

POTENSI DAN TANTANGAN INTEGRASI PERTANIAN PRESISI DALAM PEMANFAATAN AIR LINDI: SEBUAH TINJUAN LITERATUR*Potentials and Challenges of Integrating Precision Agriculture for Landfill Leachate Valorization: A Literature Review***Sofi Fatoni Putra**

*Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran”
Jawa Timur
Jl. Rungkut Madya, Gn. Anyar, Kec. Gn. Anyar, Surabaya, Jawa Timur 60294 Indonesia
25063020001@upnjatim.ac.id*

ABSTRAK

Peningkatan volume limbah global menempatkan air lindi sebagai ancaman lingkungan yang serius, namun matriks ini memiliki potensi agronomi yang belum tergali karena kandungan makronutrien yang tinggi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan integrasi teknologi pertanian presisi, khususnya *Internet of Things (IoT)* dan *Variable Rate Application (VRA)*, untuk mentransformasi air lindi menjadi sumber pupuk cair yang aman. Menggunakan pedoman PRISMA, studi ini menyintesis literatur terkini (2019-2025) untuk membangun kerangka kerja sistem fertigasi cerdas. Temuan kualitatif mengonfirmasi bahwa pemantauan *real-time* terhadap parameter kritis (pH, salinitas/EC, dan logam berat) mutlak diperlukan untuk mencegah risiko fitotoksitas dan akumulasi biomagnifikasi. Secara kuantitatif, integrasi algoritma *dosing* otomatis dan strategi VRA terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi serta menghasilkan penghematan irigasi sebesar 20%-50% dibandingkan dengan metode konvensional. Lebih lanjut, arsitektur sistem yang diusulkan menawarkan mekanisme intervensi otomatis yang signifikan dalam memitigasi pencemaran air tanah. Studi ini menyimpulkan bahwa valorisasi air lindi secara teknis sangat layak dilakukan melalui adopsi teknologi cerdas, yang menawarkan solusi jalan tengah antara produktivitas pertanian dan keamanan lingkungan dalam kerangka ekonomi sirkular.

Kata kunci: *Air lindi, Internet of Things (IoT), Pertanian Presisi, Variable Rate Application, Manajemen Limbah Berkelanjutan*

ABSTRACT

The exponential rise in global waste generation has positioned landfill leachate as a critical environmental liability, yet it possesses untapped agronomic potential due to its high macronutrient content. This systematic review evaluates the feasibility of integrating precision agriculture technologies—specifically Internet of Things (IoT) and Variable Rate Application (VRA)—to transform leachate into a safe liquid fertilizer source. Employing PRISMA guidelines, this study synthesizes recent literature (2019–2025) to construct a smart fertigation framework. Qualitative findings confirm that real-time monitoring of critical parameters (pH, EC, and Heavy Metals) is mandatory to prevent phytotoxicity and bio-magnification risks. Quantitatively, the integration of automated dosing algorithms and VRA strategies is proven to enhance nutrient use efficiency and generate irrigation water savings of 20–50% compared to conventional methods. Furthermore, the proposed architecture offers an automated intervention mechanism that significantly mitigates groundwater contamination risks. This study concludes that leachate valorization is technically viable through intelligent technology adoption, offering a sustainable solution that balances agricultural productivity with environmental safety within a circular economy framework.

Keywords: *Landfill Leachate, Internet of Things (IoT), Precision Agriculture, Variable Rate Application, Sustainable Waste Management.*

PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas manusia dan urbanisasi global telah menyebabkan lonjakan volume limbah padat secara signifikan, diperkirakan lebih dari dua miliar ton metrik sampah dihasilkan setiap tahunnya dengan proyeksi 70% pada tahun

2050 (Baganna *et al.*, 2025). Pada berbagai negara berkembang, masalah pengelolaan volume sampah yang masif ini sangat bergantung pada penimbunan di tempat pemrosesan akhir (TPA) yang secara alami menimbulkan produk sampingan berupa air

lindi akibat dekomposisi material organik (Lucero-Sorbazo *et al.*, 2022). Karakteristik air lindi sangat kompleks, di mana memiliki komposisi dengan konsentrasi tinggi polutan organik, senyawa anorganik serta berbagai logam berat yang terbentuk melalui tumpukan sampah (Wang & Qiao, 2024). Tidak terkendalinya air lindi merupakan tantangan serius bagi pengelolaan air limbah yang mana air lindi ini berisiko tinggi merembes ke akuifer, mencemari sumber air tanah dan merusak tanah di area pertanian sekitarnya (Baladehi, 2024; Baganna *et al.*, 2025).

Air lindi yang berasal dari tempat pemrosesan akhir mengandung karakteristik kimia yang unik, dimana kandungan konsentrasi bahan organik terlarut dan nutrisi esensial yang tinggi terutama amonia-nitrogen ($NH_4^+ - N$ dan senyawa organik yang lainnya (Lindamulla *et al.*, 2022; Xiang *et al.*, 2025). Selain kandungan nutrisi yang tinggi, juga terdapat ancaman lingkungan karena dapat memicu eutrofikasi apabila tidak ada pengolahan yang terkontrol (Parvin & Tareq, 2021). Pemikiran modern dalam pengelolaan limbah mulai melihatnya sebagai potensi sumber daya yang berharga. Studi tinjauan terbaru mengamati bahwa kandungan pada air lindi, seperti substansi humat, dapat dipulihkan dan dipergunakan sebagai pupuk cair yang mendukung produktivitas di sektor agroforestri (Xiang *et al.*, 2025).

Pemanfaatan ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, di mana limbah diubah menjadi aset sumber daya, walaupun aplikasinya tetap menuntut pengolahan yang hati-hati mengingat adanya risiko toksisitas fototoksik dan genotoksik yang perlu adanya evaluasi secara ketat sebelum dipergunakan (Anand & Palani, 2022).

Aplikasi seperti pedang bermata dua, selain menjanjikan aplikasi air lindi tanpa kontrol pengolahan yang tepat, dapat menimbulkan risiko serius yang disebabkan oleh kandungan polutan yang sangat kompleks dan fluktuatif (Parvin & Tareq, 2021). Studi ilmu toksisitas menunjukkan bahwa air lindi mentah atau belum diolah sering kali memiliki kandungan sifat fitotoksik yang kuat, terbukti dapat menekan pembentukan akar dan secara signifikan menghambat perkecambahan benih akibat tingginya kadar kandungan amonia atau senyawa xenobiotik (Anand & Palani, 2022). Tidak hanya berdampak pada fisiologi tanaman, tidak terkendalinya irigasi air lindi dapat menimbulkan degradasi kualitas tanah melalui peningkatan salinitas dan sidositas yang merusak struktur agregat tanah dalam jangka panjang (Baladehi, 2024). Perhatian utama terhadap risiko akumulasi di mana logam berat dan polutan organik persisten yang terkandung dalam air lindi dapat tertinggal di lahan dan memiliki potensi untuk masuk ke dalam rantai makanan

(Wang & Qiao, 2024). Lebih jauh, praktik lapangan dengan penggunaan irigasi manual sering kali gagal dalam pencegahan kontaminasi ke dalam lapisan akuifer, sehingga terjadi peningkatan ancaman pencemaran air tanah dan kesehatan masyarakat di sekitar lokasi (Parvin & Tareq, 2021). Maka dari itu, perlunya karakterisasi kandungan yang mendalam mengenai indeks polusi air lindi dan penilaian risiko ekotoksikologi menjadi syarat mutlak yang tidak bisa diabaikan sebelum pemanfaatan air lindi dilakukan (Lindamulla *et al.*, 2022).

Mengurangi risiko lingkungan yang disebabkan oleh air lindi, pendekatan pengolahan pertanian presisi (Precision Agriculture) menawarkan solusi strategis melalui metode manajemen nutrisi spesifik lokasi (Site-Specific Nutrient Management) yang dapat melestarikan lingkungan melalui keseimbangan produktivitas (Vullaganti *et al.*, 2025). *Internet of Things* merupakan teknologi yang diandalkan dalam pertanian presisi yang menggunakan analisis yang canggih dan dapat memprediksikan secara akurat dalam aplikasi input pertanian secara real time dibandingkan dengan pertanian yang konvensional atau tradisional (Ocama *et al.*, 2025). Implementasi metode pengolahan presisi terbukti efektif dan efisien dalam mengoptimalkan penggunaan pupuk dan mengurangi dampak negatif pencemaran

terhadap ekosistem tanah maupun air (Cai *et al.*, 2025). Adopsi metode pertanian cerdas dan modern tidak hanya meningkatkan efisiensi alokasi sumber daya, tetapi juga menjamin keberlanjutan ekonomi jangka panjang bagi sistem produksi pertanian (Idier *et al.*, 2024). Oleh sebab itu, dalam praktik pemanfaatan limbah menjadi agronomis yang aman dan terukur diperlukan penggabungan teknologi sensor dan otomasi menjadi kunci terpenting (Ocama *et al.*, 2025).

Integrasi ini bertumpu pada pengembangan sistem monitoring di bidang kualitas air. Sistem ini mampu mendeteksi parameter kritis seperti pH, konduktivitas listrik dan keberadaan senyawa logam berat secara *real-time* menggunakan jaringan sensor cerdas (Syu *et al.*, 2020). Pengaturan mekanisme dosing fertigation secara presisi dimulai dari ditangkapnya data lingkungan, selanjutnya diolah pada unit kontrol elektronik, di mana mekanisme ini memastikan bahwa campuran nutrisi cair yang diberikan pada tanaman selalu dalam komposisi yang optimal dan aman (Gianocacaro *et al.*, 2020). Penerapan mekanisme kontrol canggih ini berfungsi dalam memfasilitasi adopsi teknologi *Variable Rate Application (VRA)*, di mana laju aplikasi pupuk dapat disesuaikan secara otomatis dan responsif terhadap variabilitas input yang masuk (Al-Gaadi *et al.*, 2023). Selain peningkatan akurasi, peralatan

otomatis ini dirancang untuk meningkatkan pengolahan pertanian yang berkelanjutan dengan meminimalkan intervensi manual dan mencegah pemborosan sumber daya yang ada akibat *over-fertilization* atau pemupukan yang berlebih (Garzia *et al.*, 2023). Maka demikian, sinergi antara sensor pemantauan dan aktuator otomatis dapat menciptakan mekanisme pemanfaatan air lindi yang fluktuatif dengan pengaman yang terpenting (Syu *et al.*, 2020; García *et al.*, 2023)

Tinjauan literatur saat ini tentang air lindi mayoritas hanya berfokus pada studi mengenai karakterisasi polutan organik dan teknologi pengolahan fisika-kimiawi konvensional yang bertujuan untuk pembuangan yang aman (Abdel-Shafy *et al.*, 2024). Sebaliknya, ulasan mengenai sistem irigasi cerdas berbasis *Internet of Things (IoT)* umumnya terbatas pada konteks efisiensi penggunaan air bersih dan manajemen energi dalam pertanian, tanpa menyentuh aspek teknis pengelolaan limbah cair yang berisiko tinggi secara mendalam (Garcia *et al.*, 2020; Obaideen *et al.*, 2022).

Hingga saat ini, penelitian tentang sintesis literatur yang secara spesifik menghubungkan mekanisme sensor pemantauan kualitas air dengan strategi agronomis pemanfaatan air lindi sebagai sumber nutrisi masih belum banyak ditemukan. Kesenjangan ini mendasari

urgensi penulisan artikel review untuk memetakan potensi integrasi kedua domain tersebut dalam mendukung sistem pertanian sirkular yang aman dan berkelanjutan.

METODOLOGI PENELITIAN

Desain dan Strategi Pencarian

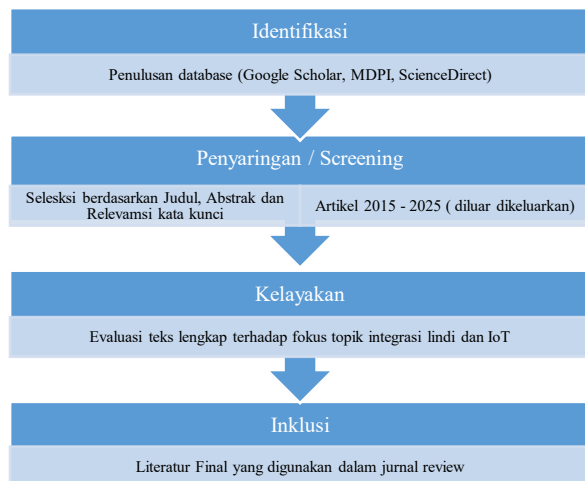
Studi ini menerapkan metode tinjauan literatur naratif dengan pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menyintesis penelitian yang relevan mengenai integrasi teknologi pada pengelolaan air lindi. Pencarian literatur berbasis data akademik bereputasi global dan nasional meliputi ScienceDirect, IEEE Xplore, MDPI, Google Scholar dan SpringerLink.

Strategi mekanisme pencarian data menggunakan teknik *Boolean Operators* dengan kombinasi kata kunci spesifik untuk menjaring dua domain utama: (1) Aspek Limbah air lindi dan (2) Aspek Teknologi/*IoT*. Kata kunci dalam pencarian meliputi:

- Bahasa Inggris: (“*Landfill Leachate*” / “*Wastewater Fertigation*”) and (“*Internet of Things*”/ “*Precision Agriculture*” / “*Smart Irrigation*” / “*Sensor*”)/
- Bahasa Indonesia : “Air lindi”. “Pertanian Presisi”, “Irigasi Otomatis”, “Sensor Kualitas Air”).

Untuk menjamin kemutakhiran dan validitas data yang dianalisis, proses penyaringan literatur difokuskan secara

ketat pada artikel jurnal ilmiah dan prosiding konferensi yang dipublikasikan dalam kurun waktu 10 tahun terakhir (2015-2025), dengan penekanan khusus pada studi lima tahun terakhir untuk aspek teknologi *IoT*. Berdasarkan hasil penelusuran dan penyaringan secara bertahap dimulai dari pemeriksaan judul, abstrak, hingga pembacaan isi, diperoleh sejumlah literatur final yang kemudian dianalisis secara deskriptif kualitatif untuk mengidentifikasi potensi, mekanisme teknis, dan tantangan implementasi sistem tersebut.



Gambar 1. Diagram alir skema pencarian

PEMBAHASAN

Profil Fisik – Kimia dan Kelayakan Agronomis Air Lindi

Karakteristik fisik-kimia air lindi sangat fluaktif dan dipengaruhi secara signifikan oleh usia timbunan sampah serta kondisi iklim di lokasi pembuangan akhir. Air lindi yang mentah atau muda pada umumnya memiliki karakteristik beban organik tinggi dengan rasio BOD/COD yang besar dan pH asam, sedangkan air

lindi yang sudah stabil, kandungan didominasi oleh senyawa organik rekalsitran dengan pH yang lebih basa (Lindamulla *et al.*, 2022). Penurunan biodegradabilitas pada air lindi tua tidak memengaruhi konsentrasi polutan anorganik seperti amonia, yang tetap persisten dan memerlukan pengolahan khusus (Wang and Qiao, 2024). Tinggi nilai *Chemical Oxygen Demand (COD)* dan keberadaan mikropolutan pada air lindi mentah atau yang belum diolah juga mengindikasikan potensi toksisitas yang signifikan bagi ekosistem jika tidak dikelola dengan baik (Anand and Palani, 2022). Variabilitas yang ada menuntut karakterisasi kandungan yang komprehensif untuk menentukan strategi pengolahan yang paling efektif dan efisien.

Pada aspek kesesuaian agronomis, air lindi menyimpan potensi sebagai sumber nutrisi tanaman, walaupun komposisi kandungan tidak sepenuhnya setara dengan pupuk komersial. Kadar kalium (K) dalam air lindi cukup signifikan, mencapai 3260 mg/L, namun kandungan nitrogen dan fosfor masih di bawah standar minimum Pupuk Organik Cair (POC). Standar POC pada total makronutrien di atas 2% atau sekitar 20.000 mg/L (Emadi Balaldehi, 2024). Baganna *et al.*, (2025) menekankan bahwa kendati air lindi dapat mendukung pertumbuhan vegetatif, penggunaannya pada irigasi harus waspada atau hati-hati

terhadap risiko salinitas tinggi dan akumulasi logam berat yang dapat meracuni tanah. Maka dari itu, diperlukan pengeceran dan pengolahan pendahuluan sebagai langkah yang penting untuk menurunkan toksitas sekaligus memanfaatkan kandungan komposisi nutrisi air lindi secara aman dan terkendali bagi tanaman (Emadi Balaldehi, 2024; Anand & Palani, 2022).

Teknologi Sensor dan Parameter Monitoring Kualitas Air

Monitoring terhadap parameter fisik-kimia air lindi merupakan langkah fundamental dalam mekanisme sistem ini karena kandungan limbah sangat fluktuatif dan bergantung pada umur tempat pembuangan akhir (Abdel-Shafy *et al.*, 2024). Standar parameter kritis yang wajib dipantau secara terus-menerus meliputi pengukuran keasaman (pH), konduktivitas listrik (EC), Chemical Oxygen Demand (COD), Biological Oxygen Demand (BOD), amonia – nitrogen dan logam berat, yang wajib dipantau secara ketat karena konsentrasi yang sering melebihi baku mutu aman bagi tanaman dan konsentrasi yang fluktuatif sesuai umur timbunan sampah (Wang dan Qiao, 2024). Keberadaan polutan organik refraktori dan potensi salinitas tinggi juga menjadi perhatian utama karena karakteristik sifat toksisitasnya dapat menyebabkan plasmolisis atau kematian pada akar jika dipakai tanpa adanya pengawasan (Xiang *et*

al., 2021). Maka dari itu, metode sistem monitoring konvensional yang hanya mengandalkan pengambilan sampel manual ke laboratorium dinilai tidak lagi memadai dalam mendukung keputusan irigasi yang membutuhkan respons cepat (Abdel-Shafy *et al.*, 2024). Air lindi harus memenuhi standar kelayakan agronomi sebelum dialirkan dalam sistem fertigasi karena itu merupakan penentuan parameter kunci dalam penggunaan air lindi (Wang & Qiao, 2024).

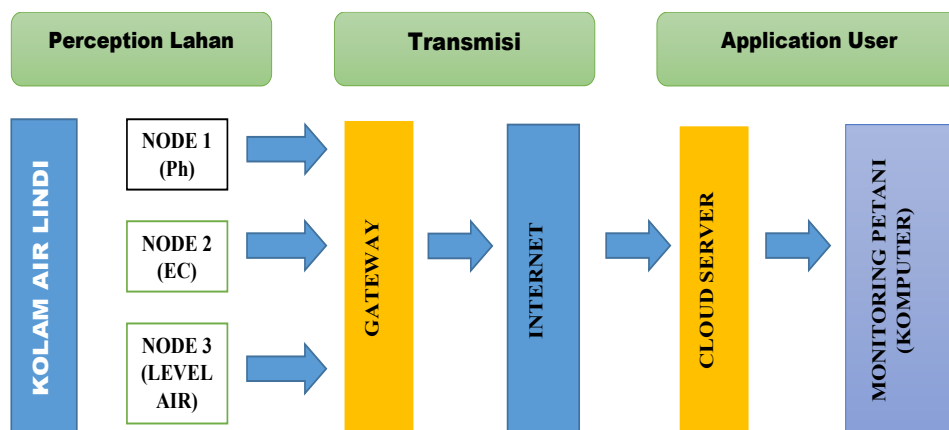
Dalam mengatasi keterbatasan uji laboratorium tersebut, integrasi teknologi sensor berbasis *Internet of Things (IoT)* dan penginderaan jauh menjadi solusi dalam pemantauan kualitas lingkungan secara *real-time* (Papale *et al.*, 2023). Mekanisme sistem ini menggunakan sensor elektrokimia in situ yang ditanam langsung di tempat penampungan untuk membaca parameter pH, suhu, dan kadar logam berat setiap detiknya (Syu *et al.*, 2020). Perkembangan teknologi modern seperti mikroelektronika dapat melahirkan sensor berbiaya rendah (*low-cost sensors*) yang akurat dan terjangkau bagi implementasi pertanian skala menengah (Garcia *et al.*, 2020). Potensi pemanfaatan citra satelit dan sensor *Synthetic Aperture Radar (SAR)* untuk memantau dampak sebaran air lindi terhadap vegetasi di sekitar area aplikasi dalam skala yang lebih luas dan pemantauan secara berkala (Papela *et al.*,

2023). Kombinasi antara pembacaan sensor mikro di lapangan dengan pemantauan makro memungkinkan untuk menghasilkan sistem peringatan dini yang responsif untuk mencegah pencemaran tanah akibat kesalahan dosis pemupukan (Syu *et al.*, 2020).

Arsitektur Jaringan *IoT* dan Protokol Transmisi Data

Arsitektur jaringan komunikasi data pada sistem pertanian cerdas terstruktur dalam beberapa lapisan utama seperti lapisan persepsi fisik, lapisan jaringan transmisi dan lapisan aplikasi pengguna (Garcia *et al.*, 2020). Pemilihan alat protokol komunikasi yang sesuai pada lapisan jaringan menjadi faktor utama dan krusial karena lokasi pemanfaatan air lindi berada di area luas dengan keterbatasan infrastruktur dan akses internet kabel (Islam

et al., 2021). Tinjauan literatur teknis menunjukkan efisiensi dalam transmisi paket data sensor yang kecil namun frekuentif dalam penggunaan protokol aplikasi seperti *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) dan *Constrained Application Protocol* (Glaroudis *et al.*, 2020). Selain efisiensi bandwidth, aspek keandalan dan keamanan pertukaran data secara real-time menjadi prioritas utama dalam mencegah kegagalan mekanisme kontrol otomatis saat deteksi fluaktif berbahaya pada kualitas air lindi (Tightiz & Yang, 2020). Maka dari itu, desain topologi jaringan harus menjamin interoperabilitas tinggi antar perangkat keras yang berbeda agar proses pemantauan lingkungan dapat berjalan secara kontinu dan terintegrasi penuh (Islam *et al.*, 2021).



Gambar 2. Arsitektur Topologi Jaringan *IoT* untuk Monitoring Kualitas Air Lindi

Dalam konteks implementasi di lahan terbuka yang luas, teknologi Low Power Wide Area Network (LPWAN) seperti LoRaWAN terbukti lebih baik

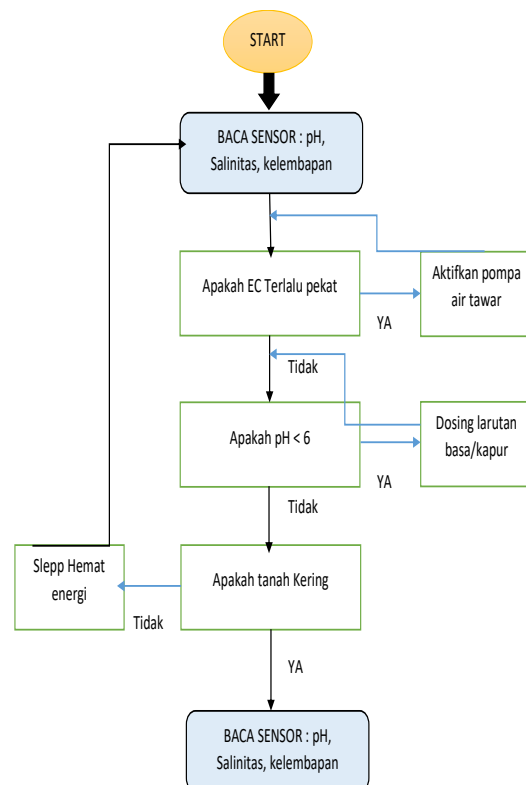
dibandingkan dengan Wi-Fi dikarenakan kemampuan dalam menjangkau jarak jauh dengan konsumsi baterai yang sedikit rendah (Glaroudis *et al.*, 2020). Studi

komparatif menyoroti bahwa penggunaan modul komunikasi berbasis Wi-Fi lebih boros energi, sehingga kurang praktis dalam penggunaan node nirkabel yang disebarkan di berbagai titik pada kolam air lindutan tanpa sumber daya listrik yang tetap (Garcia *et al.*, 2020). Guna mengatasi potensi kekosongan/blank spot sinyal pada area TPA yang terpencil, integrasi teknologi seluler modern sebagai gateway bergerak dapat menjadi solusi alternatif untuk meneruskan data ke server komputasi awan (Tightiz & Yang, 2020). Dengan demikian, pendekatan hibrida Zigbee untuk jaringan sensor lokal dan LoRaWAN untuk transmisi jarak jauh dinilai sebagai konfigurasi arsitektur yang paling efisien dan stabil dalam penerapannya (Garcia *et al.*, 2020).

Algoritma Kontrol Otomatis dan Strategi Pengambilan Keputusan

Efektivitas sistem kontrol yang otomatis dalam pertanian cerdas sangat bergantung pada penerapan komputasi tepi (*edge computing*) yang memungkinkan algoritma pemrosesan data dijalankan langsung pada node sensor untuk mengurangi latensi keputusan (Islam *et al.*, 2021). Arsitektur sistem harus mampu menerjemahkan data parameter lingkungan menjadi perintah aktuator yang presisi melalui proses mekanisme feedback loop yang menghubungkan sensor fisik dengan *cloud server* (García *et al.*, 2020).

Penerapan dalam hal protokol aplikasi yang ringan sangat penting untuk memastikan instruksi logika kontrol dapat dieksekusi oleh mikrokontroler dengan overhead data minimal, sehingga menjamin respons sistem yang cepat terhadap perubahan kualitas air (Glaroudis *et al.*, 2020).



Gambar 3. Diagram alir algoritma pengendalian kualitas dan fertigasi lindi otomatis

Dalam aspek keamanan eksekusi perintah, keandalan protokol komunikasi menjadi sangat penting dalam mencegah kegagalan transmisi sinyal pemutusan irigasi darurat saat algoritma mampu mendeteksi anomali berbahaya (Tightiz & Yang, 2020). Sejalan dengan pemikiran tersebut, Islam *et al.* (2021) berpendapat bahwa integrasi Unmanned Aerial Vehicles

(UAV) merupakan verifikator sekunder yang mendukung validitas keputusan algoritma pusat melalui pemantauan visual kondisi lahan secara real time. Penegasan dalam sistem manajemen keputusan harus dilengkapi dengan standar enkripsi data yang rinci dan ketat, yang berfungsi untuk melindungi integritas algoritma dari potensi manipulasi siber yang dapat merusak mekanisme sistem kerja yang sudah dirancang di lapangan (Garcia *et al.*, 2020).

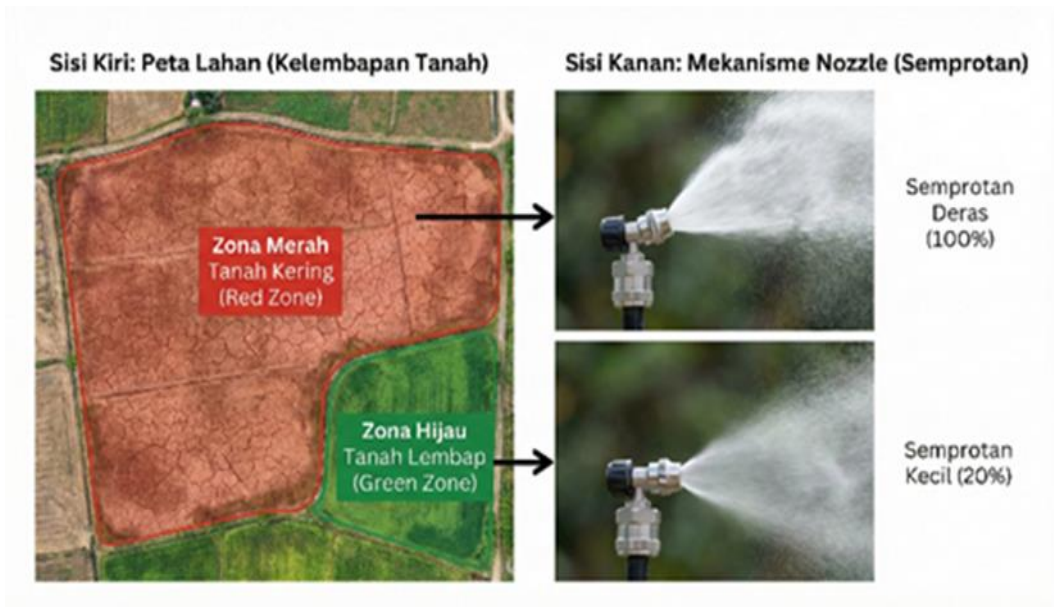
Dalam hal skalabilitas logika pemrograman, tantangan utama dalam implementasi algoritma cerdas lebih ke interoperabilitas antarperangkat keras yang berbeda, sehingga diperlukan lapisan middleware yang mampu dalam hal standardisasi logika pertukaran data kontrol (Glaroudis *et al.*, 2020). Pada masa depan algoritma dalam hal pengambilan keputusan harus didesain untuk mampu mengelola aliran *big data* secara simultan tanpa mengorbankan stabilitas operasional jaringan kontrol secara keseluruhan (Tightiz & Yang, 2020). Fleksibilitas algoritma merupakan kunci dalam logika kontrol yang diterapkan pada skala pilot yang dapat diduplikasi secara efisien ke sistem pengelolaan limbah pertanian yang lebih luas dan kompleks.

Strategi Fertigasi Presisi dan Variable Rate Application (VRA)

Implementasi fisik dari keputusan algoritma kontrol diwujudkan melalui

strategi *Variable Rate Application (VRA)* yang mendistribusikan nutrisi secara presisi berdasarkan variabilitas spasial lahan (Al-Gaadi *et al.*, 2023). Pendekatan manajemen nutrisi berdasarkan lokasi yang spesifik ini sangat krusial untuk memastikan bahwa dosis air lindi yang langsung diaplikasikan sesuai dengan kebutuhan riil tanaman di setiap zona mikro, sehingga mencegah risiko fitoksisitas maupun defisiensi hara (Vullaganti *et al.*, 2025). Teknologi VRA bekerja dengan integrasi data dari peta resep digital atau sensor on the go untuk mengatur debit keluaran aktuator dengan tingkat kesuburan yang berbeda (Al-Gaadi *et al.*, 2023). Keefektifan strategi sudah terbukti dibandingkan dengan mekanisme metode pemupukan konvensional yang dipupuk dengan dosis yang merata, karena mampu meminimalkan leaching nutrisi berlebih yang berpotensi menjadi pencemar air tanah di sekitar lahan aplikasi (Cai *et al.*, 2025). Adopsi teknologi pengolahan yang presisi ini tidak hanya mengoptimalkan efisiensi penggunaan pupuk cair dari air limbah, tetapi juga mampu menjamin keberlanjutan kesehatan tanah dalam jangka panjang (Vullganti *et al.*, 2025).

Tidak hanya pengaturan dosis spasial, efisiensi sistem dapat ditingkatkan melalui penjadwalan irigasi cerdas yang responsif terhadap air tanah secara *real time*



Gambar 4. Ilustrasi Konseptual mekanisme VRI pada lahan pertanian (Sumber: dihasilkan menggunakan GEMINI AI)

(Jamroen *et al.*, 2020). Logika fuzzy merupakan sistem kontrol yang dikembangkan untuk proses input dinamis dari jaringan sensor nirkabel, yang menghasilkan keputusan penyiraman yang adaptif sesuai perubahan cuaca/iklim yang tidak menentu (Jamroen *et al.*, 2020). Sistem mekanisme memastikan air lindi hanya dapat mengalir saat tanaman dalam kondisi defisit air, sehingga mencegah pemborosan sumber daya dan risiko *waterlogging* yang dapat membunuh akar (Al-Gaadi *et al.*, 2023). Integrasi antara VRI dan penjadwalan otonom ini membuat siklus manajemen tertutup yang dapat menyeimbangkan antara menjaga kelestarian lingkungan dan hasil produktivitas panen tetap tinggi (Cai *et al.*, 2025). Hasil penelitian yang ada di

lapangan dapat dikonfirmasi bahwa penerapan mekanisme sistem cerdas secara signifikan mampu mengubah konsumsi air dan energi dalam hal jumlah dibandingkan dengan irigasi berbasis tradisional (Jamroen *et al.*, 2020).

Analisis Resiko Toksisitas dan Dampak Lingkungan Jangka Panjang

Potensi nutrisi lindi cukup menjanjikan, akan tetapi matriks limbah ini mengandung senyawa organik refraktori dan logam berat yang bersifat persisten di lingkungan (Abdel-Shafy *et al.*, 2024). Aplikasi air lindi dalam jangka panjang tanpa kontrol pengolahan yang tepat dan ketat dapat menyebabkan akumulasi unsur berbahaya seperti kadmium (Cd) dan timbal (Pb) pada lapisan tanah atas (Topsoil), yang berpotensi terserap ke dalam jaringan

tanaman pangan (bioakumulasi) (Nyiramigisha *et al.*, 2021). Risiko biomagnifikasi menjadi perhatian utama dikarenakan polutan limbah dapat masuk ke rantai makanan dan membahayakan kesehatan manusia jika terlalu berlebihan atau di atas ambang toleransi (Nyiramigisha *et al.*, 2021). Maka dari itu, urgensi sistem mekanisme monitoring real-time yang dilengkapi algoritma keputusan otomatis apabila sensor mendeteksi kenaikan konsentrasi logam berat yang tinggi (Syu *et al.*, 2020). Tanpa adanya mekanisme proteksi berbasis teknologi, degradasi kualitas lahan pertanian yang disebabkan kontaminasi tanah menjadi ancaman yang serius dan sulit dipulihkan (Abdel-Shafy *et al.*, 2024).

Bukan hanya dampak risiko akumulasi kimiawi, dampak yang ditimbulkan secara biologis langsung terhadap fisiologi tanaman juga menjadi parameter kritis yang wajib dimitigasi. Air lindi yang belum diolah atau mentah memiliki indeks fitotoksitas yang tinggi, dimana paparan langsung tanpa pengenceran terbukti menghambat perkecambahan benih dan merusak perkembangan sistem perakaran (*Root Inhibition*) (Wdowczyk & Szymańska-Pulikowska, 2021). Efek toksitas ini berasal dari kadar amonia dan salinitas lindi yang tinggi yang menyebabkan tekanan osmotik berlebih,

sehingga akar gagal menyerap air dan nutrisi (Syu *et al.*, 2020). Rekomendasi proses pengenceran terkontrol sebagai strategi utama dalam meningkatkan nilai indeks perkecambahan (Germination Index) hingga ke level aman bagi budaya (Wdowczyk & Szymańska-Pulikowska, 2021). Integrasi sensor *IoT* berperan vital dalam memastikan bahwa rasio pencampuran air lindi yang diaplikasikan pada lahan selalu berada di bawah batas toksisitas tanaman (Nyiramigisha *et al.*, 2021).

Sintesis Studi Terdahulu dan Perbandingan Efektivitas Teknologi

Tinjauan literatur terkini menegaskan bahwa pergeseran paradigma manajemen air limbah dari hanya sekadar pembuangan lindi menjadi pemanfaatan sumber daya nutrisi sirkular yang didukung dengan pemanfaatan teknologi presisi. Sintesis berbagai studi literatur menunjukkan bahwa penerapan *Internet of Things (IoT)* dan sensor cerdas terbukti signifikan dalam meningkatkan efisiensi irigasi sekaligus mengurangi risiko toksisitas lingkungan melalui mekanisme sistem deteksi dini dan kontrol pengolahan otomatis. Rangkuman komprehensif mengenai fokus kajian, spesifikasi teknologi serta penerapan kunci dari 13 literatur utama yang dianalisis disajikan dalam matriks perbandingan pada tabel.

Tabel 1. Matriks sintesi literatur integrasi teknologi presisi dan pengelolaan limbah cair

No	Peneliti (Tahun)	Fokus Kajian	Metode Teknologi	Temuan Penting
1	Abdel-Shafy <i>et al.</i> , (2024)	Karakterisasi lindi	Analisis Fisik-Kimia	Lindi kaya akan nutrisi makro namun mengandung polutan organik persisten
2	Baganna <i>et al.</i> , (2025)	Potensi Nutrisi	Eksperimen Lab	Indetifikasi potensi recovery Nitrogen lindi, namun pH perlu distabilkan sebelum aplikasi
3	Syu <i>et al.</i> , (2020)	Monitoring Kualitas	WSN,Sensor,Ph,EC,Logam	Sistem otomatis deteksi fluktuasi logam berat secara real-time untuk peringatan dini
4	Giannocco <i>et al.</i> , (2020)	Kontrol Dosis	Arduino, Flow Sensor	Algoritma dosing otomatis efektif mencegah overdosis nutrisi dan menghemat penggunaan pupuk cair.
5	Al-Gaadi <i>et al.</i> , (2023)	Variable Rate App (VRA)	Gis, <i>Mapping</i>	Distribusi pupuk berbasis zonasi meningkatkan keseragaman panen dan mengurangi limbah
6	Vullaganti <i>et al.</i> , (2025)	Manajemen Nutrisi	Sensor Tanah	Pendekatan spesifik lokasi krusial untuk menyeimbangkan input nutrisi dan kesehatan tanah
7	Jamrean <i>et al.</i> , (2020)	Jadwal Irigasi	Fuzzy Logic, Wsn	Sistem irigasi cerdas berbasis fuzzy logic menghemat air dan energi dibanding sistem timer.
8	Garcia <i>et al.</i> , (2020)	Protokol <i>IoT</i>	Review Lora Vs Wifi	LoRaWAN lebih unggul dalam pertanian luas karena jangkauan jauh dan hemat daya baterai
9	Islam <i>et al.</i> , (2021)	Konektivitas	<i>IoT</i> & Drone (Uav)	Penggunaan UAV sebagai gateway bergerak efektif mengatasi area <i>blank spot</i> sinyal dilahan terpencil
10	Wdowczyk & S. (2021)	Resiko Biologis	Uji Fitotoksisitas	Lindi mentah menghambat perkecambahan, pengeceran otomatis mutlak diperlukan untuk keamanan
11	Nyiramigisha <i>et al.</i> , (2021)	Akumulasi Logam	Analisis Tanah	Aplikasi lindi tanpa kontrol menyebabkan akumulasi Cd/Pb di <i>Topsoil</i> yang berbahaya bagi rantai makanan
12	Ocama <i>et al.</i> , (2025)	Hambatan Adopsi	Review Teknologi	Tantangan utama implementasi <i>IoT</i> dinegara berkembang adalah biaya awal dan stabilitas koneksi
13	Martinez Garcia (2023)	Keberlanjutan	Otomasi Hardware	Desain alat otomatis harus memprioritaskan efisiensi energi dan kemudahan perawatan (<i>Maintenance</i>).

Tabel 1 mengindikasikan bahwa penelitian telah bergerak dari sekadar

analisis laboratorium statis menuju sistem pemantauan modern menggunakan *IoT*. Inti

dari yang didapat adalah bahwa keberhasilan suatu agronomis dalam pemanfaatan air lindi sangat bergantung pada kemampuan sistem untuk melakukan intervensi korektif secara otonom, baik melalui pengenceran otomatis maupun pemutusan irigasi darurat. Integrasi teknologi tersebut (Sensor, VRA, dan Fuzzy Logic) menawarkan solusi komprehensif yang tidak hanya menjawab tantangan variabilitas nutrisi air lindi, tetapi juga menjamin keamanan pangan dan kelestarian fungsi tanah dalam jangka panjang.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan tinjauan sistematis terhadap literatur, studi ini menyimpulkan bahwa *Internet of Things (IoT)* dan teknologi pertanian presisi merupakan kunci utama untuk mengubah air lindi dari limbah berbahaya atau toksisitas menjadi bahan sumber daya agronomis yang bernilai dan bermanfaat. Analisis menunjukkan bahwa air lindi mempunyai potensi substitusi pupuk cair karena kandungan makronutrien (N, P, K) yang tinggi, namun penggunaannya dibatasi oleh fluktuasi toksisitas dan kandungan logam berat. Penerapan arsitektur sistem berbasis *Internet of Things (IoT)* yang mencakup sensor pemantauan kualitas air secara real time, algoritma kontrol dosing otomatis dan VRA terbukti dalam mitigasi risiko

lingkungan secara efektif. Teknologi ini dapat melakukan intervensi dini, seperti pengenceran otomatis saat salinitas meningkat atau pemutusan aliran irigasi saat terdeteksi kontaminan. Dengan model integrasi, maka dapat menawarkan solusi pembaruan dalam menyeimbangkan efisiensi hasil produktivitas pertanian dengan standar keamanan lingkungan yang ketat.

Tantangan dan Arah Riset Masa Depan

Meskipun kerangka kerja konseptual telah terbentuk, tinjauan ini mengidentifikasi beberapa celah riset (*Research Gaps*) yang perlu menjadi fokus penelitian selanjutnya:

- 1) Ketahanan Sensor: Riset mendalam diperlukan dalam mengembangkan sensor berbiaya rendah dengan fitur *self-cleaning*, mengingat sensor standar rentan mengalami kerak saat terpapar air lindi organik dalam jangka waktu lama.
- 2) Studi dampak longitudinal: Mayoritas studi review berdurasi pendek. Diperlukan studi lapangan jangka panjang (>5 tahun) untuk evaluasi dampak akumulatif residu air lindi terhadap mikrobioma tanah dan kualitas air tanah di sekitar lahan aplikasi.
- 3) Analisis Tekno Ekonomi: Kajian mengenai kelayakan finansial implementasi sistem *Internet of Things (IoT)* bagi petani skala kecil masih

minim, sehingga model bisnis atau subsidi silang pengelolaan limbah perlu dirumuskan agar teknologi dapat diadopsi secara luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Shafy, H. I., Ibrahim, A. M., Al-Sulaiman, A. M., & Okasha, R. A. (2024). Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(1). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102293>
- Al-Gaadi, K. A., Tola, E. K., Alameen, A. A., Madugundu, R., Marey, S. A., Zeyada, A. M., & Edris, M. K. (2023). Control and monitoring systems used in variable rate application of solid fertilizers: A review. *Journal of King Saud University – Science*, 35(3). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102574>
- Anand, N., & Palani, S. G. (2022). *A Comprehensive Investigation of Toxicity and Pollution Potential of Municipal Solid Waste Landfill Leachate*. Environmental Biotechnology Laboratory, Department of Biological Sciences, BITS Pilani, Hyderabad Campus, Jawahar Nagar, Kapra Mandal, Medchal District, Hyderabad, Telangana - 500078, India <https://ssrn.com/abstract=4050396>
- Baganna, T., Choukri, A., & Fares, K. (2025). Sustainable Treatment of Landfill Leachate Using Sugar Lime Sludge for Irrigation and Nitrogen Recovery. *Nitrogen*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/nitrogen6020037>
- Cai, B., Shi, F., Geremew, B. A., Addis, A. K., Abate, M. C., Dessie, W., & Bayu, T. (2025). Precision agriculture techniques for optimizing chemical fertilizer use and environmental sustainability: a systematic review. *Frontiers in Agronomy*, 7. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1665444>
- Emadi Balaladehi, S. M. (2024). The effect of landfill leachate irrigation on different soil characteristics and plant nutrition: a review. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(2), 33–54. <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12503.1246>
- García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2020). IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors*, 20(4). <https://doi.org/10.3390/s20041042>
- Giannoccaro, N. I., Persico, G., Strazzella, S., Lay-Ekuakille, A., & Visconti, P. (2020). A System for Optimizing Fertilizer Dosing in Innovative Smart Fertigation Pipelines: Modeling, Construction, Testing and Control. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21(8), 1581–1596. <https://doi.org/10.1007/s12541-020-00349-1>
- Islam, N., Rashid, M. M., Pasandideh, F., Ray, B., Moore, S., & Kadel, R. (2021). A review of applications and communication technologies for Internet of Things (IoT) and unmanned aerial vehicle (UAV) based sustainable smart farming. *Sustainability*, 13(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su13041821>
- Jamroen, C., Komkum, P., Fongkerd, C., & Krongpha, W. (2020). An intelligent irrigation scheduling system using low-cost wireless sensor network toward sustainable and precision agriculture. *IEEE Access*, 8, 172756–172769. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025590>
- Lindamulla, L., Nanayakkara, N., Othman, M., Jinadasa, S., Herath, G., & Jegatheesan, V. (2022). Municipal solid waste landfill leachate characteristics and their treatment options in tropical countries. *Current*

- Pollution Reports*, 8, 273–287
<https://doi.org/10.1007/s40726-022-00222-x>
- Lucero-Sorbazo, D., Beltrán-Villavicencio, M., González-Aragón, A., & Vázquez-Morillas, A. (2022). Recycling of nutrients from landfill leachate: A case study. *Heliyon*, 8(5).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09540>
- Martínez García, M., Ramos Cabral, S., Pérez Zúñiga, R., & Martínez Rodríguez, L. C. G. (2023). Automatic equipment to increase sustainability in agricultural fertilization. *Agriculture*, 13(2).
<https://doi.org/10.3390/agriculture13020490>
- Nasiro, K., & Mohammednur, T. (2024). precision nutrient management amid climate change challenges: a review. *Science Frontiers*, 5(3), 110–122.
<https://doi.org/10.11648/j.sf.20240503.12>
- Obaideen, K., Yousef, B. A. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., & Ramadan, M. (2022). An overview of smart irrigation systems using *IoT*. *Energy Nexus*, 7.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124>
- Ocama, O.V., Medagbe, Y.C. N., Akello, S., Kambale, W. V., Tashev, T., Kyamakya, K., & Kasereka, S. K. (2025). A review on advancing technologies in precision agriculture: applications, challenges, and the way forward. *Procedia Computer Science* 265, 572–577
- Papale, L. G., Guerrisi, G., de Santis, D., Schiavon, G., & del Frate, F. (2023). Satellite data potentialities in solid waste landfill monitoring: review and case studies. *Sensors*, 23(8).
<https://doi.org/10.3390/s23083917>
- Romero, C., Ramos, P., Costa, C., & Carmen Márquez, M. (2013). Raw and digested municipal waste compost leachate as potential fertilizer: Comparison with a commercial fertilizer. *Journal of Cleaner Production*, 59, 73–78.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.044>
- Syu, W. J., Chang, T. K., & Pan, S. Y. (2020). Establishment of an automatic real-time monitoring system for irrigation water quality management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3).
<https://doi.org/10.3390/ijerph17030737>
- Tightiz, L., & Yang, H. (2020). A comprehensive review on *IoT* protocols' features in smart grid communication. *Energies*, 13(11).
<https://doi.org/10.3390/en13112762>
- Vullaganti, N., Ram, B. G., & Sun, X. (2025). Precision agriculture technologies for soil site-specific nutrient management: A comprehensive review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 15(2), 147–161.
<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2025.02.001>
- Wang, J., & Qiao, Z. (2024). A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies. *Frontiers in Environmental Science*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1439128>
- Wdowczyk, A., & Szymańska-Pulikowska, A. (2021). Comparison of landfill leachate properties by LPI and Phytotoxicity- a case study. *Frontiers in Environmental Science*, 9.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.693112>
- Xiang, R., Wei, W., Mei, T., Wei, Z., Yang, X., Liang, J., & Zhu, J. (2025). A review on landfill leachate treatment technologies: comparative analysis of methods and process innovation. *Applied Sciences*, 15(7).
<https://doi.org/10.3390/app15073878>