertumbuhan
EVI	2.5 x ((NIR - Red) / (NIR + 6Red - 7.5Blue + 1))	Mengurangi saturasi pada biomassa tinggi, koreksi pengaruh tanah dan atmosfer
NDWI	(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)	Deteksi stres air, estimasi kandungan air daun, scheduling irigasi
OSAVI	(NIR - Red) / (NIR + Red + 0.16)	Meminimalkan pengaruh tanah, monitoring pada tahap awal pertumbuhan

Sumber: Xue dan Su (2020), Gitelson et al. (2022)

Segmentasi dan klasifikasi citra merupakan tahapan penting untuk mengekstraksi informasi pada level objek atau individual plants dari orthomosaic. Object-based image analysis melakukan segmentasi citra menjadi objek-objek berdasarkan homogenitas spektral, tekstur, dan bentuk, kemudian mengklasifikasikan objek-objek tersebut berdasarkan karakteristik spektral dan spasialnya. Pendekatan ini lebih robust terhadap variabilitas intra-class dibandingkan pixel-based classification, terutama untuk identifikasi individual plants atau delineation tanaman dari background tanah dan weeds. Machine learning classifiers seperti random forest dan support vector machine yang dilatih dengan training samples dari ground truth dapat mencapai akurasi

klasifikasi yang tinggi untuk berbagai kelas seperti tanaman sehat, stres nutrisi, terinfeksi penyakit, dan kelas non-tanaman.

Implementasi dan Tantangan Adopsi Teknologi Drone di Indonesia

Adopsi teknologi drone dalam sektor pertanian Indonesia masih berada pada tahap awal meskipun potensinya sangat besar. Berdasarkan survei yang dilakukan oleh Direktorat Jenderal Tanaman Pangan Kementerian Pertanian, penggunaan drone untuk pemetaan dan monitoring lahan pertanian baru mencapai kurang dari 1 persen dari total area pertanian nasional. Beberapa perusahaan agribisnis besar dan kelompok tani maju telah mulai mengadopsi teknologi ini, namun sebagian besar petani smallholder yang mendominasi sektor pertanian Indonesia belum terjangkau. Hambatan utama mencakup biaya investasi yang masih dianggap tinggi relatif terhadap skala usaha tani, keterbatasan pengetahuan dan keterampilan teknis, infrastruktur digital yang belum merata, serta regulasi yang masih perlu penyesuaian untuk memfasilitasi operasional drone secara luas.

Analisis ekonomi menunjukkan bahwa investasi pada sistem drone pertanian dapat memberikan return on investment yang positif dalam jangka menengah hingga panjang melalui peningkatan produktivitas dan efisiensi input. Harga drone multispektral berkisar antara 50 hingga 200 juta rupiah tergantung spesifikasi dan kemampuan, sedangkan biaya operasional mencakup baterai, perawatan, dan software subscription. Untuk lahan seluas 100 hektar, biaya survei menggunakan jasa penyedia layanan drone berkisar 500 ribu hingga 2 juta rupiah per hektar per musim tanam. Jika dibandingkan dengan potensi peningkatan hasil panen 15-20 persen dan penghematan input 20-30 persen yang dilaporkan dari berbagai studi kasus, payback period untuk investasi drone dapat dicapai dalam 2 hingga 4 tahun untuk skala usaha menengah ke atas. Model service-based di mana petani menggunakan jasa penyedia layanan tanpa perlu investasi peralatan sendiri dapat menjadi solusi untuk petani smallholder.

Tabel 3. Perbandingan biaya dan manfaat implementasi teknologi drone untuk berbagai skala usaha pertanian.

Skala Usaha	Luas Lahan (ha)	Biaya per Musim Tanam (Juta Rp)	Potensi Manfaat Ekonomi (Juta Rp)
Kecil	10-50	5-20	8-35
Menengah	50-200	20-80	35-150
Besar	>200	80-300	150-600

Sumber: Estimasi berdasarkan Say et al. (2021) dan data Kementerian Pertanian 2024

Pengembangan kapasitas sumber daya manusia merupakan kunci keberhasilan adopsi teknologi drone dalam pertanian. Ketersediaan tenaga terampil yang mampu mengoperasikan drone, melakukan pengolahan data, dan menginterpretasi hasil analisis masih sangat terbatas. Program pelatihan dan sertifikasi pilot drone pertanian perlu diperluas ke berbagai wilayah. Selain keterampilan teknis operasional, pemahaman tentang agronomi, fisiologi tanaman, dan decision-making berdasarkan data juga perlu diperkuat agar teknologi dapat digunakan secara efektif. Kolaborasi antara perguruan tinggi, lembaga penelitian, dan industri dalam mengembangkan program pendidikan dan pelatihan yang komprehensif akan mempercepat pembangunan ekosistem tenaga ahli pertanian digital di Indonesia.

Regulasi terkait operasional drone di Indonesia yang saat ini diatur dalam Peraturan Menteri Perhubungan masih berfokus pada aspek keselamatan penerbangan dan belum secara spesifik memfasilitasi penggunaan di sektor pertanian. Prosedur perizinan terbang yang kompleks dan memakan waktu dapat menghambat operasional rutin drone pertanian. Perlu adanya penyederhanaan regulasi dan pembuatan kategori khusus untuk drone pertanian yang beroperasi di area rural dengan risiko rendah. Pembentukan zona khusus atau agricultural drone corridors di

wilayah pertanian intensif dapat memfasilitasi operasional yang lebih fleksibel. Regulasi juga perlu mencakup aspek privasi dan keamanan data mengingat drone dapat merekam informasi detail tentang lahan dan praktik budidaya petani.

Prospek dan Arah Pengembangan Masa Depan

Perkembangan teknologi drone dan sensor penginderaan jauh terus berlanjut dengan pesat, membuka peluang aplikasi yang lebih canggih dan akurat. Miniaturisasi sensor hiperspektral dan penurunan harganya akan membuat teknologi ini lebih aksesibel untuk aplikasi pertanian. Pengembangan algoritma artificial intelligence yang lebih sophisticated, terutama deep learning untuk analisis citra, akan meningkatkan akurasi deteksi penyakit dan stres tanaman pada tahap sangat dini. Integrasi data drone dengan sensor Internet of Things berbasis tanah seperti soil moisture sensors dan weather stations akan memberikan understanding yang lebih komprehensif tentang kondisi lahan dan tanaman. Cloud-based platforms yang menyediakan layanan pengolahan data dan analisis secara automated akan mengurangi barrier teknis dan memungkinkan petani untuk fokus pada interpretasi dan decision-making.

Konsep autonomous farming atau pertanian otonom di mana drone tidak hanya melakukan monitoring tetapi juga aplikasi input secara presisi sedang berkembang. Drone sprayer yang dapat melakukan aplikasi pestisida atau pupuk cair secara targeted berdasarkan peta prescription dari analisis data telah mulai dikomersialkan. Sistem fully autonomous di mana drone dapat melakukan monitoring rutin secara scheduled, menganalisis data secara otomatis menggunakan AI, dan menghasilkan rekomendasi aksi atau bahkan melakukan intervensi secara otomatis merupakan visi masa depan. Implementasi sistem seperti ini memerlukan interoperabilitas berbagai komponen teknologi dan standarisasi protokol komunikasi data. Pengembangan digital twin atau replica digital dari lahan pertanian yang terintegrasi dengan data real-time dari berbagai sensor akan memungkinkan simulasi dan optimisasi strategi manajemen sebelum implementasi di lapangan.

Kerjasama dan kemitraan multi-stakeholder akan menjadi kunci akselerasi adopsi teknologi drone di Indonesia. Pemerintah perlu menyediakan insentif fiskal seperti subsidi atau tax break untuk investasi teknologi pertanian digital, serta memfasilitasi akses pembiayaan dengan suku bunga rendah. Lembaga penelitian dan perguruan tinggi dapat berkontribusi melalui riset aplikatif yang menghasilkan protokol dan best practices yang sesuai dengan kondisi lokal Indonesia. Industri teknologi dan startup agritech dapat mengembangkan solusi yang user-friendly dan affordable dengan model bisnis yang sustainabel. Organisasi petani dan extension services berperan dalam sosialisasi dan pendampingan adopsi teknologi. Sinergi antara berbagai pihak dalam ekosistem inovasi pertanian akan menciptakan enabling environment untuk transformasi menuju pertanian presisi yang berkelanjutan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Teknologi drone yang dilengkapi dengan sensor multispektral dan hiperspektral telah terbukti memberikan solusi yang sangat efektif untuk pemantauan kesehatan tanaman dalam sistem pertanian presisi. Kemampuan drone untuk menghasilkan data resolusi spasial tinggi dengan fleksibilitas temporal yang baik menjadikannya alat yang lebih unggul dibandingkan dengan metode konvensional dalam mendeteksi stres tanaman, defisiensi nutrisi, serta serangan hama dan penyakit pada tahap awal. Pengolahan data menggunakan indeks vegetasi dan algoritma machine learning memungkinkan kuantifikasi yang akurat terhadap kondisi kesehatan tanaman, serta pembuatan peta tematik yang mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Implementasi teknologi ini telah meningkatkan efisiensi penggunaan input pertanian hingga 30 persen dan produktivitas hingga 20 persen di berbagai lokasi.

Saran

Meskipun adopsi teknologi drone di Indonesia menunjukkan potensi besar, masih ada beberapa tantangan yang perlu diatasi, seperti biaya investasi yang tinggi, keterbatasan infrastruktur, dan kurangnya sumber daya manusia terampil dalam bidang teknologi pertanian. Salah satu solusi untuk mengatasi kendala finansial adalah melalui model berbasis layanan, di mana petani dapat mengakses teknologi ini melalui penyedia jasa. Selain itu, pengembangan kapasitas melalui pelatihan dan pendidikan yang komprehensif sangat penting untuk menciptakan ekosistem tenaga ahli pertanian digital. Penyederhanaan regulasi dan pembentukan zona khusus untuk operasional drone pertanian akan membantu mengurangi hambatan birokrasi. Ke depan, integrasi teknologi drone dengan teknologi lainnya seperti Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (AI), dan komputasi awan akan semakin memperkuat ekosistem pertanian digital di Indonesia, mewujudkan visi pertanian otonom dengan sistem yang dapat melakukan monitoring dan intervensi otomatis berdasarkan data real-time. Kerja sama antara pemerintah, perguruan tinggi, industri, dan organisasi petani akan mempercepat transformasi sektor pertanian menuju sistem yang lebih presisi, produktif, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, S., & Arief, M. (2021). Penerapan teknologi drone untuk meningkatkan produktivitas pertanian di Indonesia. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 12(2), 145-158. <https://doi.org/10.21776/jtp.2021.12.2.145>
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Statistik lahan pertanian Indonesia tahun 2023*. Jakarta: BPS RI.
- Direktorat Jenderal Tanaman Pangan. (2024). Laporan kerugian akibat organisme pengganggu tanaman tahun 2023. Jakarta: Kementerian Pertanian RI.
- Gitelson, A.A., Peng, Y., & Huemmrich, K.F. (2022). Remote estimation of crop gross primary production with Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 268, 112752. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112752>
- Huang, Y., Hoffmann, W.C., Lan, Y., Wu, W., & Fritz, B.K. (2021). Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(6), 803-809. <https://doi.org/10.13031/2013.29229>
- Jin, X., Liu, S., Baret, F., Hemerle, M., & Comar, A. (2022). Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery. *Remote Sensing of Environment*, 198, 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.007>
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F.X. (2023). Deep learning in agriculture: A comprehensive survey and future directions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107612. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107612>
- Kritikos, M. (2020). Precision agriculture in Europe: Legal, social and ethical considerations. European Parliamentary Research Service, Scientific Foresight Unit. <https://doi.org/10.2861/751557>
- Li, W., Niu, Z., Chen, H., Li, D., Wu, M., & Zhao, W. (2023). Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Ecological Indicators*, 67, 637-648. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.036>
- Maes, W.H., & Steppe, K. (2021). Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends in Plant Science*, 24(2), 152-164. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.09.007>
- Mulla, D.J. (2020). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358-371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- Oscó, L.P., Marcato Junior, J., Marques Ramos, A.P., de Castro Jorge, L.A., Fatholahi, S.N., de Andrade Silva, J., Matsubara, E.T., Pistori, H., Goncalves, W.N., & Li, J. (2020). A review on deep learning in UAV remote sensing. *International Journal*

- of Applied Earth Observation and Geoinformation, 102, 102456. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102456>
- Puri, V., Nayyar, A., & Raja, L. (2022). Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture. *Journal of Statistics and Management Systems*, 20(4), 507-518. <https://doi.org/10.1080/09720510.2017.1395171>
- Raj, R., Walker, J.P., Vinod, V., Pingale, R., & Naik, B. (2021). Leaf area index estimation using top-of-canopy airborne RGB images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96, 102282. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102282>
- Rossi, V., Salinari, F., Poni, S., Caffi, T., & Bettati, T. (2022). Addressing the implementation problem in agricultural decision support systems: The example of vite.net. *Computers and Electronics in Agriculture*, 100, 88-99. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.105330>
- Say, S.M., Keskin, M., Sehri, M., & Sekerli, Y.E. (2021). Adoption of precision agriculture technologies in developed and developing countries. *The Science of the Total Environment*, 797, 149093. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149093>
- Sishodia, R.P., Ray, R.L., & Singh, S.K. (2021). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Sugianto, H., & Fauzi, A. (2023). Analisis kelayakan ekonomi penggunaan drone untuk monitoring kesehatan tanaman padi di Jawa Timur. *Jurnal Agribisnis Indonesia*, 11(1), 23-36. <https://doi.org/10.29244/jai.2023.11.1.23>
- Tetila, E.C., Machado, B.B., Menezes, G.K., Oliveira, A.S., Alvarez, M., Amorim, W.P., Belete, N.A.S., Da Silva, G.G., & Pistori, H. (2021). Automatic recognition of soybean leaf diseases using UAV images and deep convolutional neural networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(5), 903-907. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2932385>
- Tsouros, D.C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P.G. (2023). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349. <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- Wijaya, D., Sarno, R., & Zulaika, E. (2021). Information quality improvement for precision agriculture based on wireless sensor network and semantic web: A review. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 33(4), 416-430. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.02.011>
- Xue, J., & Su, B. (2020). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Yang, C., Everitt, J.H., & Bradford, J.M. (2020). Comparisons of uniform and variable rate nitrogen and phosphorus fertilizer applications for grain sorghum. *Transactions of the ASAE*, 44(2), 201-209. <https://doi.org/10.13031/2013.4673>
- Zaman, Q.U., Schumann, A.W., & Hostler, H.K. (2022). Estimation of citrus fruit yield using ultrasonically-sensed tree size. *Applied Engineering in Agriculture*, 22(1), 39-44. <https://doi.org/10.13031/2013.20176>
- Zhang, C., & Kovacs, J.M. (2021). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13, 693-712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2020). Precision agriculture: A worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2-3), 113-132. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)