

Analisis Arsitektur *Smart Water Management Systems* Perkotaan melalui *Integrative Literature Review*

Akhmad Hafidz Ardianto¹, Muhayat², Husin Nafarin Ramadhani³

^{1,2,3} Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Dakwah dan Ilmu Komunikasi, UIN Antasari Banjarmasin

¹akhmad.hafidz.ardianto@gmail.com*, ²muhayat@uin-antasari.ac.id, ³husinafarinn@gmail.com

Abstract

This study aims to compile an integrative review of Smart Water Management Systems architecture in urban contexts to identify technology integration patterns, dominant methodological approaches, and recurring research gaps. The method used is an Integrative Literature Review of 16 national and international journal articles indexed in Scopus. The review was conducted through systematic selection, structured data extraction, and comparative-thematic synthesis to map architectural components, analytical models, optimization strategies, and evaluation frameworks. Results show that system architecture evolves in a layered structure integrating IoT for data acquisition, wireless communication networks for connectivity, cloud-edge computing for data processing, and AI/ML for predictive analytics and automated decision-making. Optimization strategies focus on water distribution efficiency, improved operational reliability, and resource loss reduction. The literature also reveals gaps in system interoperability, data standardization, cybersecurity, AI model transparency, and the lack of comprehensive evaluation dimensions. The study concludes that architectural integration and systemic evaluation are essential for developing adaptive, reliable, and sustainable urban Smart Water Management Systems.

Keywords: *smart water management systems, system architecture, smart city, integrative literature review, IoT*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menyusun tinjauan integratif terhadap arsitektur *Smart Water Management Systems* dalam konteks perkotaan untuk mengidentifikasi pola integrasi teknologi, pendekatan metodologis dominan, serta kesenjangan penelitian yang masih berulang. Metode yang digunakan adalah *Integrative Literature Review* terhadap 16 artikel jurnal nasional dan internasional terindeks Scopus yang relevan dengan topik sistem pengelolaan air cerdas. Proses kajian dilakukan melalui seleksi sistematis, ekstraksi data terstruktur, serta sintesis komparatif-tematik guna memetakan komponen arsitektur, model analitik, strategi optimasi, dan kerangka evaluasi yang digunakan dalam literatur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arsitektur sistem berkembang dalam struktur berlapis yang mengintegrasikan IoT untuk akuisisi data, jaringan komunikasi nirkabel untuk konektivitas, komputasi awan dan tepi untuk pemrosesan data, serta AI/ML untuk analitik prediktif dan pengambilan keputusan otomatis. Strategi optimasi berfokus pada efisiensi distribusi air, peningkatan keandalan operasional, dan pengurangan kehilangan sumber daya. Literatur juga memperlihatkan kesenjangan pada interoperabilitas sistem, standarisasi data, keamanan siber, transparansi model AI, serta belum terintegrasinya dimensi evaluasi secara komprehensif. Kesimpulan penelitian menegaskan pentingnya integrasi arsitektural dan evaluasi sistemik dalam pengembangan *Smart Water Management Systems* perkotaan yang adaptif, andal, dan berkelanjutan.

Kata kunci: *smart water management systems, arsitektur sistem, kota cerdas, integrative literature review, IoT*

©This work is licensed under a Creative Commons Attribution -ShareAlike 4.0 International License

1. Pendahuluan

Perkembangan kawasan perkotaan yang pesat meningkatkan tekanan terhadap pengelolaan sumber daya air akibat pertumbuhan populasi, urbanisasi, perubahan iklim, serta penuaan infrastruktur distribusi yang berdampak pada keandalan layanan publik dan keberlanjutan lingkungan. Sistem pengelolaan air konvensional yang bersifat manual dan terfragmentasi semakin tidak memadai dalam memenuhi kebutuhan operasional yang menuntut efisiensi, presisi, dan respons cepat berbasis data. Air sebagai infrastruktur kritis perkotaan berperan penting dalam kesehatan publik, stabilitas ekonomi, dan ketahanan lingkungan sehingga modernisasi tata kelola air menjadi kebutuhan strategis [1-3].

Literatur menunjukkan bahwa pengembangan sistem air cerdas didukung oleh integrasi *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin

(AI/ML), komputasi awan (*cloud computing*) dan komputasi tepi (*edge computing*), jaringan sensor nirkabel, serta teknologi keamanan dan tata kelola data. IoT memungkinkan akuisisi data *real-time* melalui sensor kualitas air, tekanan pipa, dan debit aliran. Komputasi awan menyediakan integrasi lintas sistem, sementara komputasi tepi mendukung pemrosesan lokal berlatensi rendah. Pada lapisan analitik, AI/ML dimanfaatkan untuk deteksi anomali, prediksi permintaan, dan optimasi distribusi [4-7].

Meskipun demikian, berbagai studi masih menunjukkan fragmentasi pendekatan dan kesenjangan implementasi yang signifikan. Banyak penelitian berfokus pada komponen teknologi secara parsial tanpa integrasi arsitektural yang menyeluruh. Implementasi sistem juga sering terbatas pada prototipe sehingga skalabilitas pada jaringan air perkotaan yang kompleks belum tervalidasi secara komprehensif. Tantangan interoperabilitas antar perangkat dan integrasi platform

heterogen turut menghambat pembangunan sistem terpadu [2,3][8,9].

Berdasarkan konteks tersebut, penelitian ini bertujuan menyusun tinjauan integratif terhadap arsitektur *Smart Water Management Systems* dalam konteks perkotaan. Kajian ini memetakan pola integrasi IoT, AI/ML, komputasi awan dan komputasi tepi, jaringan sensor nirkabel, serta teknologi keamanan data; mengidentifikasi pendekatan metodologis dan strategi optimasi dominan; serta mengungkap kesenjangan konseptual, teknis, dan tata kelola yang masih berulang dalam literatur [1,2][4,5].

2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan *Integrative Literature Review* untuk mensintesis secara komprehensif arsitektur *Smart Water Management Systems* dalam konteks perkotaan berdasarkan 16 artikel jurnal nasional dan internasional terindeks Scopus. Desain penelitian bersifat kualitatif-sintesis dengan kerangka integratif yang menggabungkan identifikasi temuan konseptual, komparasi pendekatan metodologis, serta evaluasi bukti empiris lintas studi.

Sampel penelitian berupa artikel jurnal yang dipilih melalui proses penyaringan bertahap berdasarkan relevansi topik, kesesuaian kata kunci, dan kontribusi terhadap integrasi IoT, AI/ML, komputasi awan dan komputasi tepi, jaringan sensor nirkabel, dan keamanan data. Kriteria inklusi mencakup: (1) publikasi terindeks Scopus, (2) memiliki pembahasan arsitektur atau implementasi sistem, (3) menyajikan metodologi yang jelas, serta (4) memuat temuan empiris atau konseptual yang dapat dibandingkan lintas studi.

Instrumen penelitian berupa lembar ekstraksi data terstruktur yang merekam tujuan studi, desain sistem, komponen arsitektur, teknologi inti, metode analitik, strategi optimasi, metrik evaluasi, temuan utama, serta keterbatasan penelitian. Analisis data dilakukan melalui teknik komparatif-tematik untuk mengidentifikasi pola arsitektur dominan, kecenderungan metodologis, serta pemetaan kesenjangan konseptual dan teknis yang berulang dalam literatur [1-5][8,9].

Literatur dalam penelitian ini dikumpulkan melalui dua jalur pencarian. Pertama, literatur awal diperoleh melalui Google Scholar yang diakses menggunakan aplikasi *Publish or Perish* (PoP). Pencarian awal tersebut menjadi dasar penyusunan kajian dan menghasilkan kumpulan studi yang digunakan dalam naskah awal. Kedua, pencarian tambahan dilakukan melalui *Lens Scholarly Search* terhadap publikasi ilmiah tahun 2021–2025 untuk memperkuat cakupan literatur, khususnya pada aspek sistem air perkotaan, digitalisasi infrastruktur air, *smart stormwater management*, dan arsitektur pemrosesan data, menggunakan kombinasi kata kunci: ("smart water management" OR "smart water grid" OR "urban water system" OR "urban water management") AND (IoT

OR "Internet of Things" OR "artificial intelligence" OR "machine learning"). Hasil pencarian dari kedua jalur tersebut disaring berdasarkan judul, abstrak, relevansi terhadap konteks perkotaan, jenis publikasi, dan ketersediaan informasi metodologis. Artikel yang berfokus pada *smart irrigation*, *precision agriculture*, *smart farming*, atau bidang non-perkotaan tanpa keterkaitan langsung dengan sistem air perkotaan dikeluarkan. Studi yang memenuhi kriteria inklusi kemudian diperiksa melalui *full text* dan dianalisis menggunakan lembar ekstraksi data terstruktur. Dua studi tambahan dari pencarian Lens dipertahankan karena memperkuat pembahasan mengenai *smart stormwater management* dan arsitektur pemrosesan data dalam sistem pengelolaan air. Karakteristik seluruh studi yang dianalisis disajikan pada Tabel 1.

Untuk menjamin ketertelusuran setiap klaim komparatif pada Bagian 3 kembali ke studi sumbernya, disusun tabel karakteristik studi (Tabel 1) yang memuat 16 artikel yang direview. Ekstraksi data dilakukan secara manual dengan membaca judul, abstrak, dan isi penuh (bila tersedia akses terbuka) setiap artikel, kemudian mencatat lima atribut standar untuk tiap studi: (1) penulis dan tahun publikasi, (2) negara/lokasi atau konteks penerapan, (3) arsitektur/teknologi utama yang dibahas, (4) metode penelitian, dan (5) temuan utama. Aspek yang dibandingkan antar-studi meliputi lapisan arsitektur *Smart Water Management Systems* yang menjadi fokus (akuisisi, komunikasi, komputasi, analitik, optimasi, atau keamanan), jenis metode yang digunakan (review konseptual, studi kasus, atau perancangan/pengujian prototipe, serta tingkat validasi temuan (konseptual, simulasi, atau implementasi nyata).

Tabel 1. Karakteristik 16 Studi yang Direview

No. Sumber	& Konteks	Arsitektur/Teknologi & Metode	Temuan Utama
1. Aivazidou et al. (2021)	Urban water management; konteks umum	Smart technologies, IoT, digitalisasi, keberlanjutan. Analisis urban dan review konseptual.	Memetakan peran teknologi cerdas dalam mendukung pengelolaan air perkotaan yang berkelanjutan.
2. Al-Qaisi (2025)	Urban water resource; lokasi tidak dirinci	AI, IoT, prediksi permintaan, deteksi kebocoran. Analisis penerapan teknologi dan pendekatan prediktif.	Menunjukkan potensi AI dan IoT untuk meningkatkan efisiensi distribusi, prediksi kebutuhan, dan pengurangan kehilangan air.
3. Ramos et al. (2023)	Madeira, Portugal	Smart water grid, digital twin, jaringan distribusi, DMA. Implementasi	Digital twin dapat mendukung pemantauan jaringan, identifikasi kehilangan air, dan peningkatan

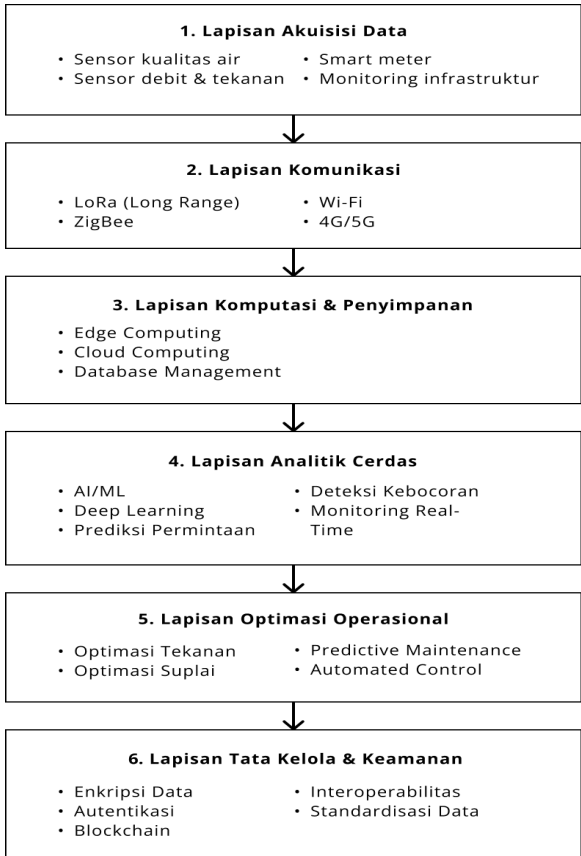
No. & Sumber	Konteks	Arsitektur/Teknologi & Metode	Temuan Utama	No. & Sumber	Konteks	Arsitektur/Teknologi & Metode	Temuan Utama
		dan evaluasi digital twin.	efisiensi operasional.			sekitar 90 studi.	
4. Fu et al. (2022)	Urban water management; kajian lintas konteks	Deep learning, prediksi permintaan, deteksi kebocoran, prediksi banjir. Critical review.	Deep learning memiliki banyak aplikasi, tetapi sebagian besar penelitian masih berada pada tahap laboratorium, benchmark, atau pilot project.	12. Syrmos et al. (2023)	Yunani; sistem monitoring air modular	IoT, sensor kuantitatif dan monitoring real-time. Perancangan dan validasi prototipe.	Sistem modular dapat mengukur parameter kuantitas dan kualitas air secara real-time serta mendukung pengembangan infrastruktur air cerdas.
5. Dada et al. (2024)	Water dan wastewa ter management; konteks umum	IoT, AI, sensor, monitoring, pengolahan air. Narrative review.	Integrasi IoT dan AI dapat meningkatkan monitoring dan pengolahan air, tetapi masih menghadapi tantangan integrasi dan implementasi.	13. Patgar, Satyanaik, & Ramakrishna (2023)	Smart water grid; konteks umum	IoT, WSN, AI, blockchain, monitoring real-time. Conceptual review.	Mengusulkan integrasi teknologi untuk monitoring kualitas air dan pengembangan smart water grid.
6. Ali et al. (2022)	Mesir; sistem distribusi dan monitoring air	IoT, sensor pH, turbidity, flow, cloud/Firebase. Perancangan dan pengujian prototipe.	Prototipe mendukung monitoring kualitas air, aliran, dan deteksi kebocoran secara real-time.	14. Krishnan et al. (2022)	Water management; distribusi, kualitas air, dan pengolahan	AI, deep learning, IoT, distribusi air, wastewater. Review dan sintesis studi kasus.	AI, deep learning, dan IoT berpotensi mendukung distribusi, konservasi, monitoring kualitas, dan pengolahan air.
7. Okoli & Kabaso (2024)	Smart water city; konteks Afrika Selatan/global	IoT, smart metering, platform digital, teknologi kota cerdas. Review aplikasi dan arah pengembangan	Mengidentifikasi aplikasi IoT untuk monitoring, distribusi, konservasi, dan pengelolaan air pada kota cerdas.	15. Webber et al. (2022)	Urban stormwater management; konteks perkotaan global	IoT, real-time control, smart stormwater, optimasi jaringan. Review dan pengembangan framework.	Smart stormwater berkembang untuk pengendalian kuantitas air, tetapi bukti implementasi nyata dan pengendalian kualitas air masih terbatas.
8. Jayaraman et al. (2024)	Water quality monitoring; lintas konteks	IoT, machine learning, GIS, sensor kualitas air. Critical review.	Membandingkan penerapan beberapa model machine learning untuk analisis kualitas air dan menyoroti masalah kualitas data.	16. Kenda et al. (2022)	Water management berbasis data; konteks umum	Arsitektur big data, IoT, data fusion, stream mining, predictive analytics. Perancangan arsitektur dan platform analitik.	Arsitektur pemrosesan real-time dan penggabungan data heterogen meningkatkan kemampuan analitik prediktif dalam pengelolaan air.
9. Joseph et al. (2023)	Water pipe networks ; konteks jaringan distribusi	Sensor akustik, tekanan, perangkat keras, AI/ML. Literature review komparatif.	Metode hardware dan software memiliki kelebihan berbeda dalam sensitivitas, akurasi, biaya, dan keandalan deteksi kebocoran.				
10. Lowe et al. (2022)	Water treatment dan monitoring; konteks umum	AI, machine learning, smart technology, sensor. Review literatur.	AI dapat diterapkan pada monitoring kualitas air, pengolahan air, prediksi, dan pengendalian proses.				
1. Taloma et al. (2025)	Smart water distribusi; lintas konteks	Machine learning, smart metering, water distribution. Review terhadap	Memetakan aplikasi ML untuk distribusi air, smart metering, daur ulang air, dan pemeliharaan prediktif.				

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Sintesis Arsitektur Sistem dan Integrasi Teknologi

Hasil sintesis menunjukkan bahwa *arsitektur Smart Water Management Systems* dalam konteks perkotaan umumnya dibangun menggunakan pendekatan sistem berlapis. Lapisan dasar terdiri dari perangkat *sensing* berbasis IoT yang mengumpulkan data kondisi air dan lingkungan secara *real-time*. Data dari berbagai sensor diteruskan melalui jaringan komunikasi nirkabel yang memastikan konektivitas antar perangkat dan pusat pemrosesan. Infrastruktur komputasi memanfaatkan kombinasi komputasi awan dan komputasi tepi untuk menyeimbangkan kebutuhan analisis berskala besar dan respons cepat di lapangan. Lapisan analitik memanfaatkan AI/ML untuk mengolah data menjadi informasi prediktif dan preskriptif. Integrasi keamanan

data diterapkan untuk menjaga kerahasiaan, integritas, dan keandalan sistem. Hasil sintesis menunjukkan bahwa arsitektur *Smart Water Management Systems* dalam konteks perkotaan umumnya berkembang dalam enam lapisan utama yang saling terintegrasi, yaitu lapisan akuisisi data, komunikasi, komputasi dan penyimpanan data, analitik berbasis AI/ML, optimasi operasional, serta keamanan dan tata kelola sistem. Keenam lapisan tersebut membentuk alur pengelolaan data dan pengambilan keputusan yang mendukung efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan pengelolaan sumber daya air. Pola arsitektur konseptual hasil sintesis literatur tersebut diilustrasikan pada Gambar 1.

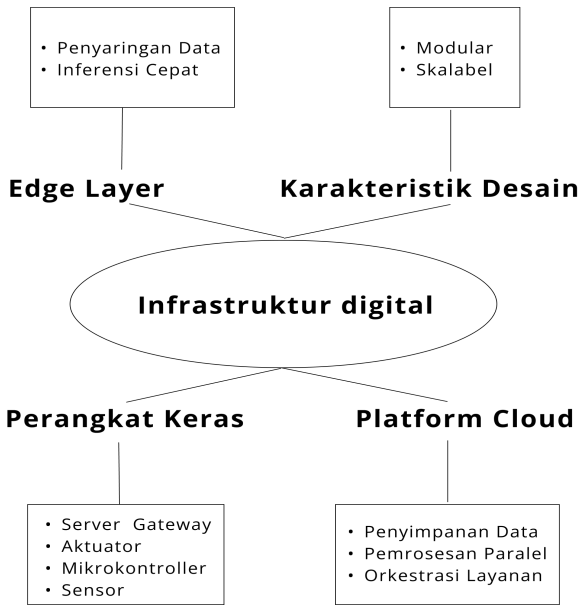


Gambar 1. Arsitektur Konseptual *Smart Water Management Systems* berdasarkan hasil sintesis literatur.

3.2. Infrastruktur Digital Sistem

Literatur yang ditinjau memaparkan bahwa infrastruktur digital *Smart Water Management System* terdiri dari komponen perangkat keras, perangkat lunak, dan platform layanan yang saling terintegrasi. Perangkat keras mencakup node sensor, mikrokontroler, gateway komunikasi, server komputasi, serta perangkat aktuator distribusi. Platform layanan berbasis *komputasi awan* menyediakan penyimpanan terpusat, pemrosesan paralel, serta orkestrasi layanan analitik. *Lapisan komputasi tepi* ditempatkan dekat sumber data untuk melakukan penyaringan awal dan inferensi cepat. Infrastruktur dirancang modular dan skalabel agar mudah dikembangkan.

Berdasarkan Gambar 2, infrastruktur digital berperan sebagai fondasi utama yang menghubungkan proses akuisisi data, pemrosesan, dan penyediaan layanan analitik dalam *Smart Water Management Systems*. Integrasi antara perangkat keras, platform komputasi awan, dan lapisan komputasi tepi memungkinkan sistem mengelola data dalam volume besar sekaligus mempertahankan respons yang cepat terhadap perubahan kondisi operasional. Pendekatan ini mendukung pengambilan keputusan yang lebih adaptif dan meningkatkan efisiensi pengelolaan sumber daya air pada lingkungan perkotaan yang kompleks.



Gambar 2. Komponen Infrastruktur Digital *Smart Water Management Systems* hasil sintesis literatur.

3.3. Model Analitik dan Pendekatan AI/ML

Hasil sintesis menunjukkan dominasi pendekatan analitik berbasis kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin. Model klasifikasi digunakan untuk mendeteksi kebocoran dan anomali distribusi air. Model regresi diterapkan untuk memprediksi permintaan dan kebutuhan suplai air. Pendekatan *deep learning* spasial dimanfaatkan untuk analisis citra dan pemantauan infrastruktur. Model temporal digunakan untuk peramalan konsumsi dan kualitas air berbasis deret waktu. Klasifikasi model AI/ML yang ditemukan dalam literatur beserta fungsi utamanya dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Model Analitik dan AI/ML

Kategori Model	Contoh Model	Fungsi
Klasifikasi	Random Forest, SVM	Deteksi kebocoran, anomali
Regresi	Linear/Nonlinear Regression	Prediksi permintaan air
Deep Learning Spasial	CNN	Analisis citra infrastruktur
Deep Learning Temporal	LSTM	Peramalan konsumsi air

Kategori Model	Contoh Model	Fungsi
Deep Learning Lanjutan	Deep Belief Network	Klasifikasi kebutuhan operasional
Pembelajaran Adaptif	Reinforcement Learning	Kendali berbasis umpan balik
Visualisasi	Dashboard KPI	Pemantauan performa

Berdasarkan Tabel 2, pendekatan pembelajaran mesin dan pembelajaran mendalam mendominasi implementasi analitik dalam *Smart Water Management Systems*. Model klasifikasi seperti Random Forest dan SVM banyak digunakan untuk deteksi kebocoran dan anomali, sedangkan model temporal seperti LSTM dimanfaatkan untuk peramalan kebutuhan dan konsumsi air. Temuan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan AI/ML tidak hanya berfokus pada monitoring, tetapi juga mendukung optimasi operasional dan pengambilan keputusan berbasis data [14].

Meski Random Forest dan SVM unggul dalam interpretabilitas dan kecepatan pelatihan, model deep learning seperti LSTM dan CNN memerlukan volume data lebih besar namun menawarkan akurasi lebih tinggi pada pola non-linear yang kompleks.

3.4. Pendekatan Metodologis dan Evaluasi

Literatur memperlihatkan dominasi desain eksperimental berbasis prototipe dan simulasi sistem. Evaluasi performa menggunakan metrik kuantitatif seperti akurasi prediksi dan efisiensi penggunaan air. Validasi silang dilakukan untuk membandingkan algoritma. Uji lapangan dilakukan untuk verifikasi operasional nyata. Ringkasan pendekatan metodologis dan praktik evaluasi yang ditemukan dalam literatur disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pendekatan Metodologis dan Evaluasi

Aspek	Praktik Umum
Desain Studi	Eksperimen prototipe, simulasi
Sumber Data	Sensor real-time, data historis
Metrik Evaluasi	Akurasi, efisiensi air, reliabilitas
Validasi Model	Cross-validation, komparasi algoritma
Pengujian Sistem	Simulasi skenario, uji lapangan
Evaluasi Dampak	Perbandingan sebelum–sesudah

Berdasarkan Tabel 3, sebagian besar penelitian menggunakan desain eksperimen berbasis prototipe dan simulasi dengan memanfaatkan data sensor *real-time* serta data historis. Evaluasi kinerja umumnya dilakukan melalui pengukuran akurasi, efisiensi penggunaan air, dan reliabilitas sistem, sedangkan validasi model dilakukan menggunakan teknik *cross-validation* dan komparasi algoritma.

Uji lapangan memberikan validitas eksternal yang lebih kuat dibanding simulasi, namun jumlah studi yang mencapai tahap ini jauh lebih sedikit dibanding

studi berbasis prototipe laboratorium, menandakan kesenjangan antara validitas konseptual dan kesiapan implementasi nyata.

3.5. Strategi Optimasi Operasional

Strategi optimasi difokuskan pada efisiensi distribusi dan pengurangan pemborosan air. Sistem memanfaatkan prediksi permintaan untuk penjadwalan suplai. Optimasi tekanan jaringan diterapkan untuk mengurangi kebocoran. Integrasi data cuaca digunakan untuk adaptasi distribusi. Pemeliharaan prediktif mendukung keberlanjutan infrastruktur. Strategi optimasi yang ditemukan dalam literatur beserta tujuan penerapannya dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Strategi Optimasi Operasional

Strategi	Tujuan
Prediksi Permintaan	Penyesuaian suplai air
Optimasi Tekanan	Mengurangi kebocoran
Kendali Dinamis	Respons otomatis berbasis sensor
Integrasi Cuaca	Adaptasi kondisi eksternal
Peringatan Dini	Deteksi anomali sistem
Optimasi Multi-Parameter	Efisiensi energi & stabilitas
Pemeliharaan Prediktif	Perawatan berbasis data

Berdasarkan Tabel 4, strategi optimasi dalam *Smart Water Management Systems* berfokus pada peningkatan efisiensi distribusi air, pengurangan kehilangan sumber daya, dan peningkatan respons sistem terhadap perubahan kondisi operasional. Pendekatan yang paling umum meliputi prediksi permintaan, optimasi tekanan jaringan, integrasi data cuaca, serta pemeliharaan prediktif yang mendukung keberlanjutan infrastruktur dan efisiensi operasional.

Optimasi tekanan jaringan lebih cepat diterapkan pada infrastruktur yang sudah terdigitalisasi, sedangkan integrasi data cuaca menuntut ketersediaan sumber data eksternal yang tidak selalu tersedia di semua konteks perkotaan.

3.6. Keamanan Data dan Tata Kelola Sistem

Literatur menunjukkan penerapan mekanisme keamanan komunikasi dan kontrol akses sistem. Enkripsi digunakan untuk melindungi transmisi data. *Blockchain* dimanfaatkan untuk integritas data terdistribusi. *Explainability AI* (XAI) mulai diterapkan untuk transparansi keputusan. Standar interoperabilitas mendukung pertukaran data lintas platform. Domain keamanan dan tata kelola yang diidentifikasi dalam literatur beserta bentuk implementasinya dirangkum pada Tabel 5.

Tabel 5. Keamanan Data dan Tata Kelola

Domain	Implementasi
Keamanan Komunikasi	Enkripsi data
Autentikasi	Kontrol akses berbasis peran
Integritas Data	Blockchain

Domain	Implementasi
Audit Sistem	Logging aktivitas
Keamanan Siber	Mitigasi serangan
Explainability AI	Transparansi model
Interoperabilitas	Standar pertukaran data

Berdasarkan Tabel 5, aspek keamanan dan tata kelola tidak hanya berfokus pada perlindungan data melalui enkripsi dan kontrol akses, tetapi juga mencakup integritas data, audit sistem, interoperabilitas, serta transparansi model AI. *Blockchain* menawarkan integritas data terdistribusi yang kuat namun menambah *overhead* komputasi dan latensi, sehingga penerapannya lebih cocok pada sistem berskala kecil-menengah dibanding jaringan *real-time* berskala kota besar. Temuan ini menunjukkan bahwa pengembangan *Smart Water Management Systems* memerlukan pendekatan keamanan yang komprehensif untuk menjamin keandalan operasional dan kepercayaan terhadap sistem.

3.7. Kesenjangan Implementasi dan Evaluasi

Sintesis menunjukkan keterbatasan implementasi skala besar dan hambatan integrasi sistem heterogen [15]. Standarisasi data masih bervariasi. Reprodusibilitas model belum konsisten. Metrik evaluasi berbeda antar studi. Biaya infrastruktur tinggi dan standar tata kelola belum seragam. Berbagai area kesenjangan implementasi dan evaluasi yang masih ditemukan dalam literatur dirangkum pada Tabel 6.

Tabel 6. Kesenjangan Implementasi dan Evaluasi

Area Kesenjangan	Temuan Utama
Skala Implementasi	Dominan prototipe
Interoperabilitas	Integrasi perangkat heterogen
Standarisasi Data	Variasi format & kualitas
Reprodusibilitas	Detail model terbatas
Evaluasi Kinerja	Metrik tidak seragam
Infrastruktur	Konektivitas & biaya tinggi
Tata Kelola	Standar belum seragam
Dampak Jangka Panjang	Studi longitudinal terbatas

Berdasarkan Tabel 6, kesenjangan yang paling sering ditemukan dalam literatur meliputi keterbatasan implementasi skala besar, interoperabilitas perangkat yang heterogen, serta belum seragamnya standar data dan metrik evaluasi. Selain itu, tingginya kebutuhan infrastruktur dan terbatasnya studi longitudinal menunjukkan bahwa pengembangan *Smart Water Management Systems* masih menghadapi tantangan dalam penerapan jangka panjang dan validasi pada lingkungan operasional yang kompleks.

3.8. Pembahasan RQ1: Pola Arsitektur dan Integrasi Teknologi

Temuan penelitian menunjukkan bahwa pola arsitektur *Smart Water Management Systems* dalam literatur berkembang menuju konfigurasi sistem berlapis yang mengintegrasikan *sensing*, komunikasi, komputasi,

analitik, dan kendali otomatis dalam satu alur operasional terpadu. Pada lapisan dasar, IoT berfungsi sebagai fondasi akuisisi data melalui sensor kelembapan, debit air, tekanan pipa, kualitas air, dan parameter lingkungan lainnya [1][4][7]. Lapisan komunikasi menghubungkan perangkat melalui protokol LoRa, ZigBee, Wi-Fi, dan jaringan seluler yang dipilih berdasarkan kebutuhan jangkauan dan efisiensi energi [5,6]. Komputasi awan membentuk tulang punggung pemrosesan data, yang menyediakan agregasi berskala besar, sementara *komputasi tepi* memberikan respons cepat berlatensi rendah [9][11].

Signifikansi temuan ini terletak pada penegasan bahwa kemajuan *Smart Water Management Systems* tidak cukup dipahami hanya dari kecanggihan satu teknologi, tetapi dari kualitas integrasi antar-lapisan sistem. Dalam konteks perkotaan, sistem air merupakan infrastruktur kritis yang membutuhkan keandalan, skalabilitas, dan interoperabilitas dalam lingkungan operasional yang kompleks [1][13].

Secara komparatif, literatur yang ditinjau menunjukkan bahwa protokol komunikasi yang digunakan sangat bervariasi sesuai konteks implementasi, terangkum pada Tabel 7. Studi berbasis jaringan distribusi perkotaan berskala besar cenderung memanfaatkan infrastruktur seluler (4G/5G) dan *wide-area network* untuk cakupan luas, sementara implementasi skala kecil atau pedesaan lebih memilih LoRa atau ZigBee karena efisiensi energi dan biaya rendah [5-7].

Tabel 7. Perbandingan Teknis Protokol

Protokol	Karakteristik Teknis dan Konteks Ideal
LoRa WAN	Jangkauan 2–15 km, latensi tinggi (hitungan detik), daya sangat rendah, biaya rendah–sedang. Ideal untuk sensor tersebar dengan volume data kecil.
ZigBee	Jangkauan 10–100 m/node, latensi rendah–sedang, daya rendah, biaya rendah–sedang. Ideal untuk gedung dan kompleks perumahan.
4G/LTE	Cakupan operator seluler, latensi puluhan ms, daya sedang–tinggi, biaya sedang–tinggi. Ideal untuk jaringan distribusi kota besar.
5G	Cakupan jaringan 5G, latensi sangat rendah pada kondisi ideal, daya sedang–tinggi, biaya tinggi. Ideal untuk data besar dan kendali real-time.

Perbandingan ini menegaskan adanya *trade-off* eksplisit antara jangkauan, latensi, dan biaya: LoRa unggul dalam efisiensi energi dan biaya namun terbatas pada transmisi data volume rendah dengan latensi tinggi, sedangkan 4G/5G menawarkan latensi rendah dan kapasitas data besar dengan konsekuensi biaya operasional dan konsumsi daya yang jauh lebih tinggi.

Variasi ini mencerminkan bahwa tidak ada arsitektur tunggal yang optimal untuk semua konteks; pemilihan komponen teknologi sangat bergantung pada skala jaringan, ketersediaan infrastruktur, dan anggaran operasional [1][9].

Selain aspek teknis, integrasi teknologi pada *Smart Water Management Systems* juga menunjukkan

pergeseran paradigma dari pendekatan pemantauan pasif menuju pengelolaan yang lebih proaktif dan prediktif. Ketersediaan data secara berkelanjutan memungkinkan sistem mengidentifikasi potensi gangguan lebih awal, sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum berdampak pada kualitas layanan. Kondisi ini memperlihatkan bahwa nilai utama sistem tidak hanya terletak pada kemampuan pengumpulan data, tetapi juga pada kemampuan mengubah data menjadi informasi yang mendukung pengambilan keputusan operasional.

3.9. Pembahasan RQ2: Metodologi, Model Analitik, dan Optimasi

Temuan untuk RQ2 menunjukkan bahwa literatur didominasi oleh pendekatan metodologis kuantitatif berbasis pengumpulan data sensor *real-time*, integrasi data historis, eksperimen prototipe, dan evaluasi performa berbasis metrik terukur [1][9,10]. Dari sisi model analitik, pembelajaran mesin menjadi pendekatan paling dominan, dengan Random Forest untuk klasifikasi dan deteksi kebocoran, LSTM untuk pemodelan temporal, CNN untuk analisis data spasial, serta *Deep Belief Network* untuk klasifikasi kondisi operasional dan kebutuhan distribusi air perkotaan [3][8][11].

Strategi optimasi yang ditemukan berfokus pada efisiensi distribusi air, pengurangan *non-revenue water*, peningkatan akurasi prediksi kebutuhan, dan penghematan biaya operasional [3][9][12]. Integrasi data cuaca, data historis, dan kondisi operasional *real-time* menjadi ciri penting dalam strategi optimasi yang lebih maju [16]. Analitik komputasi awan dan komputasi tepi digunakan untuk menyeimbangkan kebutuhan analisis mendalam dan respons cepat [6][11].

Dari perspektif evaluasi, mayoritas studi menggunakan metrik kuantitatif seperti akurasi model (*accuracy*, *precision*, *recall*), efisiensi penggunaan air, serta pengurangan kehilangan air jaringan. Namun, hanya sedikit studi yang mengintegrasikan evaluasi dampak sosial-ekonomi atau keberlanjutan jangka panjang. Ketiadaan kerangka evaluasi yang seragam menjadi hambatan dalam membandingkan kinerja sistem lintas studi dan konteks geografis yang berbeda [10][13].

Selain peningkatan akurasi model, beberapa penelitian juga menekankan pentingnya kemampuan adaptasi model terhadap perubahan kondisi lingkungan dan pola konsumsi air. Sistem yang mampu memperbaiki parameter analitik secara berkelanjutan dinilai lebih efektif dalam menghadapi dinamika kebutuhan perkotaan dibandingkan model statis yang hanya dilatih menggunakan data historis pada periode tertentu. Temuan ini menunjukkan bahwa aspek adaptivitas menjadi faktor penting dalam pengembangan sistem pengelolaan air cerdas generasi berikutnya.

3.10. Pembahasan RQ3: Kesenjangan dan Evaluasi

Temuan penelitian menunjukkan bahwa meskipun literatur sangat kaya dalam inovasi teknologi, masih terdapat kesenjangan yang berulang pada aspek implementasi nyata, integrasi sistem, keamanan, tata kelola data, dan evaluasi komprehensif. Banyak studi berfokus pada prototipe atau uji coba skala terbatas, sehingga transferabilitas ke sistem perkotaan berskala besar belum dapat dipastikan [11][13].

Interoperabilitas antar perangkat dan antar platform terus muncul sebagai kendala, terutama ketika sistem harus mengintegrasikan sensor, protokol komunikasi, platform komputasi awan, dan model AI yang berbeda dalam satu ekosistem [4][9]. Masalah manajemen data seperti kualitas sensor, standardisasi format, dan kurangnya transparansi pelaporan membuat reproduktibilitas penelitian menjadi lemah [10]. *Explainability AI (XAI)* masih rendah, padahal sistem air cerdas berkaitan dengan infrastruktur publik yang memerlukan akuntabilitas keputusan otomatis [10].

Temuan ini mengindikasikan kebutuhan mendesak akan agenda penelitian masa depan yang berfokus pada: (1) pengembangan standar interoperabilitas terbuka untuk ekosistem *Smart Water Management Systems*; (2) kerangka evaluasi terpadu yang mencakup dimensi teknis, sosial, dan lingkungan; (3) metodologi pengujian skala besar yang dapat menghasilkan bukti transferabilitas sistem dari kondisi laboratorium ke jaringan air perkotaan nyata; serta (4) integrasi mekanisme *explainable AI* dalam sistem pengambilan keputusan yang berkaitan dengan infrastruktur publik kritis [1][10][13].

Dari perspektif implementasi, keberhasilan pengembangan *Smart Water Management Systems* tidak hanya ditentukan oleh kesiapan teknologi, tetapi juga oleh kesiapan organisasi dan kebijakan pendukung. Ketersediaan standar interoperabilitas, regulasi pengelolaan data, serta kapasitas sumber daya manusia menjadi faktor penting yang mempengaruhi keberlanjutan penerapan sistem. Oleh karena itu, penelitian mendatang perlu mempertimbangkan aspek teknis dan nonteknis secara seimbang agar proses adopsi teknologi dapat berjalan lebih efektif.

Di luar deskripsi tiap lapisan secara terpisah, temuan literatur juga memperlihatkan adanya rantai ketergantungan sebab-akibat antar-lapisan arsitektur yang mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan. Pertama, kualitas data pada lapisan akuisisi menentukan batas atas akurasi model analitik pada lapisan berikutnya: sensor dengan tingkat noise tinggi atau frekuensi sampling rendah menghasilkan data pelatihan yang kurang representatif, sehingga model AI/ML sekuat apa pun arsitekturnya tetap akan mewarisi keterbatasan tersebut dalam bentuk prediksi yang kurang akurat atau deteksi anomali yang tidak konsisten. Kedua, pilihan protokol komunikasi pada lapisan konektivitas secara langsung membentuk batasan latensi yang dapat dicapai lapisan komputasi tepi: protokol berdaya rendah seperti LoRa yang

mengorbankan kecepatan transmisi demi efisiensi energi akan membatasi kemampuan komputasi tepi untuk memberikan respons *near-real-time*, sehingga *trade-off* yang dibuat pada lapisan komunikasi merambat menjadi batasan fungsional pada lapisan analitik dan optimasi. Ketiga, penguatan mekanisme keamanan pada lapisan tata kelola, contohnya enkripsi *end-to-end* atau validasi berbasis *blockchain* akan menambah overhead komputasi yang berpotensi meningkatkan latensi pemrosesan, sehingga terdapat *trade-off* implisit antara tingkat keamanan sistem dan kecepatan respons operasional yang jarang dibahas secara eksplisit dalam literatur yang ditinjau.

Pola ketergantungan ini menunjukkan bahwa lapisan akuisisi data berfungsi sebagai titik kritis (*bottleneck*) utama dalam arsitektur *Smart Water Management Systems*: keterbatasan pada lapisan ini baik berupa kualitas sensor, cakupan jaringan, maupun batasan protokol komunikasi — akan merambat dan membatasi performa optimal pada seluruh lapisan di atasnya, betapapun canggih model analitik atau strategi optimasi yang diterapkan. Temuan ini menegaskan bahwa penguatan *Smart Water Management Systems* perlu diprioritaskan pada peningkatan kualitas dan keandalan lapisan dasar, bukan semata-mata pada kompleksitas model analitik di lapisan atas.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa arsitektur *Smart Water Management Systems* dalam konteks perkotaan berkembang menuju pola sistem berlapis yang mengintegrasikan sensing berbasis IoT, jaringan komunikasi nirkabel, komputasi awan dan tepi, analitik AI/ML, serta mekanisme keamanan dan tata kelola data dalam satu ekosistem operasional terpadu. Efektivitas sistem tidak ditentukan oleh kecanggihan satu teknologi secara terpisah, melainkan oleh kualitas integrasi antar-lapisan yang memungkinkan pemantauan *real-time*, analitik prediktif, dan kendali otomatis yang adaptif.

Model analitik seperti Random Forest, SVM, CNN, LSTM, dan pendekatan pembelajaran mendalam lainnya menjadi tulang punggung optimasi operasional, terutama dalam deteksi anomali, prediksi permintaan, dan efisiensi distribusi air. Namun demikian, literatur memperlihatkan kesenjangan berulang pada aspek interoperabilitas sistem, standarisasi data, reproduisibilitas metodologi, keamanan siber, *explainability AI* (XAI), serta belum terintegrasinya dimensi evaluasi secara menyeluruh. Penelitian ini berkontribusi dengan memperjelas arah pengembangan *Smart Water Management Systems* sebagai disiplin integratif yang menggabungkan teknologi, metodologi, dan tata kelola.

Implikasi praktis dari hasil penelitian ini adalah perlunya pengembangan arsitektur yang tidak hanya berorientasi pada integrasi teknologi, tetapi juga memperhatikan interoperabilitas, keamanan data, dan mekanisme evaluasi yang terstandarisasi. Dengan

demikian, implementasi *Smart Water Management Systems* di lingkungan perkotaan dapat memberikan manfaat yang lebih berkelanjutan serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data secara lebih efektif.

Daftar Rujukan

- [1] Aivazidou, E., Baniyas, G., Lampridi, M., Vasileiadis, G., Anagnostis, A., Papageorgiou, E. I., and Bochtis, D., 2021. Smart Technologies for Sustainable Water Management: An Urban Analysis. *Sustainability*, 13(24), 13940. doi:10.3390/su132413940.
- [2] Al-Qaisi, A. Z., 2025. Smart Water Systems: The Role of Technology and Engineering in Optimizing Urban Water Resources. *Journal of Information Systems Engineering & Management*, 10(21s), pp. 833-846. doi:10.52783/jisem.v10i21s.3445.
- [3] Ramos, H. M., Kuriqi, A., Besharat, M., Creaco, E., Tasca, E., Coronado-Hernández, O. E., Pienika, R., and Iglesias-Rey, P., 2023. Smart Water Grids and Digital Twin for the Management of System Efficiency in Water Distribution Networks. *Water*, 15(6), 1129. doi:10.3390/w15061129.
- [4] Fu, G., Jin, Y., Sun, S., Yuan, Z., and Butler, D., 2022. The Role of Deep Learning in Urban Water Management: A Critical Review. *Water Research*, 223, 118973. doi:10.1016/j.watres.2022.118973.
- [5] Dada, M. A., Majemite, M. T., Obaigbena, A., Daraojimba, O. H., Oliha, J. S., and Nwokediegwu, Z. Q. S., 2024. Review of Smart Water Management: IoT and AI in Water and Wastewater Treatment. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(1), pp. 1373-1382. doi:10.30574/wjarr.2024.21.1.0171.
- [6] Ali, A. S., Abdelmoez, M. N., Heshmat, M., and Ibrahim, K., 2022. A Solution for Water Management and Leakage Detection Problems Using IoT Based Approach. *Internet of Things*, 18, 100504. doi:10.1016/j.iot.2022.100504.
- [7] Okoli, N. J., and Kabaso, B., 2024. Building a Smart Water City: IoT Smart Water Technologies, Applications, and Future Directions. *Water*, 16(4), 557. doi:10.3390/w16040557.
- [8] Jayaraman, P., Nagarajan, K. K., Partheeban, P., and Krishnamurthy, V., 2024. Critical Review on Water Quality Analysis Using IoT and Machine Learning Models. *International Journal of Information Management Data Insights*, 4(1), 100210. doi:10.1016/j.jjime.2023.100210.
- [9] Joseph, K., Sharma, A. K., van Staden, R., Wasantha, P. L. P., Cotton, J., and Small, S., 2023. Application of Software and Hardware-Based Technologies in Leaks and Burst Detection in Water Pipe Networks: A Literature Review. *Water*, 15(11), 2046. doi:10.3390/w15112046.
- [10] Lowe, M., Qin, R., and Mao, X., 2022. A Review on Machine Learning, Artificial Intelligence, and Smart Technology in Water Treatment and Monitoring. *Water*, 14(9), 1384. doi:10.3390/w14091384.
- [11] Taloma, R. J. L., Cuomo, F., Communiello, D., and Pisani, P., 2025. Machine Learning for Smart Water Distribution Systems: Exploring Applications, Challenges and Future Perspectives. *Artificial Intelligence Review*, 58(4), 120. doi:10.1007/s10462-024-11093-7.
- [12] Symos, E., Sidiropoulos, V., Bechtsis, D., Stergiopoulos, F., Aivazidou, E., Vrakas, D., Vezinias, P., and Vlahavas, I., 2023. An Intelligent Modular Water Monitoring IoT System for Real-Time Quantitative and Qualitative Measurements. *Sustainability*, 15(3), 2127. doi:10.3390/su15032127.
- [13] Patgar, D., Satyanaik, U., and Ramakrishna, U. B., 2023. Smart Water Grids and Infrastructure: Emerging Technologies for Real-Time Water Quality Monitoring. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 17(1), pp. 1380-1386. doi:10.30574/wjarr.2023.17.1.0114.

-
- [14] Krishnan, S. R., Nallakaruppan, M. K., Chengoden, R., Koppu, S., Iyapparaja, M., Sadhasivam, J., and Sethuraman, S., 2022. Smart Water Resource Management Using Artificial Intelligence—A Review. *Sustainability*, 14(20), 13384. doi:10.3390/su142013384.
- [15] Webber, J. L., Fletcher, T., Farmani, R., Butler, D., and Melville-Shreeve, P., 2022. Moving to a Future of Smart Stormwater Management: A Review and Framework for Terminology, Research, and Future Perspectives. *Water Research*, 218, 118409. doi:10.1016/j.watres.2022.118409.
- [16] Kenda, K., Mellios, N., Senożetnik, M., and Pergar, P., 2022. Computer Architectures for Incremental Learning in Water Management. *Sustainability*, 14(5), 2886. doi:10.3390/su14052886.