



Model Integratif Pengelolaan Air Presisi Berbasis AWD Embung IoT untuk Padi Lahan Kering pada Musim Tanam Kedua: A Systematic Literature Review dan Implikasi Kebijakan di Lombok Tengah

Lalu Kurniawan¹, Bangkit Maulana¹, Firda Aulia¹, Misbahuddin², Muhammad Husni Idris¹

¹Program Studi Magister Pertanian Lahan Kering, Program Pascasarjana, Universitas Mataram, Jalan Majapahit No. 62, Gomong, Kota Mataram, Indonesia 83125.

²Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jalan Majapahit No. 62, Gomong, Kota Mataram, Indonesia 83125.

Email Korespondensi: kurniawanlalu89@gmail.com

Abstrak

Keterbatasan ketersediaan air pada musim tanam kedua (MT 2) menjadi kendala utama budidaya padi di wilayah semi-arid seperti Kabupaten Lombok Tengah. Berbagai teknologi pengelolaan air, seperti *Alternate Wetting and Drying* (AWD), embung, dan *Internet of Things* (IoT), telah dikembangkan, namun umumnya masih dikaji secara terpisah. Penelitian ini bertujuan menyusun model integratif pengelolaan air berbasis AWD–Embung–IoT serta merumuskan implikasi kebijakan untuk mendukung penerapannya pada budidaya padi di wilayah semi-arid. Kajian menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) terhadap artikel yang diperoleh dari Google Scholar melalui Publish or Perish (PoP), ScienceDirect, dan Web of Science pada periode 2020–2025. Proses seleksi mengikuti pedoman PRISMA dan menghasilkan 25 artikel yang memenuhi kriteria sintesis. Hasil kajian menunjukkan bahwa AWD dilaporkan mampu menghemat penggunaan air irigasi sebesar 25–70%, embung berperan sebagai penyedia cadangan air selama periode defisit, sedangkan IoT mendukung pemantauan dan pengambilan keputusan irigasi secara real-time. Berdasarkan sintesis literatur, integrasi ketiga komponen tersebut berpotensi membentuk sistem pengelolaan air presisi yang menghubungkan aspek *demand*, *supply*, dan *control* dalam suatu *closed-loop adaptive system*. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan kerangka konseptual *demand–supply–control* sebagai dasar pengelolaan air presisi pada budidaya padi di wilayah semi-arid.

Kata kunci: AWD; Embung; IoT; *Closed-Loop Adaptive System*; Pengelolaan Air Presisi; Padi.

An Integrative Model of Precision Water Management Based on AWD Reservoir IoT for Dryland Rice during the Second Cropping Season: A Systematic Literature Review and Policy Implications in Central Lombok

Abstract

Limited water availability during the second cropping season (MT 2) is a major constraint to rice production in semi-arid regions such as Central Lombok Regency, Indonesia. Various water management technologies, including *Alternate Wetting and Drying* (AWD), farm ponds, and the *Internet of Things* (IoT), have been developed to improve water-use efficiency; however, these approaches are generally studied separately. This study aimed to develop an integrated AWD–Farm Pond–IoT water management model and formulate policy implications to support its implementation in semi-arid rice production systems. A *Systematic Literature Review* (SLR) was conducted using articles retrieved from Google Scholar through Publish or Perish (PoP), ScienceDirect, and Web of Science published between 2020 and 2025. The selection process followed PRISMA guidelines and resulted in 25 articles that met the synthesis criteria. The review found that AWD has been reported to reduce irrigation water use by 25–70%, farm ponds function as water storage facilities during deficit periods, and IoT supports real-time monitoring and irrigation decision-making. Based on the literature synthesis, integrating these three components has the potential to establish a precision water management system linking demand, supply, and control within a *closed-loop adaptive system*. The main contribution of this study is the development of a conceptual *demand–supply–control* framework as a foundation for precision water management in rice cultivation under semi-arid conditions.

Keywords: Hypertension; Digital Media; Self-Care; Educational Videos.

How to Cite: Kurniawan, L., Maulana, B. ., Aulia, F., Misbahuddin, M., & Idris, M. H. (2026). Model Integratif Pengelolaan Air Presisi Berbasis AWD Embung IoT untuk Padi Lahan Kering pada Musim Tanam Kedua: A Systematic Literature Review dan Implikasi Kebijakan di Lombok Tengah. *Empiricism Journal*, 7(2), 2215-2235. <https://doi.org/10.36312/ej.v7i2.4870>



<https://doi.org/10.36312/ej.v7i2.4870>

Copyright© 2026, Kurniawan et al.

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



PENDAHULUAN

Ketersediaan air merupakan determinan utama dalam keberhasilan budidaya padi, tidak hanya sebagai input produksi, tetapi juga sebagai faktor yang secara langsung mengendalikan proses fisiologis tanaman, seperti perkembangan akar, pembentukan anakan, serta pengisian bulir. Secara global, sistem budidaya padi konvensional dengan genangan kontinu (continuous flooding) dikenal sebagai salah satu sistem pertanian dengan kebutuhan air tertinggi, dimana untuk menghasilkan 1 Kg beras membutuhkan 2500 liter air (Bwire et al., 2024). Selain tidak efisien, sistem ini juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca, terutama metana, serta degradasi kualitas tanah dalam jangka panjang (Anapalli et al., 2023; Hang et al., 2022). Dalam konteks meningkatnya tekanan terhadap sumber daya air akibat perubahan iklim dan kelangkaan air (*water scarcity*), pengelolaan air dalam budidaya padi perlu direorientasikan menuju pendekatan yang lebih efisien, presisi, dan berkelanjutan.

Tantangan pengelolaan air menjadi semakin kompleks pada sistem budidaya padi di lahan kering, yang secara inheren memiliki keterbatasan sumber air dan sangat bergantung pada curah hujan. Variabilitas iklim yang tinggi menyebabkan ketidakpastian ketersediaan air, sehingga meningkatkan risiko kekeringan terutama pada fase pertumbuhan kritis tanaman. Kekurangan air pada fase vegetatif awal (pembentukan anakan) dan fase generatif (pembungaan dan pengisian bulir) terbukti menurunkan jumlah anakan produktif, meningkatkan gabah hampa, serta menurunkan hasil secara signifikan (Jarin et al., 2024). Dengan demikian, permasalahan utama dalam sistem ini tidak hanya terletak pada keterbatasan air, tetapi pada ketidakmampuan mengelola air secara presisi sesuai dengan kebutuhan fisiologis tanaman.

Permasalahan tersebut mencapai titik paling kritis pada musim tanam kedua (MT 2), yaitu periode setelah berakhirnya musim hujan utama yang dicirikan oleh curah hujan rendah (umumnya <100 mm/bulan) dan peningkatan evapotranspirasi. Pada kondisi ini, ketersediaan air alami tidak lagi mampu memenuhi kebutuhan tanaman, sehingga terjadi defisit air yang signifikan (Zhu et al., 2025). Oleh karena itu, pada periode MT 2 dapat diposisikan sebagai *bottleneck* dalam sistem produksi padi lahan kering, di mana kegagalan pengelolaan air pada periode ini akan berdampak langsung terhadap penurunan produktivitas secara sistemik.

Kondisi tersebut sangat relevan pada wilayah semi-arid seperti Kabupaten Lombok Tengah, Provinsi Nusa Tenggara Barat, yang dicirikan oleh distribusi curah hujan yang tidak merata, periode kering yang relatif panjang, serta tingginya ketergantungan sektor pertanian terhadap ketersediaan air hujan dan tampungan air. Sebagai salah satu sentra produksi padi di Provinsi Nusa Tenggara Barat, Lombok Tengah menghadapi tantangan serius dalam menjaga kontinuitas pasokan air terutama pada musim tanam kedua (MT 2), ketika curah hujan mulai menurun sementara kebutuhan air tanaman masih tinggi. Dalam beberapa tahun terakhir, kejadian kekeringan secara berulang dilaporkan mengganggu pertanaman padi pada sejumlah kecamatan dan menyebabkan penurunan luas tanam pada periode MT 2. Kondisi ini menunjukkan bahwa keterbatasan air bukan hanya menjadi kendala teknis pada tingkat budidaya, tetapi telah berkembang menjadi isu strategis yang memengaruhi stabilitas produksi pangan daerah. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengelolaan air yang mampu menjamin keseimbangan antara kebutuhan air tanaman, ketersediaan sumber air, dan ketepatan pengambilan keputusan irigasi secara adaptif sesuai dinamika lingkungan.

Sebagai respons terhadap keterbatasan tersebut, pendekatan irigasi *Alternate Wetting and Drying* (AWD) berkembang sebagai strategi pengelolaan air yang lebih efisien. AWD merupakan teknik irigasi berbasis ambang batas kelembaban tanah (*soil moisture threshold*) yang memungkinkan terjadinya siklus basah–kering secara terkontrol. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan air, tetapi juga memperbaiki aerasi tanah dan mendorong perkembangan akar yang lebih dalam. Berbagai studi menunjukkan bahwa AWD mampu menghemat air irigasi sebesar 25–70% tanpa penurunan hasil yang signifikan (Ishfaq et al., 2020), serta mampu meningkatkan produktivitas air dalam kondisi tertentu (Vicente et al. 2025). Namun demikian, keberhasilan AWD sangat bergantung pada ketepatan dalam menjaga kelembaban tanah pada ambang kritis, yang menjadi tantangan utama terutama pada kondisi MT 2 yang memiliki fluktuasi ketersediaan air yang tinggi.

Dalam konteks lahan kering, keterbatasan sumber air menuntut adanya sistem penyimpanan air yang mampu menjamin ketersediaan air selama periode defisit. Embung (*farm pond*) berperan sebagai infrastruktur strategis dalam menampung dan menyediakan air untuk kebutuhan irigasi. Pemanfaatan embung terbukti mampu meningkatkan ketahanan sistem pertanian terhadap kekeringan serta menjaga stabilitas produksi (Koide *et al.* 2021; Panwar *et al.* 2023). Namun, pengelolaan embung secara konvensional masih bersifat statis, sehingga belum mampu mendistribusikan air secara adaptif sesuai dengan kebutuhan tanaman yang dinamis, khususnya dalam mendukung implementasi AWD.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memberikan peluang untuk meningkatkan presisi dalam pengelolaan air melalui pemantauan kondisi lingkungan secara *real-time*. Teknologi ini memungkinkan pengukuran parameter penting seperti kelembaban tanah, tinggi muka air, dan kondisi mikroklimat secara kontinu, sehingga keputusan irigasi dapat dilakukan secara tepat waktu dan berbasis data. Implementasi sistem berbasis IoT dalam irigasi terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air serta mendukung sistem pertanian presisi (*precision agriculture*) (Ahmed *et al.*, 2023; García *et al.*, 2020). Selain itu, integrasi IoT memungkinkan otomatisasi pengelolaan air yang lebih adaptif terhadap dinamika lingkungan (Y. Zhang *et al.*, 2025).

Perkembangan penelitian dalam lima tahun terakhir menunjukkan peningkatan perhatian terhadap efisiensi penggunaan air pada budidaya padi melalui berbagai pendekatan teknologi dan manajemen. Namun, sebagian besar studi masih berfokus pada optimalisasi komponen tertentu dalam sistem pengelolaan air. Penelitian AWD umumnya menitikberatkan pada pengaturan kebutuhan air tanaman dan efisiensi penggunaan air di tingkat lahan, sementara studi mengenai embung lebih banyak mengkaji aspek penyediaan dan penyimpanan air sebagai strategi konservasi sumber daya air. Di sisi lain, pengembangan IoT cenderung diarahkan pada peningkatan akurasi monitoring dan otomatisasi irigasi. Meskipun masing-masing pendekatan menunjukkan manfaat yang signifikan, hubungan fungsional antara kebutuhan air tanaman (*water demand*), ketersediaan sumber air (*water supply*), dan mekanisme pengambilan keputusan (*water control*) masih jarang dianalisis secara terpadu dalam satu kerangka sistem pengelolaan air.

Meskipun demikian, literatur yang tersedia masih menunjukkan adanya kesenjangan konseptual yang penting. Sebagian besar penelitian mengkaji AWD, embung, dan IoT sebagai komponen yang berdiri sendiri, sehingga belum mampu menjelaskan bagaimana ketiga komponen tersebut dapat berinteraksi dalam suatu sistem pengelolaan air yang adaptif. Akibatnya, pengelolaan air masih cenderung dilakukan secara terfragmentasi, di mana kebutuhan air tanaman, ketersediaan sumber air, dan keputusan irigasi dikelola melalui mekanisme yang terpisah. Padahal, pada kondisi musim tanam kedua (MT 2) yang dicirikan oleh tingginya risiko defisit air, efektivitas pengelolaan air sangat ditentukan oleh kemampuan sistem dalam menyelaraskan ketiga aspek tersebut secara simultan. Hingga saat ini, masih sangat terbatas kajian yang mengembangkan kerangka pengelolaan air berbasis interaksi *demand–supply–control* sebagai suatu sistem umpan balik tertutup (*closed-loop adaptive system*) yang mampu merespons perubahan kondisi tanaman dan lingkungan secara dinamis.

Selain kesenjangan konseptual, terdapat pula kesenjangan pada aspek kebijakan. Implementasi teknologi pengelolaan air tidak hanya ditentukan oleh efektivitas teknis, tetapi juga oleh dukungan kelembagaan, pembiayaan, serta kapasitas sumber daya manusia. Studi menunjukkan bahwa adopsi teknologi pertanian digital sangat dipengaruhi oleh keselarasan antara inovasi teknologi dan kerangka kebijakan yang mendukung (Manzoor *et al.*, 2025; Shang *et al.*, 2021). Namun demikian, integrasi antara inovasi teknologi pengelolaan air dengan kebijakan pertanian masih belum banyak dikaji secara sistematis, terutama dalam konteks wilayah dengan keterbatasan sumber daya air.

Dalam konteks implementasi, kebutuhan akan sistem pengelolaan air yang adaptif menjadi semakin penting pada wilayah semi-arid seperti Kabupaten Lombok Tengah. Karakteristik wilayah yang rentan terhadap defisit air pada musim tanam kedua menjadikan integrasi antara kebutuhan air tanaman, ketersediaan sumber air, dan sistem pengambilan keputusan berbasis data sebagai prasyarat penting untuk mendukung keberlanjutan produksi padi.

Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, kajian ini diarahkan untuk menjawab beberapa pertanyaan mendasar, yaitu: (1) bagaimana peran irigasi Alternate Wetting and Drying (AWD) dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air pada budidaya padi di bawah kondisi keterbatasan air; (2) bagaimana kontribusi embung dalam menjamin kontinuitas pasokan air selama periode defisit air pada musim tanam kedua (MT 2); (3) bagaimana teknologi Internet of Things (IoT) mendukung pengambilan keputusan irigasi yang lebih presisi melalui pemantauan kondisi lahan dan sumber air secara real-time; (4) bagaimana ketiga komponen tersebut dapat diintegrasikan ke dalam suatu kerangka pengelolaan air berbasis demand–supply–control yang adaptif; serta (5) implikasi kebijakan apa yang diperlukan untuk mendukung implementasi model tersebut pada wilayah semi-arid seperti Kabupaten Lombok Tengah. Untuk menjawab pertanyaan penelitian tersebut, diperlukan suatu kerangka konseptual yang mampu mengintegrasikan kebutuhan air tanaman, ketersediaan sumber air, dan sistem pengambilan keputusan ke dalam satu sistem pengelolaan air yang adaptif.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini menawarkan kebaruan berupa pengembangan model integratif pengelolaan air yang tidak hanya menggabungkan AWD, embung, dan IoT sebagai komponen teknologi, tetapi menempatkannya dalam kerangka fungsional demand–supply–control yang saling terhubung. Dalam model ini, AWD merepresentasikan kebutuhan air tanaman (demand), embung berperan sebagai penyedia cadangan air (supply), sedangkan IoT berfungsi sebagai sistem pengambilan keputusan berbasis data (control) yang menghubungkan kedua komponen tersebut melalui mekanisme umpan balik (feedback mechanism). Dengan pendekatan ini, pengelolaan air tidak lagi dipandang sebagai serangkaian intervensi yang berdiri sendiri, melainkan sebagai suatu sistem adaptif berbasis data yang mampu merespons perubahan kondisi tanaman, tanah, dan sumber air secara real-time.

Penelitian ini memberikan kontribusi pada tiga aspek utama. Pertama, kontribusi teoritis melalui pengembangan kerangka konseptual demand–supply–control sebagai dasar pengelolaan air presisi pada budidaya padi lahan kering. Kedua, kontribusi metodologis melalui sintesis sistematis terhadap literatur AWD, embung, dan IoT yang selama ini berkembang secara terpisah. Ketiga, kontribusi praktis melalui penyusunan implikasi kebijakan yang mendukung implementasi sistem pengelolaan air adaptif pada wilayah semi-arid. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk merumuskan model integratif pengelolaan air yang mampu menjembatani kebutuhan air tanaman, ketersediaan sumber air, dan sistem pengambilan keputusan berbasis data melalui sintesis sistematis literatur AWD, embung, dan IoT, serta menyusun implikasi kebijakan yang relevan untuk mendukung pengelolaan air yang lebih adaptif pada musim tanam kedua di wilayah semi-arid seperti Kabupaten Lombok Tengah.

METODE

Jenis dan Pendekatan Kajian

Kajian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mensintesis penelitian terkait integrasi pengelolaan air berbasis *Alternate Wetting and Drying* (AWD), infrastruktur tampungan air (*embung/farm pond*), dan teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air dan produktivitas padi lahan kering. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh pemahaman komprehensif mengenai sistem integratif *demand–supply–control* tanpa melakukan eksperimen lapangan.

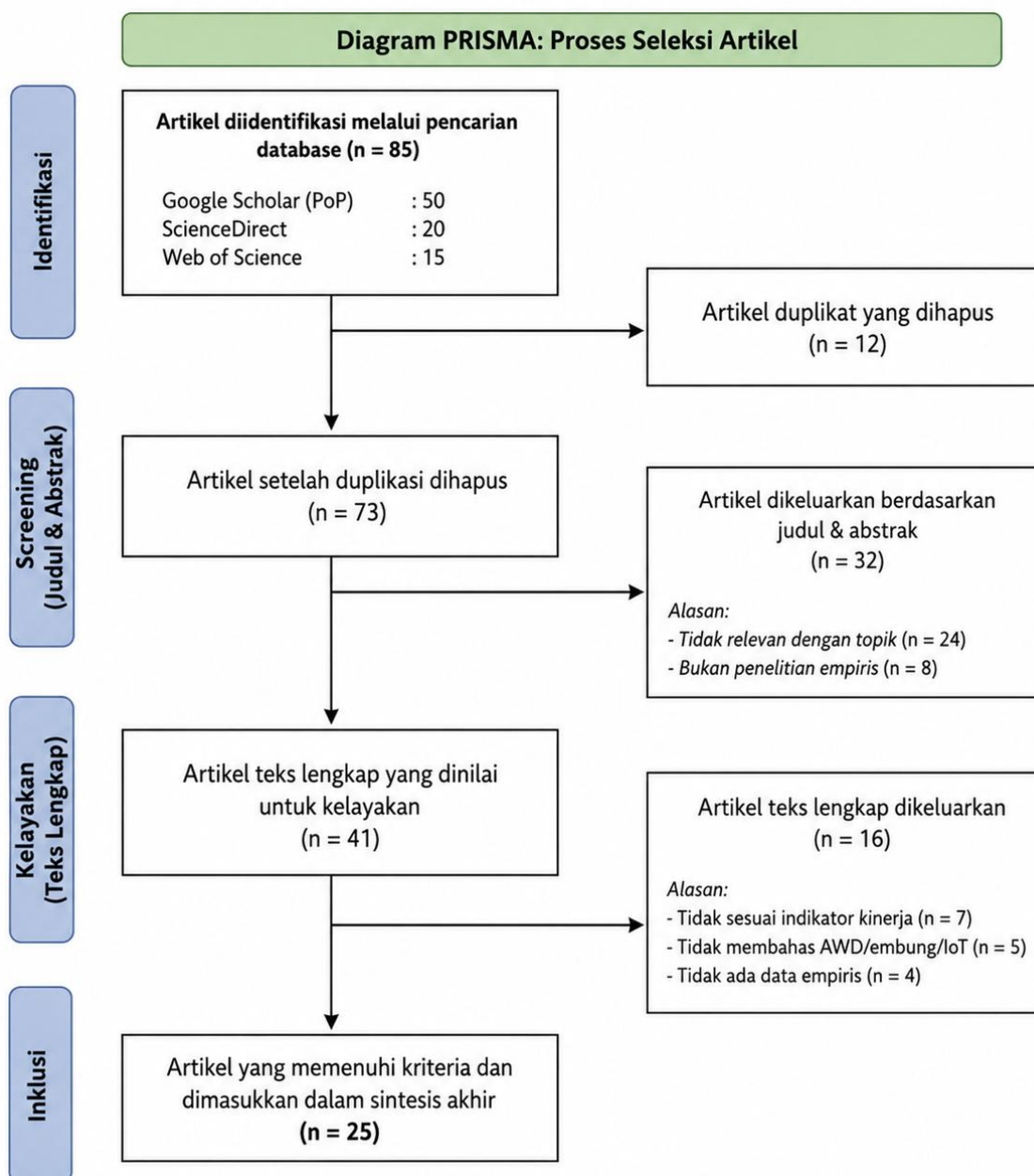
Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan menggunakan *Publish or Perish* (PoP) berbasis *Google Scholar*, serta dilengkapi dengan database *ScienceDirect* dan *Web of Science*, dengan rentang publikasi tahun 2020–2025. Mengingat tujuan penelitian adalah membangun model integratif dari beberapa domain yang selama ini berkembang secara terpisah, strategi pencarian dilakukan menggunakan pendekatan berbasis klaster tematik. Klaster pertama mencakup penelitian mengenai *Alternate Wetting and Drying* (AWD) dan efisiensi penggunaan air pada budidaya padi. Klaster kedua mencakup embung (*farm pond*), *water harvesting*, dan sistem penyediaan air pertanian. Klaster ketiga mencakup *Internet of Things* (IoT), *smart irrigation*, dan *precision agriculture*. Klaster keempat mencakup *dryland rice* dan

rainfed rice sebagai konteks agroekologi. Klaster kelima mencakup aspek kebijakan, adopsi teknologi, dan tata kelola pengelolaan air. Hasil pencarian dari masing-masing klaster kemudian digabungkan dan disintesis secara tematik untuk membangun kerangka konseptual pengelolaan air berbasis *demand–supply–control*.

Proses Seleksi dan Penilaian Literatur

Hasil pencarian awal menghasilkan sekitar 85 artikel, yang kemudian diseleksi melalui tahapan *screening* berdasarkan judul, abstrak, dan teks lengkap (*full text*). Proses ini mempertimbangkan relevansi topik, kualitas metodologis, dan kesesuaian dengan fokus penelitian. Dari proses seleksi tersebut diperoleh 25 artikel utama yang memenuhi kriteria sintesis.



Gambar 1. Diagram PRISMA

Proses identifikasi, screening, eligibility, dan inclusion mengikuti pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Dari 85 artikel yang teridentifikasi pada tahap awal, dilakukan penghapusan artikel duplikat, screening judul dan abstrak, serta penilaian kelayakan berdasarkan teks lengkap hingga diperoleh 25 artikel yang memenuhi kriteria sintesis.

Untuk meningkatkan transparansi dan mengurangi subjektivitas seleksi, setiap artikel yang lolos tahap full-text review dievaluasi menggunakan lima kriteria kualitas, yaitu: (1)

dipublikasikan pada jurnal peer-reviewed, (2) memiliki metode penelitian yang dijelaskan secara jelas, (3) menyajikan data empiris atau hasil pengukuran, (4) memuat indikator yang relevan dengan pengelolaan air seperti water use efficiency, produktivitas, atau ketahanan terhadap kekeringan, dan (5) memberikan kontribusi terhadap pengembangan model demand–supply–control.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel *peer-reviewed* yang membahas pengelolaan air pada padi lahan kering/tadah hujan; (2) studi yang mengkaji AWD/intermittent irrigation, embung atau sistem tampungan air, serta IoT atau irigasi cerdas; (3) penelitian dengan data empiris terkait efisiensi air, produktivitas, atau stabilitas hasil; serta (4) publikasi berbahasa Indonesia atau Inggris. Kriteria eksklusi mencakup artikel tanpa data empiris, laporan non-ilmiah, dan studi yang tidak relevan dengan indikator kinerja sistem.

Ekstraksi Data

Data dari artikel yang memenuhi kriteria diekstraksi secara sistematis menggunakan lembar ekstraksi yang mencakup penulis, tahun publikasi, lokasi penelitian, jenis studi, komponen sistem yang dikaji, indikator utama, temuan utama, dan kontribusi terhadap pengembangan model demand–supply–control.

Tabel 1. Ekstraksi Data Literatur Kunci yang Digunakan dalam Sintesis Model Demand–Supply–Control

Penulis	Tahun	Lokasi	Jenis Studi	Komponen	Indikator	Temuan Utama	Kontribusi
Ishfaq et al.	2020	Asia Selatan	Review	AWD	Water use efficiency, hasil panen	AWD menghemat penggunaan air tanpa menurunkan hasil secara signifikan	Demand (kebutuhan air tanaman)
Bwire et al.	2024	Global	Review	AWD	Produktivitas air	AWD menghemat air 25–70% dan meningkatkan efisiensi penggunaan air	Demand
Vicente et al.	2025	Spanyol	Eksperimen lapang	AWD + Biochar	Produktivitas air	Integrasi AWD dan biochar meningkatkan efisiensi air dan hasil padi	Demand
Koide et al.	2021	Ghana	Eksperimen lapang	Farm Pond	Ketersediaan air, stabilitas produksi	Sistem pond irrigation meningkatkan ketahanan terhadap kekeringan	Supply (penyediaan air)
Ferreira et al.	2023	Portugal	Water accounting analysis	Farm Pond	Water productivity	Pengelolaan sumber air meningkatkan efisiensi sistem irigasi	Supply
Munir et al.	2021	Pakistan	Analisis GIS	Rainwater Harvesting	Volume tampungan air	Pemanenan air hujan meningkatkan cadangan air pada wilayah kering	Supply
García et al.	2020	Global	Review	IoT Smart Irrigation	Monitoring dan otomatisasi	IoT meningkatkan akurasi pengelolaan irigasi berbasis data	Control (pengambilan keputusan)
Ahmed et al.	2023	Drylands	Review	Smart Irrigation	Water productivity	Smart irrigation meningkatkan	Control

Penulis	Tahun	Lokasi	Jenis Studi	Komponen	Indikator	Temuan Utama	Kontribusi
Zhang et al.	2025	China	Pengembangan Sistem	IoT + Edge Computing	Presisi irigasi	efisiensi penggunaan air pada lahan kering Sistem IoT meningkatkan respons dan akurasi keputusan irigasi	Control
Shang et al.	2021	Global	Review	Adopsi Teknologi	Tingkat adopsi teknologi	Dukungan kelembagaan dan kebijakan menentukan keberhasilan implementasi teknologi	Policy Support

Analisis Data dan Sintesis

Analisis dilakukan menggunakan content analysis untuk mengidentifikasi variabel utama, meliputi sistem irigasi (AWD), infrastruktur penyedia air (embung), teknologi kontrol (IoT), serta indikator kinerja seperti *water use efficiency*, produktivitas, dan ketahanan terhadap kekeringan. Sintesis dilakukan secara tematik untuk mengkaji hubungan antar komponen *demand–supply–control* dan merumuskan kerangka konseptual integratif. Hasil kajian disajikan untuk menunjukkan kontribusi sistem AWD–Embung–IoT dalam meningkatkan efisiensi air dan ketahanan sistem pertanian pada lahan kering..

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Literatur dan Tren Penelitian

Analisis terhadap 25 artikel yang memenuhi kriteria sintesis menunjukkan bahwa penelitian mengenai pengelolaan air pada budidaya padi di lahan kering mengalami peningkatan dalam periode 2020–2025. Berdasarkan distribusi geografis, sebagian besar penelitian dilakukan di Asia (64%), diikuti oleh Eropa (16%), Afrika (12%), dan studi berskala global (8%). Dominasi penelitian di Asia menunjukkan tingginya perhatian terhadap permasalahan efisiensi penggunaan air pada wilayah yang memiliki ketergantungan kuat terhadap sektor pertanian dan menghadapi tekanan perubahan iklim. Kondisi ini juga relevan dengan wilayah semi-arid seperti Kabupaten Lombok Tengah yang menghadapi tantangan serupa dalam menjaga ketersediaan air pada musim tanam kedua (MT 2).

Dari sisi metodologi, artikel yang dianalisis terdiri atas studi review (32%), eksperimen lapang (28%), pengembangan sistem IoT (16%), analisis spasial berbasis GIS (12%), serta kajian hidrologi dan water accounting (12%). Keberagaman pendekatan tersebut menunjukkan bahwa penelitian pengelolaan air telah berkembang dari pendekatan agronomis konvensional menuju pendekatan multidisipliner yang mengintegrasikan hidrologi, teknologi digital, dan pengambilan keputusan berbasis data.

Analisis tematik pada Tabel 2 menunjukkan adanya lima fokus utama penelitian: (1) Efisiensi Air dan Produktivitas melalui *Alternate Wetting and Drying* (AWD) (*Demand System*); (2) Embung Pintar sebagai Sistem Penyedia Air (*Supply System*); (3) IoT dan *Smart Irrigation* untuk Kontrol Presisi Air (*Control System*); (4) Teknologi Pendukung (Remote Sensing dan Analisis Hidrologi); serta (5) Integrasi Sistem dan Adaptasi Perubahan Iklim. Distribusi artikel yang relatif seimbang antar tema menunjukkan bahwa penelitian mengenai pengelolaan air telah berkembang dari pendekatan yang bersifat parsial menuju pendekatan yang lebih terintegrasi. Namun demikian, kajian yang secara eksplisit menghubungkan komponen *demand–supply–control* dalam satu kerangka operasional masih sangat terbatas, sehingga membuka peluang pengembangan model integratif yang diusulkan dalam penelitian ini.

Tabel 2. Hasil Kajian *Systematic Literature Review*

No	Tema	Temuan Utama	Kelompok Referensi
1	Efisiensi Air dan Produktivitas	Penerapan <i>Alternate Wetting and Drying</i> (AWD) terbukti mengurangi penggunaan air irigasi	Sikka et al. (2022); Gupta et al. (2022); Bwire et al. (2024);

No	Tema	Temuan Utama	Kelompok Referensi
	melalui AWD (Demand System)	sebesar 25–70% tanpa menurunkan hasil, bahkan meningkatkan <i>water use efficiency</i> . Integrasi dengan teknologi seperti biochar dan pendekatan climate-smart irrigation memperkuat retensi air tanah, efisiensi penggunaan air, serta stabilitas hasil pada kondisi lahan kering.	Vicente et al. (2025); Santra (2021)
2	Embung Pintar sebagai Sistem Penyedia Air (Supply System)	Embung (farm pond) dan sistem penampungan air berperan sebagai sumber air strategis dalam mendukung irigasi pada lahan kering. Infrastruktur ini meningkatkan ketersediaan air, mendukung panen air hujan, serta memperkuat stabilitas sistem irigasi AWD, terutama dalam menghadapi variabilitas iklim dan keterbatasan sumber air.	Ferreira et al. (2023); Anand et al. (2021); Chinnasamy et al. (2021); Murthy et al. (2022); Raya & Gupta (2020); Hansamali et al. (2025); Munir et al. (2021)
3	IoT dan Smart Irrigation untuk Kontrol Presisi Air (Control System)	Teknologi IoT dan sensor memungkinkan pemantauan real-time terhadap parameter hidrologi seperti tinggi muka air, kelembaban tanah, dan aliran air. Sistem ini meningkatkan efisiensi distribusi air, mendukung otomatisasi irigasi, serta memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data dalam integrasi AWD dan embung pintar.	Darmalim et al. (2021); Laban & Ella (2022); Dange et al. (2023); Zulkifli et al. (2022)
4	Teknologi Pendukung (Remote Sensing dan Analisis Hidrologi)	Pemanfaatan UAV, citra satelit, sensor hidrologi, dan analisis spasial memungkinkan pemetaan sumber daya air, pengukuran evaporasi, serta identifikasi potensi embung. Teknologi ini mendukung perencanaan berbasis data dan optimasi pengelolaan air secara presisi pada sistem pertanian lahan kering.	Vélez-Nicolás et al. (2021); Teschemacher et al. (2020); Adamo et al. (2021); Rodrigues et al. (2023)
5	Integrasi Sistem dan Adaptasi Perubahan Iklim	Integrasi AWD, embung, dan teknologi cerdas membentuk sistem pertanian adaptif berbasis climate-smart agriculture. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi input, konservasi air, kualitas lingkungan, serta ketahanan terhadap perubahan iklim melalui kombinasi teknologi modern dan pendekatan manajemen berkelanjutan.	Modi et al. (2020); Zhang et al. (2022); Meng et al. (2022); Lorenzo et al. (2024); Oiganji et al. (2025)

Dinamika Kebutuhan Air Tanaman Padi pada Periode Musim Tanam Kedua

Musim tanam kedua (MT 2) pada sistem budidaya padi di Kabupaten Lombok Tengah umumnya berlangsung setelah berakhirnya musim hujan utama, yaitu sekitar bulan April–Juli. Periode ini ditandai oleh penurunan curah hujan yang cukup tajam dibandingkan musim tanam pertama (MT 1), dengan curah hujan bulanan yang pada beberapa wilayah dapat berada di bawah 100 mm per bulan. Pada saat yang sama, kebutuhan air tanaman masih relatif tinggi karena sebagian besar pertanaman memasuki fase vegetatif aktif hingga awal fase reproduktif. Kondisi tersebut menyebabkan MT 2 menjadi periode dengan risiko defisit

air tertinggi, terutama pada lahan yang bergantung pada curah hujan dan tampungan air lokal. Oleh karena itu, keberhasilan produksi padi pada MT 2 sangat ditentukan oleh kemampuan sistem pengelolaan air dalam menjaga kontinuitas pasokan air selama fase pertumbuhan kritis tanaman.

Pada periode ini, tanaman padi umumnya berada pada fase pertumbuhan vegetatif aktif, khususnya fase *mid-tillering*, yaitu tahap pembentukan dan perkembangan anakan produktif yang sangat menentukan potensi hasil panen. Kebutuhan air pada fase ini meningkat signifikan, sehingga kekurangan air dapat memengaruhi proses fotosintesis, pembelahan sel tunas samping, serta alokasi asimilat. Kekurangan air pada fase vegetatif aktif dapat menghambat pembentukan anakan produktif, menurunkan efisiensi fotosintesis, serta meningkatkan risiko pembentukan gabah hampa pada fase berikutnya. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa stres kekeringan pada fase pembentukan anakan dan fase reproduktif berkontribusi terhadap penurunan komponen hasil dan produktivitas padi, terutama pada sistem budidaya yang bergantung pada curah hujan dan memiliki keterbatasan sumber air (Bwire et al., 2024; Gupta et al., 2022; Llaban & Ella, 2022; Oiganji et al., 2025; Vicente et al., 2025). Air berperan penting dalam menjaga turgor sel dan mendukung metabolisme vegetatif, sehingga ketidakstabilan suplai air berisiko menghambat pertumbuhan optimal.

Karakteristik lingkungan pada periode MT 2 meningkatkan tekanan hidrik pada tanaman. Curah hujan rendah, berkisar 50–80 mm per bulan, dikombinasikan dengan evapotranspirasi harian tinggi 5–6 mm, membuat tanaman sangat rentan terhadap defisit air (Darmalim et al., 2021; Sikka et al., 2022; Zulkifli et al., 2022). Kekurangan air menyebabkan stres fisiologis, seperti penurunan efisiensi fotosintesis dan keterbatasan transportasi nutrisi ke anakan produktif. Dampaknya terlihat pada jumlah anakan dan kualitas gabah, sehingga keberlanjutan produksi sangat bergantung pada suplai air yang memadai (Raya & Gupta, 2020; Vélez-Nicolás et al., 2021).

Secara fisiologis, air diperlukan untuk mendukung pertumbuhan akar dan metabolisme tanaman, serta mendistribusikan asimilat ke anakan baru. Defisit air pada periode MT 2 khususnya pada fase *mid tillering* dapat menghambat elongasi akar, mengurangi kemampuan penyerapan air dan nutrisi, serta menurunkan stabilitas anakan produktif (Llaban & Ella, 2022; Rodrigues et al., 2023). Evapotranspirasi yang tinggi meningkatkan kebutuhan air harian, sehingga fluktuasi pasokan air menimbulkan risiko stres hidrik yang signifikan (Bwire et al., 2024; Vicente et al., 2025). Literatur menekankan pentingnya ketersediaan air konsisten untuk menjaga keseimbangan fisiologis dan mendukung pembentukan anakan produktif yang optimal (Anand et al., 2021; Gupta et al., 2022).

Secara keseluruhan, pengelolaan air adalah faktor kunci dalam produktivitas padi lahan kering pada periode MT 2. Suplai air yang memadai memastikan pertumbuhan vegetatif yang optimal, stabilitas anakan produktif, dan kualitas gabah yang baik (Bwire et al., 2024; Meng et al., 2022; Vicente et al., 2025). Kombinasi kondisi iklim dan kebutuhan fisiologis tanaman membuat fase ini sangat sensitif terhadap defisit air, sehingga pengelolaan air presisi menjadi strategi utama untuk mempertahankan keberlanjutan produksi padi (Llaban & Ella, 2022; Rodrigues et al., 2023).

Efektivitas *Alternate Wetting and Drying* (AWD) dalam Meningkatkan Efisiensi Air pada Tanaman Padi Pada Periode Musim Tanam Kedua

Alternate Wetting and Drying (AWD) merupakan strategi irigasi yang dirancang untuk mengatur siklus pembasahan dan pengeringan pada budidaya tanaman padi secara terkontrol. Dalam praktiknya, air dibiarkan surut hingga mencapai ambang tertentu, seperti kedalaman muka air sekitar 15 cm atau potensi matrik tanah ± 20 kPa, sebelum dilakukan penggenangan kembali (Bwire et al., 2024; Vicente et al., 2025). Pendekatan ini memungkinkan terciptanya keseimbangan antara ketersediaan air dan aerasi tanah yang optimal bagi pertumbuhan padi. Pada periode MT 2, khususnya pada fase *mid-tillering* yang sangat sensitif terhadap defisit air, pengaturan siklus air menjadi krusial dalam menjaga stabilitas ketersediaan air di zona perakaran (Llaban & Ella, 2022; Vicente et al., 2025). Dengan demikian, AWD menjadi pendekatan adaptif yang selaras dengan dinamika kebutuhan air tanaman padi.

Konsep AWD pada awalnya dikembangkan untuk sistem sawah irigasi yang memungkinkan pengaturan tinggi muka air secara terkontrol. Namun, dalam konteks penelitian ini, AWD tidak diposisikan sebagai teknik genangan berselang pada sawah irigasi konvensional, melainkan sebagai prinsip pengelolaan kelembaban tanah berbasis ambang batas (soil moisture threshold) yang dapat diadaptasi pada sistem padi tadah hujan maupun lahan kering dengan dukungan sumber air tambahan. Pada kondisi tersebut, tujuan utama AWD adalah mempertahankan kelembaban tanah dalam kisaran optimum pertumbuhan tanaman melalui pemberian air secara periodik sesuai kebutuhan fisiologis tanaman. Oleh karena itu, konsep AWD dalam kajian ini dipahami sebagai pendekatan pengelolaan air presisi yang berorientasi pada kebutuhan tanaman, bukan semata-mata pengaturan genangan permukaan tanah.

Dalam praktik AWD, irigasi kembali diberikan ketika muka air tanah turun hingga sekitar 15 cm di bawah permukaan tanah atau ketika tegangan air tanah mendekati ± 20 kPa. Ambang tersebut digunakan untuk mencegah tanaman mengalami cekaman air yang dapat mengganggu pembentukan anakan dan pengisian bulir, sekaligus mempertahankan efisiensi penggunaan air. Dengan pendekatan ini, keputusan irigasi tidak lagi didasarkan pada jadwal tetap, tetapi pada kondisi aktual tanah dan kebutuhan fisiologis tanaman.

Bukti empiris menunjukkan bahwa penerapan AWD pada tanaman padi mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dibandingkan sistem genangan kontinu. Hasil review menunjukkan bahwa penghematan air yang dilaporkan bervariasi antar lokasi dan sistem budidaya. Bwire et al. (2024) melaporkan bahwa AWD dapat mengurangi penggunaan air irigasi sebesar 25–70% pada berbagai kondisi agroekologi, sedangkan studi lapangan yang lebih spesifik menunjukkan penghematan berkisar 15–36% dengan peningkatan Water Use Efficiency (WUE) hingga 1,6 kali lipat tanpa penurunan hasil yang signifikan. Variasi tersebut dipengaruhi oleh jenis tanah, curah hujan, kedalaman muka air yang digunakan sebagai ambang AWD, serta metode pengukuran kebutuhan air irigasi. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas AWD bersifat kontekstual dan sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan setempat.

Dari perspektif fisiologi tanaman padi, siklus basah–kering dalam AWD mendorong adaptasi sistem perakaran dan meningkatkan efisiensi penyerapan air. Kondisi tanah yang tidak selalu jenuh meningkatkan aerasi, sehingga merangsang pertumbuhan akar yang lebih dalam dan lebih luas (Bwire et al., 2024; Vicente et al., 2025). Akar yang berkembang dengan baik memungkinkan tanaman padi mengakses cadangan air di lapisan tanah yang lebih dalam selama periode kering sementara. Dampaknya terlihat pada peningkatan stabilitas anakan produktif serta efisiensi pengisian gabah, khususnya pada kondisi lingkungan dengan curah hujan terbatas (Llaban & Ella, 2022; Rodrigues et al., 2023). Dengan demikian, AWD tidak hanya meningkatkan efisiensi air, tetapi juga memperkuat ketahanan fisiologis tanaman padi terhadap cekaman hidrik.

Namun demikian, efektivitas AWD pada tanaman padi sangat bergantung pada ketepatan dalam pengelolaan siklus pembasahan dan pengeringan. Kesalahan dalam menentukan waktu pengeringan atau penggenangan dapat menyebabkan stres air yang berdampak negatif terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman (Bwire et al., 2024; Vicente et al., 2025). Variasi kondisi lahan, seperti tekstur tanah, kapasitas menahan air, dan distribusi curah hujan, turut memengaruhi keberhasilan implementasi AWD (Darmalim et al., 2021; Sikka et al., 2022). Oleh karena itu, pemahaman terhadap ambang kelembaban tanah dan respons fisiologis tanaman padi menjadi faktor kunci dalam menjaga keseimbangan antara efisiensi air dan produktivitas. Literatur menegaskan bahwa keberhasilan AWD ditentukan oleh konsistensi penerapan dan kesesuaian dengan kondisi spesifik lahan.

Dalam konteks Lombok Tengah, penerapan AWD menjadi semakin relevan karena periode MT 2 umumnya berlangsung setelah puncak musim hujan ketika curah hujan mulai menurun dan ketergantungan terhadap sumber air tampungan meningkat. Pada kondisi tersebut, AWD dapat berfungsi sebagai strategi penghematan air yang memungkinkan cadangan air embung dimanfaatkan secara lebih efisien sehingga kebutuhan irigasi tanaman tetap terpenuhi hingga akhir musim tanam.

Peran Embung dalam Menjamin Ketersediaan Air pada Tanaman Padi Periode Musim Tanam Kedua

Embung merupakan infrastruktur penyimpanan air yang berfungsi sebagai sumber cadangan untuk menjaga kontinuitas suplai air pada tanaman padi, khususnya pada periode MT 2 yang ditandai oleh peningkatan kebutuhan air dan tingginya risiko defisit hidrik. Berbagai studi menunjukkan bahwa sistem penampungan air seperti embung berperan dalam memanen limpasan hujan (*water harvesting*) serta meningkatkan retensi air di tingkat tapak, sehingga mampu menstabilkan ketersediaan air pada periode dengan curah hujan terbatas (Anand et al., 2021; Munir et al., 2021; Raya & Gupta, 2020). Dalam konteks budidaya padi di lahan kering dan semi-arid, pendekatan ini menjadi krusial untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber air eksternal yang tidak stabil (Chinnasamy et al., 2021; J. Zhang et al., 2022). Dengan demikian, embung berfungsi sebagai *buffer* hidrologis yang menjembatani kesenjangan antara ketersediaan dan kebutuhan air tanaman padi.

Kapasitas tampung embung yang berkisar antara ratusan hingga lebih dari seribu meter kubik memungkinkan pemenuhan sebagian kebutuhan irigasi pada fase kritis pertumbuhan padi. Kapasitas tampung embung yang berkisar antara ratusan hingga lebih dari seribu meter kubik memungkinkan pemenuhan sebagian kebutuhan irigasi pada fase kritis pertumbuhan padi. Kebutuhan air padi selama satu musim tanam umumnya berkisar antara 7.000–12.000 m³ ha⁻¹ tergantung kondisi agroklimat, jenis tanah, dan sistem irigasi yang digunakan. Sebagai ilustrasi, embung dengan kapasitas efektif 1.000 m³ hanya mampu memenuhi sekitar 8–14% kebutuhan air satu hektar padi selama satu musim tanam. Namun pada sistem AWD yang mampu mengurangi kebutuhan air irigasi, kapasitas tampungan yang sama dapat memberikan dukungan irigasi yang lebih lama selama periode defisit air.

Penelitian Oiganji et al. (2025) menunjukkan bahwa penyimpanan air skala kecil dapat berkontribusi signifikan terhadap peningkatan produktivitas air dan ketahanan terhadap variabilitas iklim. Selain itu, pengelolaan sumber daya air berbasis penyimpanan lokal terbukti meningkatkan efisiensi distribusi air dan mengurangi kehilangan akibat limpasan atau evaporasi yang tidak terkendali (Ferreira et al., 2023; Rodrigues et al., 2023). Hal ini memperkuat peran embung tidak hanya sebagai penyimpan air, tetapi juga sebagai komponen penting dalam sistem manajemen air pada budidaya padi yang lebih efisien.

Meskipun berfungsi sebagai sumber cadangan air, efektivitas embung dipengaruhi oleh kehilangan air melalui evaporasi dan rembesan. Pada wilayah semi-arid dengan suhu tinggi dan periode kering yang panjang, kehilangan air akibat evaporasi dapat mengurangi volume tampungan secara signifikan. Selain itu, rembesan pada dasar dan dinding embung juga dapat menurunkan efisiensi penyimpanan apabila tidak didukung oleh desain konstruksi yang memadai. Oleh karena itu, penggunaan pelapis embung, pengelolaan volume tampungan, dan pemeliharaan infrastruktur menjadi faktor penting dalam menjaga keberlanjutan suplai air.

Keberadaan embung juga berkorelasi dengan peningkatan stabilitas produksi tanaman padi melalui pengurangan dampak cekaman air pada fase vegetatif dan generatif. Literatur menunjukkan bahwa ketersediaan air yang lebih stabil mampu menekan tingkat kegagalan pembentukan anakan serta mengurangi proporsi gabah hampa akibat stres hidrik (Bwire et al., 2024; Vicente et al., 2025). Selain itu, kualitas air yang tersimpan dalam embung turut memengaruhi performa tanaman padi, terutama jika dikaitkan dengan faktor lingkungan dan praktik agronomis di sekitarnya (Meng et al., 2022). Dengan demikian, embung berperan dalam menjaga kondisi agrohidrologi yang mendukung pertumbuhan optimal tanaman padi.

Namun demikian, efektivitas embung dalam mendistribusikan air pada lahan padi masih menghadapi keterbatasan, terutama terkait dengan sifat distribusi yang cenderung statis dan bergantung pada kondisi topografi. Variasi elevasi dan jarak distribusi dapat menyebabkan ketidakseimbangan suplai air antar petak sawah, sehingga efisiensi pemanfaatan air menjadi tidak merata (Raya & Gupta, 2020). Embung yang berada pada posisi lebih tinggi relatif terhadap lahan budidaya memungkinkan distribusi air secara gravitasi sehingga lebih efisien dari sisi energi. Sebaliknya, embung yang berada pada elevasi lebih rendah memerlukan sistem pemompaan tambahan yang meningkatkan biaya operasional serta kompleksitas pengelolaan air. Selain itu, desain dan lokasi embung yang kurang optimal dapat menurunkan kinerja penyimpanan dan distribusi air (Adamo et al.,

2021; Teschemacher et al., 2020). Hal ini menunjukkan bahwa perencanaan teknis dan spasial menjadi faktor kunci dalam optimalisasi fungsi embung pada sistem budidaya padi.

Dalam konteks Kabupaten Lombok Tengah yang memiliki karakter semi-arid dengan distribusi curah hujan yang tidak merata dan periode kering yang relatif panjang, embung berpotensi menjadi sumber air strategis untuk mempertahankan budidaya padi pada MT 2. Air hujan yang ditampung selama musim penghujan dapat dimanfaatkan kembali pada periode defisit air sehingga meningkatkan ketahanan sistem produksi terhadap variabilitas iklim. Oleh karena itu, pengembangan embung tidak hanya berfungsi sebagai upaya konservasi air, tetapi juga sebagai instrumen adaptasi pertanian terhadap risiko kekeringan.

Secara keseluruhan, embung merupakan komponen strategis dalam sistem pengelolaan air pada tanaman padi periode MT 2, terutama dalam konteks adaptasi terhadap variabilitas iklim dan keterbatasan sumber daya air. Fungsinya sebagai penampung dan penyedia air cadangan terbukti mampu meningkatkan stabilitas produksi serta efisiensi penggunaan air. Namun, keterbatasan dalam aspek distribusi dan desain menegaskan perlunya pendekatan pengelolaan yang lebih terintegrasi dan berbasis kondisi lokal (Gupta et al., 2022; Murthy et al., 2022; Sikka et al., 2022). Oleh karena itu, penguatan peran embung perlu didukung oleh strategi perencanaan, desain, dan manajemen yang komprehensif agar manfaatnya dapat dioptimalkan secara berkelanjutan.

Peran IoT dalam Pengelolaan Air Presisi pada Tanaman Padi Periode Musim Tanam Kedua

Internet of Things (IoT) berperan sebagai sistem kontrol cerdas dalam pengelolaan air presisi pada budidaya tanaman padi, khususnya pada fase *mid-tillering* Periode MT 2 yang ditandai oleh dinamika kebutuhan air yang tinggi dan sensitif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Berbeda dengan pendekatan konvensional yang berbasis jadwal tetap, IoT memungkinkan pengelolaan air berbasis kondisi aktual tanaman dan lingkungan secara *real-time*. Mekanisme ini bekerja melalui alur sensor–data–keputusan–aksi, di mana informasi lapangan dikonversi menjadi instruksi irigasi yang adaptif. Dengan demikian, IoT tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring, tetapi sebagai sistem pengambilan keputusan yang responsif terhadap dinamika agrohidrologi pada fase kritis pertumbuhan padi (Oiganji et al., 2025; Zulkifli et al., 2022).

Secara struktural, sistem IoT terdiri atas tiga komponen utama, yaitu sensor, aktuator, dan platform data yang saling terintegrasi. Sensor seperti kelembaban tanah dan tinggi muka air berfungsi mengukur variabilitas kondisi air secara kontinu dengan resolusi temporal yang tinggi (Llaban & Ella, 2022; Zulkifli et al., 2022). Data tersebut ditransmisikan ke platform berbasis cloud atau aplikasi mobile untuk diproses dan dianalisis secara *real-time* (Darmalim et al., 2021). Hasil analisis kemudian diterjemahkan menjadi perintah yang dijalankan oleh aktuator, seperti pengaturan bukaan pintu irigasi atau pompa air secara otomatis sesuai ambang batas kebutuhan tanaman (Dange et al., 2023). Integrasi ini membentuk sistem siber-fisik yang mampu merespons perubahan kondisi air secara cepat dan presisi pada skala petak sawah.

Dalam konteks integrasi AWD–Embung–IoT, beberapa sensor memiliki peran yang lebih relevan dibandingkan sensor umum lainnya. Sensor kelembaban tanah digunakan untuk memantau kondisi zona perakaran dan menentukan kebutuhan air tanaman secara aktual. Sensor tinggi muka air embung berfungsi mengukur volume cadangan air yang tersedia sebagai sumber irigasi. Sensor debit digunakan untuk memantau laju distribusi air dari embung menuju lahan, sedangkan sensor curah hujan membantu memperkirakan kontribusi air alami terhadap kebutuhan tanaman. Selain itu, sensor suhu dan kelembaban udara dapat digunakan untuk mendukung estimasi evapotranspirasi dan kebutuhan air tanaman. Data dari berbagai sensor tersebut menjadi dasar dalam pengambilan keputusan irigasi secara presisi.

Tabel 3. Komponen IoT dan Fungsinya dalam Sistem Pengelolaan Air AWD–Embung–IoT

Komponen	Parameter yang Dipantau/Dikendalikan	Fungsi dalam Sistem
Sensor kelembaban tanah	Kadar air tanah (%) atau volumetric water content	Memantau kondisi air pada zona perakaran dan menentukan kebutuhan irigasi tanaman

Komponen	Parameter yang Dipantau/Dikendalikan	Fungsi dalam Sistem
Sensor tinggi muka air embung	Tinggi muka air (cm atau m)	Mengukur ketersediaan cadangan air pada embung sebagai sumber suplai
Sensor debit air	Debit aliran (L/detik)	Memantau volume dan laju distribusi air dari embung ke lahan
Sensor curah hujan	Curah hujan (mm)	Memperkirakan kontribusi air hujan terhadap kebutuhan air tanaman
Sensor suhu dan kelembaban udara	Suhu (°C) dan kelembaban relatif (%)	Mendukung estimasi evapotranspirasi dan kebutuhan air tanaman
Platform IoT (cloud/mobile application)	Data sensor terintegrasi	Mengumpulkan, menyimpan, dan menganalisis data secara real-time
Decision engine	Threshold AWD dan status ketersediaan air	Menentukan waktu irigasi, volume air, dan durasi operasi sistem
Aktuator (pompa/valve otomatis)	Bukaan katup atau operasi pompa	Menyalurkan air secara otomatis berdasarkan keputusan sistem

Keunggulan utama IoT terletak pada kemampuannya dalam meningkatkan akurasi dan efisiensi distribusi air melalui monitoring *real-time* dan otomatisasi irigasi. Pada fase *mid-tillering* periode MT 2, di mana pembentukan anakan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan air, sistem ini memungkinkan deteksi dini terhadap kondisi defisit maupun surplus air, sehingga intervensi dapat dilakukan tepat waktu dan sesuai kebutuhan tanaman (Zulkifli et al., 2022). Kondisi ini juga berkaitan erat dengan dinamika mikroklimat di sekitar tanaman, di mana interaksi antara suhu, kelembaban, dan ketersediaan air memengaruhi efisiensi penggunaan air serta pembentukan anakan pada fase *mid-tillering* (Lorenzo et al., 2024). Studi menunjukkan bahwa otomatisasi berbasis sensor mampu mengurangi ketidaktepatan pemberian air yang umum terjadi pada irigasi manual, seperti *over-irrigation* maupun *under-irrigation* (Dange et al., 2023). Selain itu, integrasi data spasial melalui teknologi seperti *unmanned aerial systems* (UAS) memperluas cakupan pengamatan kondisi lahan, sehingga pengelolaan air dapat dilakukan secara lebih komprehensif dan berbasis variabilitas spasial (Vélez-Nicolás et al., 2021). Hal ini menegaskan bahwa IoT meningkatkan presisi sekaligus konsistensi dalam pengelolaan air pada sistem budidaya padi.

Dari sisi dampak, implementasi IoT berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi penggunaan air dan optimalisasi produktivitas sistem produksi padi. Pengelolaan berbasis data memungkinkan pengurangan pemborosan air akibat pemberian air berlebih serta meningkatkan kesesuaian antara suplai air dan kebutuhan tanaman pada setiap fase pertumbuhan (Ferreira et al., 2023; Oiganji et al., 2025). Pendekatan berbasis *nature-based solutions* dalam pengelolaan air, seperti peningkatan retensi air melalui struktur sederhana di lanskap, juga berkontribusi dalam menjaga ketersediaan air dan mengurangi kehilangan air secara alami (Hansamali et al., 2025). Selain itu, efisiensi juga tercapai melalui pengurangan kehilangan air akibat distribusi yang tidak merata dan keterlambatan pemberian irigasi (Gupta et al., 2022). Dalam konteks yang lebih luas, penerapan teknologi berbasis IoT mendukung peningkatan efisiensi input, stabilitas hasil, serta keberlanjutan sistem produksi padi di tengah tekanan perubahan iklim dan keterbatasan sumber daya air (Modi et al., 2020). Dengan demikian, IoT berkontribusi langsung terhadap peningkatan *water productivity* dalam sistem pertanian padi. Dalam model integratif yang dikembangkan pada penelitian ini, IoT tidak hanya mengendalikan waktu pemberian air berdasarkan kebutuhan tanaman (demand), tetapi juga mempertimbangkan kondisi ketersediaan air pada embung (supply). Dengan demikian, sistem mampu mengoptimalkan pemanfaatan cadangan air secara adaptif sehingga efisiensi penggunaan air dapat ditingkatkan tanpa mengurangi produktivitas tanaman.

Namun demikian, implementasi IoT masih menghadapi berbagai keterbatasan yang bersifat teknis, ekonomi, dan sosial. Dari aspek teknis, akurasi sensor, kebutuhan kalibrasi, serta kestabilan jaringan komunikasi menjadi tantangan utama, terutama pada wilayah dengan infrastruktur digital yang terbatas (Llaban & Ella, 2022). Dari sisi ekonomi, biaya investasi awal dan pemeliharaan sistem relatif tinggi, sehingga membatasi tingkat adopsi oleh petani skala kecil (Gupta et al., 2022; Sikka et al., 2022). Sementara itu, dari aspek sosial, rendahnya literasi teknologi serta keterbatasan kapasitas pengguna dalam mengoperasikan sistem digital turut menghambat implementasi secara luas (Zulkifli et al., 2022). Oleh karena itu, keberhasilan penerapan IoT tidak hanya ditentukan oleh kesiapan teknologi, tetapi juga oleh dukungan kelembagaan, kebijakan, dan peningkatan kapasitas sumber daya manusia.

Secara konseptual, IoT dapat diposisikan sebagai *decision engine* dalam sistem pengelolaan air presisi pada budidaya padi, yang bekerja berdasarkan pendekatan ambang batas (*threshold-based control*) maupun analisis data yang lebih kompleks. Sistem ini mengintegrasikan data real-time, proses analitis, dan tindakan dalam satu siklus tertutup (*closed-loop system*) yang memungkinkan pengambilan keputusan secara otomatis dan adaptif. Pada sistem AWD, keputusan irigasi dapat didasarkan pada beberapa ambang operasional, misalnya ketika muka air tanah turun hingga sekitar 15 cm di bawah permukaan tanah atau ketika kelembaban tanah mencapai batas tertentu yang mengindikasikan awal terjadinya defisit air pada zona perakaran. Informasi tersebut dikombinasikan dengan data ketersediaan air embung, curah hujan, dan fase pertumbuhan tanaman untuk menentukan waktu irigasi, volume air yang diberikan, serta durasi pengoperasian pompa atau bukaan katup secara otomatis. Dibandingkan dengan sistem konvensional, pendekatan ini lebih unggul dalam merespons variabilitas spasial dan temporal kondisi air, terutama pada fase MT 2 yang sangat sensitif terhadap fluktuasi ketersediaan air (Oiganji et al., 2025; Zulkifli et al., 2022). Dengan demikian, IoT tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan air, tetapi juga memperkuat ketahanan sistem budidaya padi terhadap ketidakpastian lingkungan.

Sintesis Model Integratif Pengelolaan Air Presisi pada Tanaman Padi pada Periode Musim Tanam Kedua

Bagian ini menguraikan sintesis model integratif pengelolaan air presisi pada tanaman padi yang menggabungkan tiga komponen utama, yaitu kebutuhan air tanaman (*demand*), ketersediaan sumber air (*supply*), dan mekanisme pengambilan keputusan (*control*). Pendekatan ini memposisikan pengelolaan air sebagai suatu sistem adaptif berbasis data, di mana interaksi antar komponen berlangsung secara dinamis berdasarkan kondisi aktual di lapangan, bukan lagi berbasis asumsi atau jadwal tetap (Oiganji et al., 2025; Zulkifli et al., 2022).

Secara konseptual, komponen *demand* merepresentasikan kebutuhan air tanaman padi yang bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh fase pertumbuhan, kondisi tanah, serta faktor lingkungan. Pada fase *mid-tillering* periode MT 2, kebutuhan air meningkat secara signifikan seiring dengan intensifikasi pembentukan anakan, sehingga ketepatan waktu dan volume irigasi menjadi faktor kunci dalam menentukan potensi hasil. Komponen *supply* direpresentasikan oleh embung sebagai sumber air yang berfungsi menyediakan cadangan air secara temporal dan menjamin kontinuitas suplai pada saat terjadi defisit air. Sementara itu, komponen *control* diwujudkan melalui sistem IoT yang berperan dalam mengintegrasikan data lapangan dan menerjemahkannya menjadi keputusan operasional irigasi secara real-time (Darmalim et al., 2021; Ferreira et al., 2023).

Pada Gambar 1 menunjukkan bahwa interaksi ketiga komponen tersebut membentuk suatu sistem siber-fisik berbasis umpan balik tertutup (*closed-loop adaptive system*). Sensor yang terpasang di lahan dan embung secara kontinu memantau parameter kunci yang menjadi input sistem, meliputi kelembaban tanah, tinggi muka air embung, curah hujan, evapotranspirasi, serta fase pertumbuhan tanaman padi. Parameter tersebut digunakan untuk menggambarkan kondisi aktual kebutuhan air tanaman dan ketersediaan sumber air secara real-time. Data yang diperoleh kemudian dianalisis dan dibandingkan dengan ambang batas kebutuhan air tanaman. Analisis dilakukan dengan mengevaluasi apakah kondisi lahan telah mencapai ambang AWD, misalnya muka air tanah sekitar 15 cm di

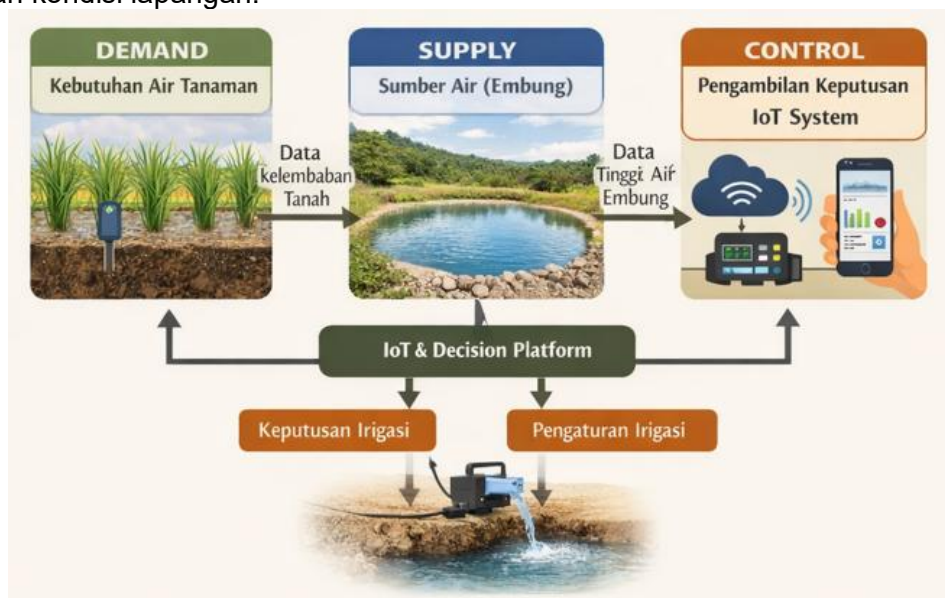
bawah permukaan atau kelembaban tanah berada di bawah batas optimum. Pada saat yang sama sistem menghitung kebutuhan air tanaman berdasarkan fase pertumbuhan serta mengevaluasi ketersediaan air yang tersimpan pada embung untuk memastikan kecukupan suplai irigasi. Berdasarkan hasil analisis tersebut, sistem kontrol menentukan waktu irigasi (*irrigation timing*) dan volume air (*irrigation depth*) yang optimal. Keputusan ini selanjutnya dieksekusi melalui aktuator yang mengalirkan air dari embung ke lahan secara otomatis. Mekanisme ini menciptakan hubungan kausal yang jelas, di mana data lapangan secara langsung memengaruhi keputusan irigasi, yang pada akhirnya menentukan kondisi air tanah dan respons fisiologis tanaman (Dange et al., 2023; Llaban & Ella, 2022).

Decision engine dalam model ini bekerja menggunakan pendekatan threshold-based control. Sistem akan mengaktifkan irigasi apabila kelembaban tanah atau tinggi muka air tanah berada di bawah ambang yang telah ditentukan dan ketersediaan air pada embung masih mencukupi. Sebaliknya, irigasi dihentikan ketika kondisi kelembaban tanah telah kembali berada pada kisaran optimum. Mekanisme ini memungkinkan pemberian air dilakukan sesuai kebutuhan aktual tanaman sehingga penggunaan air menjadi lebih efisien dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Dalam implementasinya, ambang keputusan (*decision threshold*) dapat ditetapkan berdasarkan parameter hidrologi dan kebutuhan fisiologis tanaman. Pada komponen AWD, irigasi diaktifkan ketika muka air tanah mencapai sekitar 15 cm di bawah permukaan tanah atau ketika kelembaban tanah turun di bawah kisaran optimum yang ditetapkan. Keputusan tersebut kemudian diverifikasi dengan mempertimbangkan ketersediaan air pada embung, curah hujan yang diprediksi, serta fase pertumbuhan tanaman. Sebagai contoh, pada fase mid-tillering yang sensitif terhadap defisit air, sistem dapat menggunakan ambang yang lebih konservatif dibandingkan fase vegetatif awal untuk menghindari penurunan jumlah anakan produktif. Pendekatan ini memungkinkan pengambilan keputusan irigasi yang lebih adaptif dan sesuai dengan kondisi aktual lapangan.

Output sistem meliputi rekomendasi waktu irigasi, volume air yang harus diberikan, durasi pengoperasian pompa atau bukaan katup, serta peringatan dini apabila terjadi potensi defisit air akibat menurunnya cadangan air embung atau meningkatnya kebutuhan air tanaman. Informasi tersebut dapat ditampilkan melalui aplikasi berbasis web maupun perangkat bergerak sehingga memudahkan pengelolaan irigasi secara real-time.

Setelah irigasi dijalankan, perubahan kelembaban tanah dan kondisi tanaman kembali dipantau oleh sensor sebagai mekanisme umpan balik (feedback). Data hasil respons sistem tersebut digunakan untuk memperbarui keputusan irigasi berikutnya sehingga terbentuk siklus pengendalian tertutup (closed-loop adaptive system). Melalui mekanisme ini, sistem mampu menyesuaikan volume dan waktu irigasi secara berkelanjutan sesuai perubahan kondisi lapangan.



Gambar 2. Model integratif pengelolaan air presisi pada tanaman padi yang menggabungkan kebutuhan, ketersediaan, dan kontrol dalam satu system adaptif.

Keunggulan utama model ini terletak pada kemampuannya dalam menyelaraskan hubungan antara kebutuhan dan ketersediaan air secara presisi. Berbeda dengan sistem konvensional yang cenderung memisahkan aspek penyediaan air dan pengambilan keputusan, model ini mengintegrasikan keduanya dalam satu sistem yang responsif terhadap perubahan kondisi lapangan. Hal ini memungkinkan pengurangan pemborosan air akibat kelebihan irigasi, sekaligus meminimalkan risiko stres hidrik akibat kekurangan air, terutama pada fase *mid-tillering* periode MT 2 yang sensitif terhadap fluktuasi ketersediaan air (Gupta et al., 2022; Sikka et al., 2022). Dengan demikian, efisiensi penggunaan air dan stabilitas produksi dapat ditingkatkan secara simultan.

Selain itu, model ini merepresentasikan transformasi paradigma dalam pengelolaan air pertanian. Pendekatan konvensional yang bersifat statis, berbasis jadwal tetap dan pengalaman empiris berkembang menjadi sistem dinamis yang mempertimbangkan variabilitas spasial dan temporal kondisi lahan, dan selanjutnya menjadi sistem adaptif yang mampu merespons perubahan secara otomatis berbasis data *real-time*. Transformasi ini menunjukkan bahwa integrasi antara *demand–supply–control* merupakan kunci dalam membangun sistem pengelolaan air yang lebih resilien terhadap variabilitas iklim dan ketidakpastian sumber daya air (Modi et al., 2020; Vélez-Nicolás et al., 2021).

Namun demikian, efektivitas model ini sangat bergantung pada kualitas integrasi antar komponen. Ketidaksesuaian kapasitas embung dengan kebutuhan air tanaman, rendahnya akurasi sensor, atau penentuan ambang batas yang tidak tepat dapat mengganggu kinerja sistem secara keseluruhan. Selain itu, faktor eksternal seperti kondisi topografi, ketersediaan infrastruktur, dan kapasitas pengguna juga menjadi determinan penting dalam keberhasilan implementasi model di tingkat lapangan (Gupta et al., 2022; Llaban & Ella, 2022). Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan integratif harus diikuti dengan perencanaan teknis dan kelembagaan yang memadai.

Secara konseptual, kontribusi utama model ini terletak pada integrasi fungsional antara kebutuhan air tanaman, ketersediaan sumber air, dan sistem kontrol berbasis data dalam satu kerangka *closed-loop adaptive system*. Berbeda dengan pendekatan sebelumnya yang cenderung parsial, model ini memungkinkan pengambilan keputusan irigasi yang presisi, *real-time*, dan responsif terhadap kondisi aktual tanaman dan lingkungan. Keberhasilan model dapat dievaluasi melalui beberapa indikator kinerja utama, yaitu peningkatan *water use efficiency* (WUE), jumlah anakan produktif, penurunan persentase gabah hampa, peningkatan hasil panen, efisiensi penggunaan energi pompa, serta stabilitas ketersediaan air selama periode MT 2. Dengan demikian, model integratif ini tidak hanya meningkatkan efisiensi teknis dalam penggunaan air, tetapi juga merepresentasikan pergeseran fundamental dalam paradigma pengelolaan air pertanian, dari sistem yang statis menuju sistem yang dinamis dan adaptif berbasis data. Pendekatan ini berkontribusi dalam meningkatkan produktivitas air sekaligus memperkuat ketahanan sistem budidaya padi terhadap perubahan iklim dan ketidakpastian lingkungan.

Implikasi Kebijakan untuk Wilayah Lombok Tengah (Semi-Arid)

Implikasi kebijakan dari model integratif pengelolaan air berbasis *demand–supply–control* menjadi semakin krusial diterapkan pada wilayah semi-arid seperti Lombok Tengah, yang dicirikan oleh keterbatasan sumber daya air, tingginya variabilitas curah hujan, serta ketergantungan pada sistem irigasi berbasis tampungan. Dalam konteks ini, fase *mid-tillering* periode MT 2 merupakan periode kritis yang sangat menentukan produktivitas padi, karena berkaitan langsung dengan pembentukan jumlah anakan produktif. Ketidaktepatan pengelolaan air pada fase ini, baik dalam bentuk defisit maupun kelebihan air, dapat berdampak signifikan terhadap penurunan hasil (Gupta et al., 2022; Sikka et al., 2022).

Dalam konteks Lombok Tengah, sebagian besar areal pertanian masih bergantung pada curah hujan musiman dan keberadaan embung sebagai sumber air tambahan pada musim kemarau. Pemerintah daerah juga telah mengembangkan berbagai program pembangunan embung pertanian dan rehabilitasi jaringan irigasi sebagai bagian dari upaya peningkatan ketahanan pangan. Namun, pengelolaan air pada tingkat petani umumnya masih dilakukan secara konvensional berdasarkan pengalaman lapangan, sehingga efisiensi penggunaan air belum optimal terutama pada periode MT 2 yang sering bertepatan dengan menurunnya curah hujan. Kondisi ini terutama dijumpai pada wilayah bagian selatan

dan tengah Lombok Tengah yang memiliki karakteristik iklim semi-arid dengan periode kering yang relatif panjang. Pada kondisi tersebut, ketersediaan air pada MT 2 sering menjadi faktor pembatas utama dalam mempertahankan produktivitas padi.

Kondisi agroekologi Lombok Tengah menunjukkan bahwa pendekatan pengelolaan air konvensional yang berbasis jadwal tetap tidak lagi memadai untuk menghadapi dinamika iklim dan keterbatasan sumber daya air. Oleh karena itu, diperlukan intervensi kebijakan yang mampu mendorong transformasi menuju sistem pengelolaan air yang lebih adaptif, presisi, dan berbasis data. Dalam hal ini, integrasi antara teknologi AWD sebagai representasi kebutuhan air tanaman (*demand*), embung sebagai sumber penyedia air (*supply*), dan IoT sebagai sistem pengambilan keputusan (*control*) menjadi landasan utama dalam merancang kebijakan yang efektif dan berkelanjutan (Darmalim et al., 2021; Ferreira et al., 2023).

Dari sisi infrastruktur, pengembangan embung perlu diarahkan tidak hanya pada peningkatan kapasitas tampungan, tetapi juga pada optimalisasi fungsi distribusi air yang terintegrasi dengan sistem kontrol. Banyak program pembangunan embung di wilayah semi-arid masih berorientasi pada penyediaan fisik tanpa diikuti dengan sistem manajemen yang adaptif, sehingga pemanfaatannya belum optimal. Oleh karena itu, kebijakan ke depan perlu menekankan pada pengembangan *smart embung*, yaitu embung yang terintegrasi dengan sensor pemantauan tinggi muka air dan sistem distribusi otomatis berbasis kebutuhan tanaman. Pendekatan ini sejalan dengan temuan bahwa efisiensi sistem irigasi sangat ditentukan oleh keterpaduan antara infrastruktur fisik dan sistem pengelolaannya (Llaban & Ella, 2022; Vélez-Nicolás et al., 2021).

Dari aspek teknis, implementasi model AWD–Embung–IoT memerlukan pembangunan embung dengan kapasitas yang disesuaikan terhadap kebutuhan air tanaman pada MT 2, pemasangan sensor kelembaban tanah, sensor tinggi muka air embung, sensor curah hujan, serta penggunaan pompa atau katup otomatis yang dapat dikendalikan secara real-time. Penggunaan panel surya sebagai sumber energi alternatif juga berpotensi menekan biaya operasional sistem pada wilayah dengan akses listrik terbatas.

Selanjutnya, dari aspek teknologi, adopsi sistem IoT dalam pengelolaan irigasi memerlukan dukungan kebijakan yang konkret, terutama dalam bentuk subsidi atau skema insentif. Hal ini penting mengingat keterbatasan kapasitas finansial petani dalam mengakses teknologi digital. Tanpa intervensi kebijakan, kesenjangan adopsi teknologi berpotensi semakin melebar, sehingga manfaat inovasi tidak dapat dirasakan secara merata. Studi menunjukkan bahwa keberhasilan adopsi teknologi pertanian digital sangat dipengaruhi oleh dukungan kebijakan, insentif ekonomi, serta kemudahan akses terhadap teknologi (Oiganji et al., 2025; Zulkifli et al., 2022).

Di sisi lain, penguatan kapasitas petani menjadi faktor kunci dalam memastikan efektivitas implementasi teknologi. Penggunaan sistem berbasis sensor dan data memerlukan pemahaman teknis yang memadai, baik dalam interpretasi data maupun dalam pengoperasian sistem. Oleh karena itu, program pelatihan dan pendampingan perlu menjadi bagian integral dari kebijakan yang dirancang. Pendekatan ini sejalan dengan temuan bahwa faktor sumber daya manusia merupakan determinan utama dalam keberhasilan implementasi sistem pertanian berbasis teknologi (Dange et al., 2023; Gupta et al., 2022).

Dari aspek kelembagaan, diperlukan penguatan kelompok tani, Perkumpulan Petani Pemakai Air (P3A), dan kelompok pengguna air sebagai unit pengelola sistem. Penyuluh pertanian dan petugas teknis irigasi dapat berperan sebagai fasilitator dalam pemantauan sistem, interpretasi data, serta pendampingan operasional teknologi di tingkat lapangan. Dari aspek pembiayaan, pemerintah daerah dapat mengembangkan skema bantuan alat, subsidi sensor dan perangkat IoT, kredit kelompok tani, maupun pendanaan berbasis program ketahanan pangan dan adaptasi perubahan iklim. Dukungan pembiayaan menjadi penting karena biaya investasi awal masih menjadi kendala utama adopsi teknologi oleh petani skala kecil. Dari aspek regulatif, model AWD–Embung–IoT perlu diintegrasikan ke dalam perencanaan pembangunan pertanian daerah, pengelolaan sumber daya air, serta program modernisasi irigasi. Integrasi ini penting untuk menjamin keberlanjutan implementasi dan sinkronisasi antar sektor yang terlibat.

Lebih lanjut, keberhasilan implementasi model integratif ini juga sangat bergantung pada sinergi antara aspek teknologi, kelembagaan, dan pembiayaan. Kebijakan yang hanya berfokus pada satu aspek cenderung tidak efektif dalam menghasilkan perubahan sistemik. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan terpadu yang melibatkan berbagai pemangku kepentingan, mulai dari pemerintah daerah, lembaga penelitian, hingga kelompok tani. Dalam konteks ini, kelembagaan lokal memiliki peran strategis dalam memfasilitasi koordinasi, distribusi sumber daya, serta keberlanjutan implementasi di tingkat lapangan. Sebagai bentuk operasionalisasi kebijakan, pengembangan program irigasi cerdas berbasis desa (*smart irrigation village*) dapat menjadi strategi yang aplikatif. Program ini mengintegrasikan pembangunan embung, penerapan teknologi IoT, serta penguatan kapasitas petani dalam satu kerangka program yang terkoordinasi. Selain itu, integrasi dengan program pemerintah yang telah berjalan, seperti pengelolaan sumber daya air dan modernisasi pertanian, dapat meningkatkan efisiensi penggunaan anggaran serta mempercepat proses adopsi teknologi di tingkat petani. Dalam implementasinya, *smart irrigation village* dapat dikembangkan sebagai kawasan percontohan yang mengintegrasikan embung desa, jaringan distribusi air, sensor lapangan, platform pemantauan digital, dan sistem pengambilan keputusan berbasis AWD. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi teknis, ekonomi, dan sosial sebelum diterapkan secara lebih luas pada wilayah semi-arid lainnya di Nusa Tenggara Barat. Kawasan percontohan ini juga dapat digunakan untuk menguji efektivitas ambang AWD, kinerja sensor, efisiensi penggunaan air, dan kelayakan ekonomi sistem sebelum direplikasi pada skala yang lebih luas.

Namun demikian, implementasi kebijakan ini masih menghadapi sejumlah tantangan, terutama terkait dengan keterbatasan data lokal, kesiapan infrastruktur, serta kapasitas kelembagaan. Oleh karena itu, diperlukan dukungan riset lanjutan yang mampu menyediakan basis empiris yang lebih kuat, khususnya terkait dengan pengujian model pada kondisi spesifik Lombok Tengah, analisis kelayakan ekonomi, serta pengembangan sistem berbasis kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) untuk meningkatkan akurasi pengambilan keputusan (Ferreira et al., 2023; Modi et al., 2020).

Secara keseluruhan, implikasi kebijakan dari model integratif AWD–Embung–IoT menegaskan bahwa transformasi pengelolaan air di wilayah semi-arid seperti Lombok Tengah memerlukan pendekatan yang tidak hanya berbasis teknologi, tetapi juga didukung oleh kerangka kelembagaan dan pembiayaan yang kuat. Integrasi ketiga aspek tersebut menjadi kunci dalam mewujudkan sistem pengelolaan air yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Berdasarkan sintesis literatur, integrasi *Alternate Wetting and Drying* (AWD), embung, dan *Internet of Things* (IoT) berpotensi membentuk sistem pengelolaan air presisi berbasis *demand–supply–control* yang relevan untuk budidaya padi pada musim tanam kedua (MT 2) di wilayah semi-arid seperti Lombok Tengah. Dalam kerangka ini, AWD berperan sebagai representasi kebutuhan air tanaman (*demand*), embung sebagai penyedia cadangan air (*supply*), dan IoT sebagai sistem pengambilan keputusan berbasis data (*control*) yang menghubungkan kedua komponen melalui mekanisme umpan balik (*closed-loop adaptive system*). Hasil kajian menunjukkan bahwa pendekatan tersebut memiliki potensi untuk mendukung pengelolaan air yang lebih adaptif melalui penyelarasan antara kebutuhan air tanaman, ketersediaan sumber air, dan keputusan irigasi berbasis data. Selain itu, implementasi model memerlukan dukungan infrastruktur, kelembagaan, pembiayaan, serta peningkatan kapasitas sumber daya manusia agar dapat diterapkan secara efektif di tingkat lapangan.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, jumlah artikel yang disintesis relatif terbatas, yaitu sebanyak 25 artikel (sesuaikan jika jumlah final adalah 23 artikel). Kedua, sebagian besar literatur yang digunakan berasal dari berbagai wilayah dan tidak secara spesifik merepresentasikan kondisi agroekologi Lombok Tengah. Ketiga, model integratif AWD–Embung–IoT yang diusulkan masih bersifat konseptual dan belum diuji secara empiris. Keempat, kajian ini menggunakan pendekatan sintesis kualitatif tanpa melakukan meta-analisis kuantitatif. Oleh karena itu, penelitian lapangan diperlukan untuk memvalidasi efektivitas teknis, ekonomi, dan sosial dari model AWD–Embung–IoT pada

kondisi spesifik Lombok Tengah, sekaligus menguji kinerja sistem dalam mendukung pengelolaan air pada musim tanam kedua di wilayah semi-arid.

REKOMENDASI

Berdasarkan hasil kajian dan kesimpulan yang diperoleh, diperlukan sejumlah langkah strategis untuk mendukung implementasi sistem pengelolaan air berbasis integrasi Alternate Wetting and Drying (AWD), embung, Internet of Things (IoT), dan energi terbarukan secara optimal, adaptif, serta berkelanjutan. Penguatan implementasi teknologi IoT perlu diarahkan pada pengembangan sistem yang lebih sederhana, terjangkau, dan sesuai dengan kondisi lokal, terutama melalui peningkatan akurasi sensor, kemudahan kalibrasi, serta kestabilan jaringan komunikasi di wilayah pertanian. Selain itu, penggunaan panel surya sebagai sumber energi bagi sensor, aktuator, pompa air, dan perangkat irigasi perlu dikembangkan untuk meningkatkan kemandirian energi petani, mengurangi ketergantungan pada listrik konvensional, serta menjamin keandalan sistem di wilayah dengan keterbatasan akses listrik. Pembangunan embung juga perlu dirancang berdasarkan analisis topografi, hidrologi, dan distribusi lahan agar mampu mendukung penerapan AWD sekaligus berfungsi sebagai penyangga air pada skala lanskap. Keberhasilan penerapan sistem tersebut perlu didukung melalui pelatihan dan pendampingan teknis secara berkelanjutan guna meningkatkan literasi digital, keterampilan pengoperasian teknologi irigasi berbasis IoT, serta kemampuan petani dalam memelihara sistem tenaga surya. Pemerintah juga perlu menyediakan dukungan kebijakan dan pembiayaan dalam bentuk insentif, subsidi teknologi, bantuan instalasi, maupun skema pembiayaan berbasis kelompok tani, khususnya bagi petani skala kecil. Seluruh komponen tersebut selanjutnya perlu dikembangkan dalam kerangka Climate-Smart Agriculture (CSA) untuk meningkatkan efisiensi penggunaan input, memperkuat adaptasi terhadap perubahan iklim, dan menjaga keberlanjutan produksi pertanian. Penelitian lanjutan juga diperlukan untuk menguji performa sistem pada berbagai kondisi agroekosistem, termasuk efisiensi energi, kelayakan ekonomi tenaga surya, peningkatan produktivitas, serta dampaknya terhadap konservasi sumber daya air.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamo, N., Al-Ansari, N., Ali, S. H., Laue, J., & ... (2021). Dams safety: Review of satellite remote sensing applications to dams and reservoirs. *Journal of Earth* <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1473014>
- Ahmed, Z., Gui, D., Murtaza, G., Yunfei, L., & Ali, S. (2023). An overview of smart irrigation management for improving water productivity under climate change in drylands. In *Agronomy*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/8/2113>
- Anand, B., Karunanidhi, D., & Subramani, T. (2021). Promoting artificial recharge to enhance groundwater potential in the lower Bhavani River basin of South India using geospatial techniques. *Environmental Science and* <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09019-1>
- Anapalli, S. S., Pinnamaneni, S. R., Reddy, K. N., Wagle, P., & Ashworth, A. J. (2023). Eddy covariance assessment of alternate wetting and drying floodwater management on rice methane emissions. *Heliyon*, 9(4), e14696. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14696>
- Bwire, D., Saito, H., Sidle, R. C., & Nishiwaki, J. (2024). Water Management and Hydrological Characteristics of Paddy-Rice Fields under Alternate Wetting and Drying Irrigation Practice as Climate Smart Practice: A Review. *Agronomy*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy14071421>
- Chinnasamy, P., Maske, A. B., Honap, V., & ... (2021). Sustainable development of water resources in marginalised semi-arid regions of India: Case study of Dahod in Gujarat, India. *Natural Resources* <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12217>
- Dange, R., Attar, E., Ghodake, P., & ... (2023). Smart agriculture automation using ESP8266 NodeMCU. In *J. Electron. Comput. Netw* [researchgate.net. https://www.researchgate.net/profile/Vaibhav-Godase/publication/372376277_Smart_Agriculture_Automation_using_ESP8266_Node_MCU/links/6630322c08aa54017acd2d99/Smart-Agriculture-Automation-using-ESP8266-Node-MCU.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vaibhav-Godase/publication/372376277_Smart_Agriculture_Automation_using_ESP8266_Node_MCU/links/6630322c08aa54017acd2d99/Smart-Agriculture-Automation-using-ESP8266-Node-MCU.pdf)

- Darmalim, F., Hidayat, A. A., Cenggoro, T. W., & ... (2021). An integrated system of mobile application and IoT solution for pond monitoring. ... *Series: Earth and ...* <https://doi.org/10.1088/1755-1315/794/1/012106>
- Ferreira, A., Rolim, J., Paredes, P., & Cameira, M. R. (2023). Methodologies for water accounting at the collective irrigation system scale aiming at optimizing water productivity. In *Agronomy*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/7/1938>
- 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 (Switzerland)*, 20(4). <https://doi.org/10.3390/s20041042>
- Gupta, A., Singh, R. K., Kumar, M., Sawant, C. P., & ... (2022). On-farm irrigation water management in India: Challenges and research gaps. *Irrigation and ...* <https://doi.org/10.1002/ird.2637>
- Hang, X., Danso, F., Luo, J., Liao, D., Zhang, J., & Zhang, J. (2022). Effects of Water-Saving Irrigation on Direct-Seeding Rice Yield and Greenhouse Gas Emissions in North China. *Agriculture (Switzerland)*, 12(7), 1–11. <https://doi.org/10.3390/agriculture12070937>
- Hansamali, U., Makumbura, R. K., Rathnayake, U., & ... (2025). Leaky dams as nature-based solutions in flood management Part I: introduction and comparative efficacy with conventional flood control infrastructure. In *Hydrology*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/2306-5338/12/4/95>
- Ishfaq, M., Farooq, M., Zulfiqar, U., Hussain, S., Akbar, N., Nawaz, A., & Anjum, S. A. (2020). Alternate wetting and drying: A water-saving and ecofriendly rice production system. *Agricultural Water Management*, 241(July), 106363. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106363>
- Jarin, A. S., Islam, M. M., Rahat, A., Ahmed, S., Ghosh, P., & Murata, Y. (2024). Drought Stress Tolerance in Rice: Physiological and Biochemical Insights. *International Journal of Plant Biology*, 15(3), 692–718. <https://doi.org/10.3390/ijpb15030051>
- Koide, J., Yokoyama, S., Hirouchi, S., Hirose, C., Oka, N., Oda, M., & Yanagihara, S. (2021). Exploring climate-resilient and risk-efficient cropping strategies using a new pond irrigation system: An experimental study in northern Ghana. *Agricultural Systems*, 191(July 2020), 103149. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103149>
- Llaban, A. B., & Ella, V. B. (2022). Conventional and sensor-based streamflow data acquisition system for sustainable water resources management and agricultural applications: An extensive review of *IOP Conference Series: Earth and ...* <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1038/1/012040>
- Lorenzo, P., Reyes, R., Medrano, E., Granados, R., & ... (2024). Hybrid passive cooling and heating system for Mediterranean greenhouses. Microclimate and sweet pepper crop response. In ... *Water Management*. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377424002725>
- Manzoor, F., Wei, L., Siraj, M., Lu, X., & Qiyang, G. (2025). Digital agriculture technology adoption in low and middle-income countries—a review of contemporary literature. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9(September), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1621851>
- Meng, C., Liu, H., Li, Y., Shen, J., Li, X., & Wu, J. (2022). Effects of environmental and agronomic factors on pond water quality within an intensive agricultural landscape in subtropical southern China. In *Agricultural Water Management*. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377422005005>
- Modi, R. U., Manjunatha, K., Gauam, P. V., & ... (2020). Climate-smart technology based farm mechanization for enhanced input use efficiency. In *Climate change and ...* https://www.researchgate.net/profile/Nagesh-Kumar-T/publication/343053973_NAARM_book_chapter_15_17jul/links/5f13c3ed299bf1e548c35a8b/NAARM-book-chapter-15-17jul.pdf
- Munir, B. A., Ahmad, S. R., & Rehan, R. (2021). Torrential flood water management: rainwater harvesting through relation based dam suitability analysis and quantification of erosion potential. In *ISPRS International Journal of Geo ...* mdpi.com. <https://www.mdpi.com/2220-9964/10/1/27>

- Murthy, R. N. S., Srikonda, R., & Kasinath, I. V. (2022). Traditional water management systems of India. In *ISVS e-journal*. isvshome.com. https://isvshome.com/pdf/ISVS_9-2/ISVS9.2.5Satyanarayana.pdf
- Oiganji, E., Igbadun, H., Amaza, P. S., & ... (2025). Innovative Technologies for Improved Water Productivity and Climate Change Mitigation, Adaptation, and Resilience: A Review. *Journal of Applied* <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authy pe=crawler&jrnl=11198362&AN=183119730&h=0H7ly3fSRTWhzKfiUv3uuLRn7ydfOv 7MK%2B4C6UGG47ORg0hfnbiZU5dw9X2fliTna33npkj2xK%2B4WDxileBL0g%3D%3 D&crl=c>
- Panwar, P., Machiwal, D., Kumari, V., Kumar, S., Dogra, P., Manivannan, S., Bhatnagar, P. R., Tomar, J. M. S., Kaushal, R., Jinger, D., Sarkar, P. K., Baishya, L. K., Devi, N. P., Kakade, V., Singh, G., Singh, N. R., Singh, S. G., Patel, A., Renjith, P. S., ... Singh, B. K. (2023). Sustainable Water Harvesting for Improving Food Security and Livelihoods of Smallholders under Different Climatic Conditions of India. *Sustainability (Switzerland)*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/su15129230>
- Raya, R. K., & Gupta, R. (2020). Rural community water management through directional tunnelling: visual modelling of rainwater harvesting system. *Water Practice & Technology*. <https://iwaponline.com/wpt/article-abstract/15/3/734/75169>
- Rodrigues, G. P., Rodrigues, Í. S., Raabe, A., & ... (2023). Direct measurement of open-water evaporation: a newly developed sensor applied to a Brazilian tropical reservoir. *Hydrological* <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2157278>
- Shang, L., Heckeley, T., Gerullis, M. K., Börner, J., & Rasch, S. (2021). Adoption and diffusion of digital farming technologies - integrating farm-level evidence and system interaction. *Agricultural Systems*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103074>
- Sikka, A. K., Alam, M. F., & Mandave, V. (2022). Agricultural water management practices to improve the climate resilience of irrigated agriculture in India. *Irrigation and Drainage*. <https://doi.org/10.1002/ird.2696>
- Teschemacher, S., Bittner, D., & Disse, M. (2020). Automated location detection of retention and detention basins for water management. In *Water*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/5/1491>
- Vélez-Nicolás, M., García-López, S., Barbero, L., & ... (2021). Applications of unmanned aerial systems (UASs) in hydrology: A review. In *Remote Sensing*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/7/1359>
- Vicente, L., Peña, D., Fernández, D., Albarrán, Á., Rato-Nunes, J. M., & López-Piñeiro, A. (2025). Alternate wetting and drying irrigation with field aged biochar may enhance water and rice productivity. *Agronomy for Sustainable Development*, 45(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-01000-3>
- Zhang, J., Ge, Y., Yuan, G., & Song, Z. (2022). Consideration of high-quality development strategies for soil and water conservation on the loess plateau. In *Scientific Reports*. nature.com. <https://www.nature.com/articles/s41598-022-12006-w>
- Zhang, Y., Wang, X., Jin, L., Ni, J., Zhu, Y., Cao, W., & Jiang, X. (2025). Research and Development of an IoT Smart Irrigation System for Farmland Based on LoRa and Edge Computing. *Agronomy*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy15020366>
- Zhu, S., Tong, W., Li, H., Li, K., Xu, W., & Liang, B. (2025). Temporal Variations in Rice Water Requirements and the Impact of Effective Rainfall on Irrigation Demand: Strategies for Sustainable Rice Cultivation. *Water (Switzerland)*, 17(5). <https://doi.org/10.3390/w17050656>
- Zulkifli, C. Z., Garfan, S., Talal, M., Alamoodi, A. H., Alamleh, A., & ... (2022). IoT-based water monitoring systems: a systematic review. In *Water*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/22/3621>