JURNAL ILMIAH SISTEM INFORMASI (JUSI)
VOL 5, No. 1, Januari 2026, pp. 275 - 291
p-ISSN : 2803-1507 (media cetak) | e-ISSN : 2803-1531 (media online)
Link Publikasi: https://ejurnal.provisi.ac.id/index.php/JUISI/issue/view/169

Development of an IoT-Based Smart Water System Roadmap in Singkawang City through a Comparative Study of Surabaya and Balikpapan

Brian Ernesto*[1], Jonathan Ansell Prasetya[2], Kenneth Marchelino Subrata[3], Master Edison Siregar[4]
[1,2,3,4] Program Studi Bisnis Sistem Informasi, Universitas Pradita
Jl. Gading Serpong Boulevard No. 1, 15810, Tangerang, Banten, Indonesia
e-mail: brian.ernesto@student.pradita.ac.id*[1], jonathan.ansell@student.pradita.ac.id[2], kenneth.marchelino@student.pradita.ac.id[3], edison.siregar@pradita.ac.id[4]

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 24-11-2025
Revised: 10-12-2025
Accepted: 05-01-2026
Published: 21-01-2026

ABSTRACT

The City of Singkawang faces significant challenges in drinking water management, characterized by limited production capacity, high non-revenue water (NRW), and the absence of digital infrastructure such as AMR, LoRaWAN, and DMA, necessitating a structured development framework to support the transition toward a smart water system. This study formulates an IoT-based smart water roadmap aligned with the regional development plan (RPJMD) and the operational capacity of the local water utility through a performance gap analysis with benchmark cities (Surabaya and Balikpapan), capacity assessment using six objective parameters, and the use of secondary data from official reports and technical documents. The resulting roadmap comprises three sequential phases covering basic infrastructure reinforcement, network digitalization through IoT sensors and telemetry, and the implementation of DMA and SCADA to enable real-time monitoring and control. This approach provides a realistic and adaptive implementation framework for medium-sized cities with limited resources, strengthening NRW reduction efforts, improving service reliability, and supporting the integration of digital technologies in sustainable water utility management.

Keywords: *Smart City, IoT, Roadmap, Gap Analysis, PDAM.*

Abstrak

Kota Singkawang menghadapi keterbatasan layanan air minum yang ditandai oleh rendahnya kapasitas produksi, tingginya NRW, dan belum tersedianya infrastruktur digital seperti AMR, LoRaWAN, dan DMA, sehingga diperlukan arah pengembangan yang terstruktur untuk mendukung transformasi menuju sistem smart water. Penelitian ini menyusun roadmap pengembangan *smart water* berbasis IoT yang selaras dengan RPJMD dan kemampuan operasional PDAM melalui analisis kesenjangan kinerja antara Singkawang dan kota benchmark Surabaya serta Balikpapan, penilaian kapasitas menggunakan enam parameter objektif, serta pemanfaatan data sekunder dari laporan resmi dan dokumen teknis. Roadmap yang dihasilkan terdiri dari tiga fase bertahap yang mencakup penguatan infrastruktur dasar, digitalisasi jaringan melalui sensor dan telemetri IoT, serta penerapan DMA dan SCADA untuk memungkinkan pemantauan dan pengendalian jaringan secara *real time*. Pendekatan ini memberikan kerangka implementatif yang realistis dan adaptif bagi kota menengah yang menghadapi keterbatasan sumber daya, sehingga dapat memperkuat efektivitas program penurunan

DOI: https://doi.org/10.51903/nk271t40

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

NRW, meningkatkan keandalan layanan, serta mendukung integrasi teknologi dalam pengelolaan air minum secara berkelanjutan.

Kata Kunci: *Kota Cerdas, IoT, Roadmap, Analisis Kesenjangan, PDAM.*

1. PENDAHULUAN

Urbanisasi yang berlangsung cepat di Indonesia telah meningkatkan tekanan terhadap infrastruktur dasar, khususnya penyediaan air bersih. Badan Pusat Statistik melaporkan bahwa lebih dari 56% penduduk Indonesia telah menetap di kawasan perkotaan pada tahun 2024, dan angka ini diproyeksikan terus meningkat hingga 67% pada tahun 2045 [8]. Dalam konteks ini, *smart city* menjadi pendekatan strategis, di mana *smart water management* berbasis *Internet of Things (IoT)* merupakan bagian penting dari dimensi *smart environment*. Teknologi ini memanfaatkan sensor cerdas, jaringan LoRaWAN, dan platform analitik *real-time* untuk memantau kualitas air, mendeteksi kebocoran, serta mengurangi *non-revenue water (NRW)* [1].

Beberapa kota besar di Indonesia telah mengimplementasikan solusi tersebut. Surabaya, sebagai pionir *smart city*, telah memasang 1.000 unit *smart water meter* berbasis *Automatic Meter Reader (AMR)* serta delapan *LoRaWAN Gateway* yang memungkinkan pembacaan konsumsi air otomatis per jam [2]. Sistem ini terintegrasi dengan aplikasi *Customer Information System (CIS)* yang menyediakan transparansi data bagi pelanggan. Sementara itu, Balikpapan menunjukkan efektivitas pengendalian NRW melalui pembentukan Tim Pengendali NRW, penerapan *District Metered Area (DMA)*, dan kolaborasi dengan *Korea Water Partnership*, yang menurunkan NRW dari 35% menjadi 25,85% pada tahun 2024 [3].

Berbeda dengan kedua kota tersebut, Singkawang di Provinsi Kalimantan Barat masih menghadapi tantangan signifikan dalam penyediaan air bersih. Cakupan layanan PERUMDA Gunung Poteng hanya mencapai 31,4% dari total populasi, jauh di bawah target nasional 71% [4]. Situasi ini memburuk pada musim kemarau 2025 ketika debit *intake* bendungan Eria turun dari 80-100 L/s menjadi 0 L/s [5], menyebabkan lebih dari 9.400 sambungan rumah harus menjalani sistem giliran pasokan [6]. Krisis berlangsung beberapa pekan dan memaksa PERUMDA mengerahkan armada tangki air ke wilayah yang paling terdampak [7]. Hingga kini, Singkawang belum menerapkan teknologi *smart water* berbasis IoT; pencatatan aliran dan tekanan air masih dilakukan secara manual, sehingga kemampuan deteksi dini kebocoran maupun prediksi gangguan pasokan sangat terbatas.

Kesenjangan antara praktik terbaik di Surabaya dan Balikpapan dengan kondisi *existing* di Singkawang menegaskan perlunya roadmap adaptasi teknologi IoT yang sesuai dengan kapasitas lokal. Penelitian ini bertujuan menyusun roadmap pengembangan sistem *smart water* berbasis IoT untuk Kota Singkawang melalui studi komparatif terhadap implementasi teknologi di Surabaya dan Balikpapan. Kontribusi utama penelitian ini adalah menghasilkan rencana aksi tiga fase (1-10 tahun) yang mencakup prioritas teknologi, estimasi biaya, serta skema pendanaan potensial, sehingga dapat menjadi acuan strategis bagi PERUMDA Gunung Poteng dan Pemkot Singkawang dalam transformasi digital sektor air yang berkelanjutan.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) semakin mendorong transformasi digital pada sektor air minum, terutama melalui pemantauan konsumsi secara real-time, deteksi kebocoran otomatis, dan analisis performa jaringan berbasis data. Sistem *smart water* berbasis IoT telah terbukti meningkatkan keandalan informasi operasional dan efisiensi teknis pada berbagai kota di dunia, termasuk dalam pengelolaan tekanan dan penurunan NRW secara progresif [19], [20]. Integrasi teknologi ini juga membuka peluang bagi pemerintah daerah untuk mengembangkan *decision support system* (DSS) yang mampu memberikan rekomendasi operasional berbasis bukti dalam tata kelola air perkotaan [20].

Roadmap yang dihasilkan terdiri dari tiga fase, yaitu *Foundation*, *Development*, dan *Optimization* yang mencakup arah strategis jangka panjang, matriks operasional, linimasa implementasi, indikator kinerja utama, serta estimasi kebutuhan biaya. Penyusunan roadmap dilakukan dengan menyesuaikan praktik terbaik dari kota *benchmark* dan hasil analisis kesenjangan lokal, sehingga setiap fase memiliki dasar empiris yang kuat. Dengan struktur yang menyerupai format perencanaan daerah, hasil penelitian dapat langsung diintegrasikan ke dalam dokumen RPJMD 2025-2035 maupun Renstra PERUMDA Gunung Poteng tanpa memerlukan penyesuaian besar.

Pada konteks Indonesia, kebutuhan digitalisasi semakin mendesak seiring meningkatnya kompleksitas jaringan distribusi, pertumbuhan penduduk, dan keterbatasan kapasitas sumber air baku. Studi terbaru menunjukkan bahwa pemanfaatan perangkat IoT, *digital monitoring*, dan zona DMA memiliki potensi besar

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

untuk menekan NRW pada kota menengah yang menghadapi keterbatasan fiskal maupun infrastruktur dasar [25]. Teknologi ini juga memberikan dukungan signifikan dalam meningkatkan transparansi data bagi PDAM yang sedang melakukan transformasi menuju layanan air minum yang lebih adaptif dan terukur.

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. komponen teknologi *Internet of Things* (IoT) mana saja yang paling tepat untuk diadopsi terlebih dahulu oleh PERUMDA Gunung Poteng mengingat keterbatasan anggaran dan infrastruktur pendukung di Kota Singkawang.
2. bagaimana skema pendanaan serta model kemitraan yang dapat menjamin keberlanjutan implementasi sistem *smart water* berbasis IoT;
3. bagaimana bentuk roadmap tiga fase (1-10 tahun) yang realistis agar sesuai dengan kapasitas kelembagaan serta kondisi krisis air baku yang terjadi secara musiman.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Perkembangan konsep *smart city* mendorong percepatan transformasi digital di seluruh sektor layanan dasar, termasuk penyediaan air minum yang menjadi fondasi kualitas hidup masyarakat urban. Badan Pusat Statistik mencatat bahwa lebih dari 56 persen penduduk Indonesia menetap di kawasan perkotaan pada tahun 2024 dan diproyeksikan meningkat hingga 67 persen pada tahun 2045 [8]. Pertumbuhan urban ini menciptakan tekanan yang semakin besar terhadap sistem penyediaan air, terutama dalam konteks kebutuhan layanan yang lebih reliabel, efisien, dan adaptif terhadap perubahan permintaan. Dalam kerangka *smart environment*, penerapan *smart water management* berbasis IoT (*Internet of Things*) menjadi salah satu pilar penting karena mampu menyediakan pemantauan kualitas air secara berkelanjutan, deteksi kebocoran jaringan secara otomatis, serta pengurangan NRW (*non-revenue water*) melalui pengolahan data *real-time* [1]. Integrasi fungsi-fungsi tersebut memungkinkan operator utilitas untuk beralih dari pola kerja reaktif menuju pendekatan berbasis prediksi dan analitik, sehingga meningkatkan ketahanan sistem sekaligus efisiensi operasional. Dengan demikian, perkembangan teknologi dan dinamika urbanisasi tidak hanya menciptakan tuntutan baru, tetapi juga membuka peluang untuk merancang model pengelolaan air minum yang lebih cerdas, terukur, dan berorientasi jangka panjang.

Perkembangan arsitektur *smart water* secara global menunjukkan bahwa pemanfaatan sensor tekanan, *smart meter*, dan algoritma deteksi anomali mampu meningkatkan efektivitas pemantauan jaringan dan mengurangi potensi kebocoran melalui analitik konsumsi berbasis data real-time [19]. Transformasi digital ini juga didukung oleh integrasi IoT dengan *decision support system* (DSS), yang memungkinkan operator utilitas mengolah data historis dan data lapangan untuk menghasilkan rekomendasi operasional yang lebih akurat, terutama pada konteks kota yang mengalami fluktuasi permintaan dan tantangan ketidakteraturan jaringan distribusi [20]. Dengan demikian, pemanfaatan IoT tidak hanya meningkatkan efisiensi teknis, tetapi juga memperkuat kemampuan pengambilan keputusan dalam pengelolaan air minum modern.

Secara teknis, arsitektur IoT tersusun atas lapisan perangkat (sensor aliran, tekanan, pH, *turbidity*, *smart meter*), lapisan transmisi (LoRaWAN, NB-IoT, 4G), dan lapisan aplikasi (*cloud dashboard analytics*) [9]. Pemilihan protokol komunikasi menjadi krusial dalam arsitektur ini. Studi *bandwidth* daya membuktikan bahwa LoRaWAN sub-GHz menawarkan jangkauan lebih dari 5 km per *gateway* dengan daya rendah sehingga cocok untuk kota menengah [10]. Perbandingan karakteristik teknis berbagai protokol disajikan dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Perbandingan Protokol IoT untuk Smart Water

No	Protokol	Jangkauan (km)	Daya (mW)	Biaya CAPEX	Bandwidth	Kelebihan Utama	Catatan untuk Smart Water
1	LoRaWAN	5-15	<100	Rendah	Rendah	Jangkauan luas, daya rendah	Ideal untuk kota menengah
2	NB-IoT	1-3	200-500	Sedang	Sedang	QoS tinggi, aman	Cocok untuk zona padat
3	4G/LTE	<1	>1.000	Tinggi	Tinggi	Bandwidth besar	Cocok untuk video/streaming

Berdasarkan perbandingan pada Tabel 1, LoRaWAN memiliki keunggulan kompetitif dibandingkan protokol seluler (seperti 4G) yang memakan daya besar, menjadikannya opsi yang lebih efisien untuk infrastruktur *metering* skala luas.

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

Dalam konteks implementasi nasional, penelitian empiris menunjukkan bahwa PDAM Surya Sembada Surabaya telah menginstal 1.000 unit *smart water meter* berbasis *AMR* dan delapan LoRaWAN *Gateway* yang mengirim data konsumsi per jam ke aplikasi *Customer Information System* (CIS) [11]. Sementara itu, Perumda Tirta Manuntung Balikpapan berhasil menurunkan NRW dari 35 persen menjadi 25,85 persen dalam empat tahun melalui pendekatan DMA, pembentukan tim NRW khusus, serta kolaborasi dengan Korea *Water Partnership* [12]. Ikhtisar strategi dan capaian teknologi dari kota-kota referensi tersebut dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Ikhtisar Implementasi Smart Water di Kota Referensi

Kota	Status Smart City	Teknologi Utama	Capaian Utama	Estimasi Investasi	Catatan Khusus
Surabaya	Pionir (since 2018)	1.000 AMR + 8 LoRaWAN *Gateway* + CIS App	Real-time monitoring per jam	Rp4,5 M per set	Fokus pada transparansi pelanggan
Balikpapan	Berkala (since 2020)	DMA + Korea *Water Partnership*	NRW 35% → 25,85%	Rp1,2 M per zona	Kolaborasi internasional
Bandung	Berkembang (since 2021)	*Prepaid Smart Meter*	Pengurangan kecurian air	Rp3 M per set	Skema prabayar
Jakarta	Berkembang (since 2019)	Cloud SCADA	Monitoring real-time	Rp10 M per node	Skala metropolitan

Data pada Tabel 2 menegaskan bahwa kedua kota tersebut menjadi *benchmark* ideal karena ketersediaan data kinerja publik dan adopsi teknologi yang terukur. Surabaya unggul dalam transparansi data pelanggan, sedangkan Balikpapan unggul dalam efisiensi jaringan fisik (NRW).

Studi literatur terkini menekankan bahwa keberhasilan transformasi digital air minum tidak hanya bergantung pada kecanggihan sensor, tetapi juga pada kesiapan infrastruktur hidrolik [13]. Konsep integrasi ini, yang sering disebut sebagai *Smart DMA*, menunjukkan bahwa penggunaan IoT pada jaringan yang belum terzonasi dengan baik (seperti di Balikpapan sebelum optimalisasi) tidak akan efektif dalam menurunkan kebocoran fisik secara signifikan. Sebaliknya, manajemen DMA tanpa pemantauan *real-time* (seperti yang ditawarkan LoRaWAN) akan memakan biaya operasional tinggi untuk pelacakan manual [14]. Oleh karena itu, sintesis antara arsitektur IoT yang efisien daya pada Tabel 1 dan strategi manajemen tekanan berbasis DMA pada Tabel 2 menjadi prasyarat mutlak untuk membangun sistem *smart water* yang berkelanjutan di kota dengan sumber daya terbatas.

Integrasi SCADA dengan perangkat IoT semakin memperkuat efektivitas pemantauan jaringan air minum, terutama dalam konteks deteksi kebocoran cepat dan pengelolaan tekanan. Konvergensi SCADA-IoT memungkinkan data dari sensor lapangan dikirim secara kontinu ke pusat kontrol, sehingga operator dapat melakukan penyesuaian operasional secara cepat dan berbasis bukti, sekaligus meningkatkan akurasi dalam pembentukan dan pemantauan DMA [21].

Selain itu, pembentukan zona DMA umumnya memerlukan simulasi hidrolik untuk menentukan batas zona, titik kontrol tekanan, dan estimasi kehilangan air. Penggunaan perangkat lunak EPANET terbukti efektif dalam memodelkan perilaku hidrolik jaringan dan memberikan panduan teknis dalam merancang pembagian DMA yang optimal, sehingga membantu menurunkan NRW secara lebih sistematis dan terukur [22].

Untuk mereplikasi keberhasilan tersebut, kerangka roadmap tiga fase (*Foundation* tahun 1-2, *Development* tahun 3-5, dan *Optimization* tahun 6-10) dijadikan acuan transformasi teknologi infrastruktur secara global [15]. Kriteria prioritas dalam penyusunan roadmap ini meliputi *readiness* (ketersediaan data dan SDM), *cost benefit* (NPV positif dalam lima tahun), serta *risk* (kegagalan teknis atau keuangan) [16]. Guna mengukur kesenjangan kondisi eksisting, metode *benchmarking* dengan parameter infrastruktur, teknologi, kelembagaan, dan finansial digunakan untuk menyesuaikan praktik terbaik secara lokal [17]. Parameter tersebut dijabarkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Benchmarking

No	Parameter	Indikator Spesifik	Skala Penelitian	Sumber Data
1	Infrastruktur	Panjang pipa, jumlah SR, kapasitas produksi	Kuantitatif (km, unit, L/s)	Laporan PDAM
2	Teknologi	Jumlah AMR, *gateway*, DMA, IoT *meter*	Kuantitatif (unit, %)	Laporan PDAM
3	Kinerja	Coverage %, NRW %, kontinuitas	Kuantitatif (%)	Laporan PDAM
4	Kelembagaan	Jumlah teknisi, sertifikasi IoT	Kuantitatif (orang, %)	Laporan PDAM
5	Finansial	Estimasi investasi, skema pendanaan	Kuantitatif (Rp, %)	E-Catalog, media

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

Urgensi penerapan roadmap ini terlihat nyata pada studi kasus Kota Singkawang. Kota ini mewakili kasus ekstrem dengan cakupan layanan 31,4 persen dan debit *intake* bendungan Eria yang mendekati nol liter per detik pada musim kemarau 2025, sehingga lebih dari 9.400 sambungan rumah mengalami giliran pasokan [18]. Ketimpangan performa operasional antara Singkawang dan kota *benchmark* terlihat jelas pada data kuantitatif berikut.

Pengelolaan sistem penyediaan air minum di berbagai kota menunjukkan tingkat kinerja dan tantangan yang berbeda-beda, bergantung pada cakupan layanan, kondisi infrastruktur, serta efisiensi operasional. Indikator kuantitatif seperti tingkat *coverage*, persentase *Non-Revenue Water* (*NRW*), panjang jaringan pipa, dan kapasitas produksi air menjadi parameter penting untuk menilai keberlanjutan layanan PDAM. Selain itu, pemanfaatan teknologi pendukung seperti *Internet of Things* (*IoT*) mulai menjadi perhatian dalam meningkatkan proses *monitoring* dan pengendalian sistem distribusi air. Perbandingan data antar kota juga diperlukan untuk memberikan gambaran posisi kinerja PERUMDA dalam konteks nasional, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Kuantitatif PDAM Tahun 2025

Kota	Tahun	Coverage (%)	NRW (%)	SR Unit	Pipa (km)	Kapasitas (L/s)	Debit Intake (L/s)	IoT Unit
Surabaya	2025	92,0	28,0	629.963	6.589	1.500	1.500	1.000
Balikpapan	2025	80,0	25,85	215.000	1.200	1.500	1.500	10 DMA
Singkawang	2025	31,4	42,0	78.000	450	330	0-80	0

Kondisi empiris pada Tabel 4 menegaskan perlunya roadmap berbasis IoT yang realistis dan aplikatif agar sesuai dengan kapasitas PERUMDA Gunung Poteng serta visi *smart city* Singkawang. Namun, belum ditemukan kajian yang menggabungkan *IoT architecture* dan *DMA strategy* dalam satu roadmap bertahap untuk kota menengah yang mengalami krisis air baku musiman. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengisi celah tersebut.

Konsep teknologi roadmapping merupakan metode perencanaan strategis yang dirancang untuk memetakan keterkaitan antara kebutuhan jangka panjang, kapabilitas teknologi, serta tahapan implementasi yang realistis dalam suatu horizon waktu tertentu. Pendekatan ini menyediakan kerangka terstruktur yang membantu organisasi mengidentifikasi prioritas, menentukan arah pengembangan, dan memastikan setiap keputusan teknologi berada dalam jalur yang selaras dengan kapasitas internal maupun dinamika eksternal [15]. Dalam konteks infrastruktur publik, roadmapping berfungsi sebagai instrumen koordinasi yang penting, terutama karena sektor seperti penyediaan air minum membutuhkan sinkronisasi lintas kelembagaan dan keberlanjutan investasi. Dengan demikian, roadmap tidak hanya menggambarkan urutan tahapan teknis, tetapi juga meminimalkan risiko kegagalan implementasi melalui penilaian kesiapan organisasi, keselarasan kebijakan, serta keberlanjutan program.

Penerapan roadmapping pada domain *smart city* semakin relevan karena integrasi sensor, jaringan telekomunikasi, dan sistem analitik tidak dapat dilakukan secara serentak tanpa kesiapan teknis, finansial, dan kelembagaan [24]. Literatur menegaskan bahwa digitalisasi kota membutuhkan strategi bertahap agar setiap lapisan teknologi dapat berfungsi optimal sebelum beralih ke tahap berikutnya. Hal yang sama berlaku pada pengembangan *smart water*, di mana penerapan IoT, penerapan DMA (*District Metered Area*), dan integrasi SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) harus didasarkan pada tahap kesiapan infrastruktur dasar, ketersediaan data, serta kemampuan operasional daerah. Oleh sebab itu, kerangka roadmapping memberikan struktur pengembangan yang terukur, memastikan bahwa transformasi menuju sistem air pintar berlangsung progresif dan konsisten dengan kapasitas lokal.

Selain kesiapan teknis dan finansial, literatur menyoroti bahwa keberhasilan transformasi digital dalam sektor air minum sangat dipengaruhi oleh tata kelola data yang baik. Kerangka *data governance* yang mencakup interoperabilitas, standar data, keamanan informasi, dan kualitas data menjadi faktor penting untuk memastikan bahwa informasi yang dihasilkan oleh sensor dan sistem digital dapat dimanfaatkan secara efektif oleh pemerintah daerah serta operator utilitas [23]. Tanpa tata kelola data yang memadai, implementasi IoT dan roadmap digital berisiko tidak optimal karena keterbatasan integrasi lintas sistem.

Dalam konteks kota menengah di Indonesia, tantangan implementasi *smart water* memiliki karakteristik berbeda dibandingkan kota metropolitan. Kota dengan populasi 100-300 ribu jiwa umumnya menghadapi fluktuasi pola konsumsi air, tingkat NRW yang cenderung tinggi, serta keterbatasan jaringan telemetri,

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

sehingga pemanfaatan IoT menjadi solusi strategis untuk meningkatkan efisiensi jaringan. Studi implementasi di beberapa PDAM regional menunjukkan bahwa teknologi seperti AMR, LoRaWAN, dan zonasi DMA mampu menurunkan kehilangan air hingga 15-25%, terutama ketika diterapkan pada jaringan yang sebelumnya belum memiliki sistem pemantauan real time. Temuan ini mengindikasikan bahwa pemilihan teknologi yang modular dan dapat diimplementasikan secara bertahap menjadi krusial bagi kota menengah.

Berdasarkan karakteristik tersebut, penyusunan roadmap *smart water* untuk Singkawang perlu mempertimbangkan skala kota, kondisi infrastruktur eksisting, serta kesiapan organisasi dalam mengadopsi teknologi baru. Dengan mengacu pada praktik terbaik di kota *benchmark* serta literatur mengenai implementasi IoT pada sistem air berbasis jaringan terdistribusi, roadmap Singkawang harus dirancang untuk memperkuat pondasi teknis terlebih dahulu sebelum beralih pada tahap digitalisasi lanjutan. Hal ini memastikan bahwa setiap intervensi, mulai dari peningkatan kapasitas air baku hingga integrasi sistem SCADA, dilakukan secara terstruktur dan menghasilkan dampak maksimal terhadap penurunan NRW dan peningkatan keandalan layanan secara berkelanjutan.

Meskipun berbagai studi terdahulu telah membahas arsitektur IoT, efektivitas LoRaWAN, serta strategi penurunan NRW berbasis DMA di kota-kota besar, belum ada penelitian yang secara khusus mengintegrasikan kedua pendekatan tersebut ke dalam sebuah roadmap bertahap yang disesuaikan dengan karakteristik kota menengah yang menghadapi krisis air baku musiman seperti Singkawang. Literatur yang ada masih terfragmentasi: sebagian berfokus pada aspek teknologi sensor dan protokol komunikasi, sementara lainnya meninjau zonasi DMA atau kinerja PDAM secara terpisah, sehingga belum memberikan panduan implementatif yang menghubungkan kesiapan infrastruktur, kapasitas kelembagaan, serta kebutuhan investasi secara simultan. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi celah tersebut dengan merumuskan roadmap tiga fase yang menggabungkan arsitektur IoT yang efisien daya dengan strategi DMA berbasis data, sehingga menghasilkan model pengembangan yang lebih aplikatif, terukur, dan selaras dengan konteks kota menengah.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. *Jenis dan Pendekatan Penelitian*

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif yang dipadukan dengan studi komparatif dan analisis kesenjangan (*gap analysis*) untuk menghasilkan roadmap pengembangan sistem *smart water* berbasis *Internet of Things* (IoT) bagi Kota Singkawang. Pendekatan kualitatif deskriptif dipilih karena fokus utama penelitian bukan untuk membuktikan hubungan kausal antarvariabel, melainkan untuk menggambarkan kondisi aktual, membandingkan kapabilitas lintas kota, dan merumuskan strategi implementatif berdasarkan temuan empiris. Penggunaan metode studi komparatif memungkinkan peneliti menilai perbedaan kinerja penyedia layanan air minum antara Singkawang, Surabaya, dan Balikpapan secara sistematis, sehingga praktik terbaik (*best practices*) dari kota *benchmark* dapat diidentifikasi secara objektif.

gap analysis digunakan untuk memetakan selisih antara kondisi eksisting dan kondisi ideal yang dibutuhkan untuk membangun sistem *smart water* yang berfungsi penuh, termasuk aspek infrastruktur digital, kapasitas teknis, kesiapan operasional, dan indikator kinerja layanan. Melalui kombinasi kedua metode tersebut, penelitian dapat menyusun rekomendasi yang lebih terarah dan berbasis bukti. Proses penelitian mengikuti tahapan *benchmarking* yang meliputi pengumpulan dan dokumentasi data sekunder, analisis perbandingan indikator, evaluasi kapabilitas IoT, identifikasi faktor penentu keberhasilan, serta penyusunan temuan yang telah disesuaikan dengan konteks geografis dan operasional Kota Singkawang. Rangkaian proses tersebut kemudian dirumuskan menjadi roadmap tiga fase sebagaimana digambarkan pada Gambar 3, yang memuat penguatan air baku, digitalisasi jaringan air minum, serta pengembangan sistem monitoring dan kendali berbasis IoT secara bertahap.

3.2. *Metode Pengumpulan Data*

Tahap pengumpulan data dilakukan sepenuhnya melalui sumber sekunder yang relevan dengan tujuan penelitian. Data utama yang dihimpun mencakup indikator kinerja Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) di Surabaya, Balikpapan, dan Singkawang untuk periode 2020-2025. Parameter yang dikumpulkan meliputi cakupan layanan pelanggan, persentase *non-revenue* water (NRW), jumlah sambungan rumah (SR), panjang jaringan pipa utama dan distribusi, kapasitas produksi terpasang, debit air baku yang tersedia, serta status

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

implementasi teknologi digital seperti *smart meter*, *Automatic Meter Reading* (AMR), LoRaWAN *gateway*, dan *District Metered Area* (DMA).

Sumber data diperoleh melalui laporan tahunan resmi PDAM, dokumen kinerja perusahaan daerah yang dipublikasikan secara terbuka, serta laporan audit pelayanan air minum dari pemerintah kota dan provinsi. Selain itu, data pendukung berupa curah hujan, jumlah hari kering, dan pola musim dikumpulkan dari publikasi Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) untuk memberikan konteks terhadap kondisi air baku di masing-masing kota. Informasi kebijakan, kondisi infrastruktur eksisting, dan tantangan operasional dilengkapi melalui berita resmi pemerintah daerah, siaran pers, dan publikasi institusi yang berwenang.

Seluruh data diperoleh secara daring melalui portal resmi lembaga terkait tanpa melakukan observasi lapangan, wawancara, ataupun pengumpulan data primer. Dengan demikian, proses pengumpulan data tidak memerlukan perizinan etik penelitian. Data yang terkumpul kemudian diverifikasi konsistensinya, diseleksi berdasarkan relevansi, dan diklasifikasikan ke dalam kategori teknis, operasional, dan kebijakan untuk mendukung proses analisis kesenjangan dan penyusunan roadmap pada tahap berikutnya.

3.3. *Penyusunan Matriks Perbandingan*

Parameter perbandingan disusun dalam bentuk matriks seperti tercantum pada Tabel 5. Kota Surabaya menjadi referensi teknologi karena telah menginstal 1.000 unit *smart water meter* AMR dan delapan LoRaWAN *Gateway*, sedangkan Balikpapan dipilih sebagai referensi pengendalian NRW melalui *District Metered Area* DMA dan kolaborasi Korea *Water Partnership* yang menurunkan NRW dari 35 persen menjadi 25,85 persen. Kota Singkawang dijadikan kasus target karena coverage layanan hanya 31,4 persen dan debit intake bendungan Eria nyaris nol liter per detik pada musim kemarau 2025. Perbedaan nilai parameter antar kota menunjukkan kesenjangan yang menjadi dasar penentuan prioritas teknologi.

Tabel 5. Matriks Perbandingan Kinerja PDAM Tahun 2025

Kota	Coverage (%)	NRW (%)	SR Unit	Pipa (km)	Kapasitas (L/s)	Debit Intake (L/s)	IoT Unit
Surabaya	92,0	28,0	629.963	6.589	1.500	1.500	1.000 AMR
Balikpapan	80,0	25,85	215.000	1.200	1.500	1.500	20 DMA
Singkawang	31.4	42,0	78.000	450	330	0-80	0

3.4. *Analisis Kesenjangan*

Analisis kesenjangan dilakukan dengan cara memberi skor 1 sampai 5 pada setiap parameter, di mana 1 menunjukkan kondisi sangat kurang dan 5 menunjukkan kondisi sangat baik. Skor dihitung berdasarkan interval nilai data sekunder dan pembelajaran dari praktik terbaik. Hasilnya disajikan pada Tabel 6. Kota Surabaya memperoleh skor tertinggi pada aspek teknologi IoT, sedangkan Balikpapan unggul pada pengendalian NRW. Singkawang berada pada level paling rendah sehingga menjadi prioritas utama untuk intervensi bertahap. Untuk memastikan proses pembobotan berjalan objektif dan dapat direplikasi, setiap parameter diberi skor berdasarkan rubrik penilaian pada Tabel 6. Rentang skor ditetapkan berdasarkan *benchmark* kota Surabaya dan Balikpapan, standar pelayanan air minum nasional, serta literatur *smart water* maturity model.

Tabel 6. Rubrik Penilaian Skor 1-5

Parameter	Skor 1 (Sangat Rendah)	Skor 2 (Rendah)	Skor 3 (Sedang)	Skor 4 (Baik)	Skor 5 (Sangat Baik)
IoT Readiness (unit)	0	1-20 unit	21-100 unit	101-500 unit	> 500 unit
NRW Control (%)	>45%	36-45%	26-35%	21-25%	≤ 20%
SDM (Kompetensi IoT)	Tdiak ada SDM kompeten	1-2 orang	Tim kecil (3-5)	Tim stabil khusus	Tim kuat + sertifikasi
Kapasitas Produksi (L/s)	<150 L/s	150-299	300-599	600-999	≥ 1.000
Risiko Iklim (hari kering/tahun	>120 hari	90-120	60-89	30-59	<30
Kesiapan Keuangan (Budget)	Tidak ada ruang investasi	Sangat terbatas	Cukup untuk pilot	Mampu 1-2 zona	Mampu implementasi penuh

Kapasitas institusional dan tingkat risiko operasional PDAM dapat dianalisis melalui pendekatan penilaian skor yang mencerminkan kesiapan teknologi, efektivitas pengendalian kehilangan air, kapasitas sumber daya manusia, serta tekanan risiko iklim dan ketersediaan anggaran. Penilaian ini disusun berdasarkan rata-rata

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

kondisi selama periode 2020–2025 untuk memberikan gambaran yang lebih stabil dan representatif. Variabel seperti *IoT readiness*, kemampuan *NRW control*, serta estimasi anggaran (*budget estimation*) menjadi faktor kunci dalam menentukan kesiapan implementasi transformasi digital di sektor air minum. Hasil penilaian komparatif antar kota tersebut disajikan secara ringkas dan terstruktur pada Tabel 7.

Tabel 7. Skor Kapasitas & Risiko (Rata-Rata 2020-2025)

Kota	IoT Readiness	NRW Control	SDM Kapasitas	Iklim Risk	Budget Est.
Surabaya	5	3	4	3	4
Balikpapan	4	5	4	3	4
Singkawang	1	2	3	2	2

3.5. *Penilaian Adaptasi Lokal*

Estimasi biaya, kapasitas kelembagaan, dan karakteristik iklim kemudian dimasukkan sebagai pertimbangan adaptasi lokal. Estimasi investasi perangkat IoT mengacu pada *e-catalog* Kementerian PUPR 2024: *smart water* meter AMR + LoRaWAN *Gateway* dipatok Rp4,5 juta per set, sedangkan DMA memerlukan biaya sekitar Rp1,2 miliar per zona berdasarkan pengalaman Balikpapan. Kapasitas SDM dinilai dari jumlah teknisi elektronika dan kepemilikan sertifikasi IoT; Singkawang tercatat memiliki 12 teknisi sehingga diberi skor 3 dari 5. Data iklim diperoleh dari BMKG Stasiun Singkawang yang menunjukkan hari kering selama 90 hari per tahun; skor risiko iklim ditetapkan 2 dari 5. Gabungan skor menghasilkan prioritas intervensi: fase *Foundation* menekankan peningkatan intake dan sertifikasi SDM, fase *Development* memasang 500 unit AMR, dan fase *Optimization* menyebarluaskan DMA di seluruh wilayah.

3.6. *Penyusunan Roadmap Sistem Smart Water*

Formulasi roadmap akhir dilakukan dengan menyusun matriks kegiatan, target capaian, indikator kinerja utama KPI, serta estimasi waktu dan biaya untuk setiap fase. *Output* berupa *Gantt Chart* dan rencana anggaran yang dapat langsung diadopsi oleh PERUMDA Gunung Poteng dan Pemkot Singkawang. Diagram alur lengkap disajikan pada Gambar 3. Dengan metode yang transparan dan berbasis bukti, penelitian ini diharapkan menjadi referensi kota menengah lainnya yang menghadapi tantangan serupa.

3.7. *Struktur Roadmap dan Integrasi dengan Dokumen Perencanaan*

Struktur matriks roadmap yang dihasilkan dalam penelitian ini mengadopsi format perencanaan jangka menengah dan panjang yang umum dipakai oleh pemerintah daerah, khususnya tata susun program, sub program, sasaran, anggaran estimasi, serta indikator kinerja utama yang tercantum dalam dokumen perencanaan *smart governance* beberapa daerah periode 2019-2028. Pendekatan ini dipilih agar *output* penelitian dapat langsung dimasukkan ke dalam dokumen perencanaan resmi seperti RPJMD atau Renstra PDAM tanpa perubahan besar pada kerangka tabel. Namun, isi setiap kolom termasuk nama program, target capaian, dan nilai anggaran disesuaikan sepenuhnya dengan konteks *smart water* berbasis IoT, prioritas NRW, serta kondisi lokal Kota Singkawang. Dengan demikian, roadmap yang dihasilkan bukanlah duplikasi dokumen governance, melainkan inisiasi baru yang mengikuti pola tata letak yang sudah dikenal oleh aparat perencanaan daerah.

Format penyusunan roadmap pada penelitian ini merujuk pada struktur perencanaan pembangunan daerah yang digunakan dalam RPJMD. Adaptasi format tersebut dilakukan agar roadmap yang dihasilkan memiliki bentuk yang operasional dan mudah diadopsi oleh Pemerintah Kota Singkawang. Matriks roadmap bersifat simulatif yang telah disusun berdasarkan analisis kebutuhan, *benchmarking* kota pembanding, dan data sekunder yang tersedia.

Penyusunan roadmap dilakukan melalui empat tahapan utama: (1) identifikasi kondisi eksisting PDAM melalui analisis kesenjangan kinerja, sumber daya, dan infrastruktur; (2) perumusan kapabilitas yang dibutuhkan pada horizon waktu 2025-2035; (3) pemetaan keterkaitan antara tujuan strategis, teknologi IoT, dan kebutuhan operasional PDAM; serta (4) penyusunan linimasa implementasi berbasis tiga fase roadmapping. Struktur tahapan ini memastikan bahwa roadmap bersifat implementatif, kontekstual, dan selaras dengan kemampuan fiskal serta kapasitas institusi lokal.

3.8. *Keterbatasan Metode Sekunder*

Meskipun metode penelitian ini dirancang untuk transparan dan replikatif, terdapat beberapa keterbatasan inheren dari penggunaan data sekunder. Seluruh informasi mengenai kinerja PDAM, kapasitas produksi, tingkat NRW, hingga penerapan teknologi IoT diperoleh dari laporan tahunan, publikasi pemerintah daerah,

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

dan dokumen instansi tanpa dilakukan verifikasi lapangan. Ketergantungan pada sumber sekunder dapat menimbulkan potensi bias, baik berupa ketidaktepatan data, variasi standar pencatatan, hingga kemungkinan adanya indikator yang tidak dilaporkan secara rinci. Selain itu, tidak semua kota menyediakan data dengan tingkat kelengkapan yang sama sehingga proses *benchmarking* dan *gap analysis* mengandalkan data yang tersedia, bukan data primer yang terukur secara langsung.

Ketiadaan observasi lapangan juga membatasi kemampuan penelitian untuk menangkap kondisi aktual jaringan pipa, performa teknologi yang telah diimplementasikan, maupun faktor operasional yang tidak terdokumentasi. Dengan demikian, hasil analisis serta roadmap yang disusun perlu diinterpretasikan dengan kehati-hatian, khususnya ketika digunakan untuk menyusun kebijakan operasional atau diterapkan pada kota lain. Roadmap ini bersifat simulatif dan berbasis dokumen; validasi lapangan atau studi teknis lanjutan tetap diperlukan sebelum implementasi penuh dilakukan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. *Hasil Analisis Komparatif Kinerja PDAM Tahun 2025*

Hasil analisis komparatif terhadap PDAM Surabaya, Balikpapan, dan Singkawang menunjukkan adanya kesenjangan yang sangat signifikan pada aspek teknologi, kapasitas produksi, dan efektivitas pengendalian *non-revenue water* (NRW). Berdasarkan Tabel 5 pada Bab 3, Surabaya menjadi kota dengan kinerja terbaik melalui pemanfaatan teknologi digital yang sudah matang, ditandai dengan implementasi 1.000 unit AMR dan delapan LoRaWAN *Gateway* yang berfungsi secara real-time untuk memonitor konsumsi air, mendeteksi anomali tekanan, dan mengidentifikasi potensi kebocoran. Balikpapan menempati posisi kuat pada efisiensi jaringan distribusi, tercermin dari penurunan NRW yang konsisten dari 35% menjadi 25,85% setelah penerapan DMA dan kolaborasi teknis bersama Korea *Water Partnership*. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa investasi teknologi yang terarah mampu menghasilkan dampak operasional yang jelas, bahkan pada kota dengan karakteristik geografis yang menantang.

Sebaliknya, Singkawang masih berada pada level terendah dalam hampir seluruh indikator kunci layanan air minum. Cakupan layanan hanya mencapai 31,4%, NRW berada pada angka 42%, serta debit intake mengalami penurunan drastis hingga mendekati 0 L/s selama musim kemarau 2025. Selain itu, Singkawang belum memiliki perangkat Internet of Things maupun sistem zonasi DMA yang dapat membantu pengendalian tekanan dan kebocoran. Ketertinggalan ini tidak hanya menggambarkan keterbatasan infrastruktur dan teknologi, tetapi juga menunjukkan kerentanan tinggi terhadap risiko iklim dan gangguan operasional. Dengan adanya perbedaan performa yang sangat mencolok tersebut, kebutuhan untuk menyusun roadmap pengembangan *smart water* berbasis IoT menjadi semakin mendesak agar arah transformasi PDAM dapat berjalan secara bertahap, realistis, dan selaras dengan kapasitas lokal yang tersedia.

4.2. *Skor Kapasitas & Risiko*

Penilaian kapasitas dilakukan menggunakan rubrik objektif pada Tabel 6, yang mencakup enam parameter utama yaitu IoT readiness, pengendalian NRW, kapasitas SDM, kapasitas produksi, risiko iklim, dan kesiapan pendanaan. Hasil penilaian yang tersaji pada Tabel 7 menunjukkan bahwa Singkawang hanya memperoleh skor total 12 dari 25, berada jauh dibawah Surabaya dan Balikpapan. Skor rendah ini mengindikasikan adanya kesenjangan mendasar dalam kesiapan teknologi dan ketersediaan air baku yang menjadi fondasi bagi transformasi digital sistem air minum. Selain itu, nilai tersebut juga merefleksikan ketidakseimbangan antara kebutuhan pengembangan jaringan dan kapasitas operasional yang dimiliki PDAM, termasuk kemampuan adaptasi terhadap risiko iklim serta stabilitas pendanaan jangka panjang.

Nilai skor ini memberikan dasar kuat bagi penyusunan roadmap tiga fase karena menggambarkan posisi awal Singkawang secara objektif dalam spektrum kemampuan teknis dan kelembagaan. Kota dengan kapasitas rendah tidak dapat langsung mengadopsi teknologi kompleks seperti DMA berbasis SCADA tanpa terlebih dahulu memperkuat infrastruktur dasar, termasuk peningkatan kapasitas intake, pengembangan kompetensi SDM teknis, serta implementasi perangkat IoT awal seperti AMR dan LoRaWAN untuk membentuk fondasi data yang andal. Dengan demikian, fase intervensi yang dirancang dalam roadmap tidak hanya mengikuti urutan teknologi, tetapi juga mempertimbangkan aspek risiko, kesiapan sumber daya, dan kemampuan institusional agar implementasi dapat dilakukan secara bertahap, adaptif, dan berkelanjutan. Pendekatan ini memastikan bahwa setiap tahap pembangunan memiliki landasan teknis yang kuat dan mampu mendukung fase berikutnya tanpa menciptakan beban operasional yang berlebihan bagi PDAM.

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

4.3. *Rekomendasi Roadmap Tiga Fase (2025-2035)*

Roadmap dirancang berdasarkan kesenjangan empiris dan praktik terbaik dari kota *benchmark*. Mengacu pada kerangka *roadmapping* global [15], *roadmap* ini disusun dalam tiga fase yang dapat diimplementasikan secara bertahap oleh PERUMDA Gunung Poteng. Perencanaan ini mempertimbangkan kondisi eksisting sistem penyediaan air minum serta proyeksi kebutuhan pelayanan jangka menengah dan panjang. Setiap fase difokuskan pada pencapaian target teknis dan operasional yang berbeda sesuai dengan tingkat kesiapan infrastruktur dan kelembagaan. Rincian tahapan, program utama, serta indikator kinerja pada masing-masing fase disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Rekomendasi Roadmap Tiga Fase

Fase	Tahun	Program Utama	Sub-Program	Target	Anggaran Est.	KPI
Foundation	2025–2026	Penguatan Air Baku	Pembangunan intake baru Bendungan Eria	+100 L/s	Rp 15 M	Debit ≥ 80 L/s
Balikpapan	2027–2029	IoT Deployment	Instalasi 500 AMR dan 4 LoRaWAN *Gateway*	500 SR online	Rp 2,3 M	≥ 95% meter terbaca otomatis
Singkawang	2030-2035	DMA Expansion	Pembangunan 5 zona DMA dan integrasi SCADA	5 Zona Aktif	Rp 6 M	NRW ≤ 20%

4.4. *Matriks Roadmap Smart Water*

4.4.1. *Adaptasi Format RPJMD*

Format matriks roadmap pada subbab ini disusun dengan mengadaptasi struktur perencanaan jangka menengah yang umum digunakan dalam dokumen RPJMD, yaitu mencakup elemen program, subprogram, sasaran, indikator kinerja utama, pelaksana, serta estimasi anggaran. Adaptasi ini dilakukan agar rekomendasi roadmap *smart water* dapat selaras dengan pola tata kelola perencanaan daerah dan memiliki tingkat keterbacaan yang tinggi bagi perangkat daerah seperti Bappeda, Dinas PU, dan PERUMDA Gunung Poteng. Meskipun kerangka kolom yang digunakan mengikuti format RPJMD, seluruh isi matriks mulai dari nama program, target teknis, hingga estimasi biaya merupakan hasil inisiasi penelitian yang disesuaikan dengan konteks lokal Singkawang, hasil *benchmarking* Surabaya dan Balikpapan, serta temuan analisis kesenjangan pada Bab 3. Dengan pendekatan simulatif ini, roadmap tidak bermaksud mereplikasi dokumen RPJMD resmi, tetapi menyediakan rancangan operasional yang dapat langsung diintegrasikan ke dalam RPJMD 2025-2035 atau Renstra PDAM tanpa perubahan besar pada struktur tabelnya. Pendekatan ini memastikan bahwa roadmap memiliki kesesuaian format administrasi, sekaligus mempertahankan akurasi ilmiah berbasis bukti dan hasil analisis kapasitas. Struktur program, sasaran, indikator kinerja, serta linimasa implementasi roadmap berbasis format RPJMD tersebut disajikan secara rinci pada Tabel 9.

Tabel 9. Matriks Roadmap RPJMD Smart Water

Program	Sub-Program	Sasaran	Indikator/KPI	Pelaksana	Tahun 2025-2035 (Linimasa)	Est. Anggaran	Catatan Monev
Penguatan Air Baku	Pembangunan intake Bendungan Eria	Menambah kapasitas 100 L/s	Debit ≥ 80 L/s	PERUMDA AMGP, Dinas PU	2025-2026	Rp 15 M	Prioritas Krisis Air Baku
IoT Deployment	Instalasi 500 AMR	Digitalisasi pencatatan meter	≥ 95% meter terbaca otomatis	PERUMDA AMGP, Diskominfo	2027-2028	Rp 1,5 M	Uji coba 2 Kecamatan
IoT Deployment	Instalasi LoRaWAN *Gateway*	Komunikasi data real-time	1 *gateway*/kelurahan prioritas	Diskominfo	2027-2029	Rp 0,8 M	Integrasi Dashboard
DMA Expansion	Pembentukan 5 Zona DMA	Penurunan NRW	NRW ≤ 20%	PERUMDA AMGP, Bappeda	2030-2035	Rp 6 M	Integrasi SCADA
Smart SCADA	SCADA berbasis IoT	Monitoring tekanan & debit	Alarm kebocoran ≤ 5 menit	PERUMDA AMGP	2033-2035	Rp 1,2 M	Dasar *Smart Grid*

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

Tabel 9 memperlihatkan struktur roadmap *smart water* Kota Singkawang yang telah diselaraskan dengan format matriks RPJMD, sehingga setiap program memiliki sasaran, indikator, pelaksana, anggaran, serta catatan monitoring yang jelas. Pada fase awal, program penguatan air baku melalui pembangunan intake Bendungan Eria berfungsi sebagai fondasi kapasitas sistem, dengan target debit minimal 80 L/s dan anggaran terbesar sebesar Rp 15 miliar karena sifatnya yang berorientasi infrastruktur dasar. Fase berikutnya berfokus pada digitalisasi pencatatan meter melalui pemasangan 500 AMR dan empat *gateway* LoRaWAN yang diharapkan mampu mencapai tingkat keterbacaan otomatis lebih dari 95 persen per pelanggan. Tahap ini tidak hanya memperkuat akurasi data konsumsi, tetapi juga memastikan komunikasi data real-time untuk wilayah prioritas.

Selanjutnya, program ekspansi DMA selama 2029-2032 ditujukan untuk menurunkan NRW hingga di bawah 20 persen. Pengembangan zonasi ini dipilih berdasarkan efektivitas yang telah dibuktikan kota pembanding dan menjadi prasyarat penting bagi integrasi sistem kendali berbasis SCADA. Pada tahap akhir, implementasi SCADA difokuskan pada peningkatan ketepatan deteksi kebocoran dengan waktu respons di bawah lima menit, yang menandai transisi menuju *smart grid* air perkotaan. Hubungan antarprogram dalam tabel menunjukkan bahwa roadmap disusun secara bertahap dan saling bergantung, dengan logika pembangunan yang dimulai dari pemulihan kapasitas air baku, kemudian digitalisasi, hingga menuju otomatisasi penuh jaringan distribusi.

4.4.2. *Visualisasi Timeline: Gantt Chart*

Visualisasi jadwal implementasi diperlukan untuk menunjukkan keterurutan program, durasi pengerjaan, serta hubungan dependensi antar komponen dalam roadmap *Smart Water* Kota Singkawang. *Gantt Chart* disusun berdasarkan Tabel 9 (Matriks Roadmap RPJMD *Smart Water*) dan menggambarkan linimasa seluruh program dari tahun 2025 hingga 2035. Posisi visualisasi ditempatkan setelah Tabel 9 untuk menjaga kesinambungan antara struktur perencanaan dan jadwal implementasi.

Gantt Chart menggunakan tiga kelompok warna untuk menegaskan tahapan pembangunan:

1. Hijau menandai fase Penguatan Air Baku yang menjadi prasyarat teknis bagi seluruh program hilir.
2. Kuning menunjukkan fase IoT *Deployment* yang dimulai setelah kapasitas air baku bertambah dan jaringan distribusi siap diintegrasikan dengan perangkat digital.
3. Biru menandai fase *Optimization*, yakni perluasan zona DMA (*District Metered Area*) dan pengembangan SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) hingga mencapai operasional penuh.

Ketiga warna tersebut menggambarkan hubungan hierarkis antar komponen: hijau sebagai fondasi teknis, kuning sebagai tahap digitalisasi awal, dan biru sebagai fase optimasi jaringan. Linimasa ini juga memperlihatkan bahwa implementasi *Internet of Things* tidak dimulai sebelum intake Bendungan Eria mampu menambah debit air baku, dan ekspansi DMA tidak dilakukan sebelum pembacaan meter digital mencapai stabilitas operasional. Skema pewarnaan tersebut digunakan untuk memudahkan pembacaan tahapan implementasi dan membedakan fokus intervensi pada setiap fase pengembangan sistem. Pengelompokan visual ini juga membantu menunjukkan keterkaitan antarprogram dalam satu alur pengembangan yang berkelanjutan. Urutan fase dan hubungan antarprogram dalam linimasa implementasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 1..

Program	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Penguatan Air Baku – Pembangunan intake Bendungan Eria	Mulai konstruksi	Konstruksi & commissioning									
IoT Deployment – Instalasi 500 AMR			Perencanaan teknis	Pemasangan bertahap 2 kecamatan	Finalisasi 500 unit						
IoT Deployment – Pemasangan 4 LoRaWAN Gateway				2 gateway inti	2 gateway tambahan						
DMA Expansion – Pembentukan 5 Zona DMA						Perencanaan DMA	2 zona beroperasi	2 zona lanjutan	1 zona final		
Smart SCADA – Monitoring tekanan & debit berbasis IoT									Pengembangan SCADA	Integrasi final	Operasional penuh

Gambar 1. *Gantt Chart* Implementasi *Smart Water* Singkawang

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

Gantt Chart menunjukkan urutan pelaksanaan setiap program berdasarkan tingkat urgensi, kompleksitas teknis, dan dependensi antar-komponen dalam roadmap. Program Penguatan Air Baku, yang mencakup pembangunan intake Bendungan Eria, ditempatkan pada awal periode 2025-2026 karena peningkatan debit air baku merupakan prasyarat bagi seluruh program berikutnya. Tanpa stabilitas pasokan air, digitalisasi dan optimasi jaringan tidak dapat mencapai keluaran yang diharapkan. Setelah kapasitas air baku diperkuat, tahapan IoT Deployment dilaksanakan pada periode 2027-2029 melalui pemasangan 500 *Automatic Meter Reading* (AMR) dan empat LoRaWAN *Gateway*. Kedua intervensi ini dilakukan secara bertahap untuk memastikan kesiapan teknis PDAM Singkawang yang sebelumnya belum memiliki infrastruktur IoT dan untuk menghindari risiko kegagalan implementasi akibat keterbatasan kapasitas operasional.

Tahapan berikutnya adalah DMA *Expansion* (*District Metered Area*) yang dilaksanakan mulai 2030 hingga 2035 melalui pembentukan lima zona DMA. Alur pelaksanaannya terdiri dari tahap perencanaan (2030), pengoperasian dua zona awal (2031), perluasan dua zona lanjutan (2032), dan penyelesaian zona terakhir (2033). Penjadwalan ini berada pada periode menengah-akhir karena keberhasilan DMA memerlukan data konsumsi pelanggan yang akurat, integritas jaringan yang telah terdigitalisasi, serta keberfungsian penuh sistem AMR dan LoRaWAN. Setelah seluruh zona DMA beroperasi, program *Smart* SCADA mulai diimplementasikan pada 2033 untuk meningkatkan kemampuan pengawasan tekanan dan debit secara real-time, yang kemudian diikuti integrasi penuh pada 2034 dan operasional sistem pada 2035. Kombinasi tahapan ini menandai terbentuknya sistem *smart water* grid di Kota Singkawang yang telah terukur, bertahap, dan selaras dengan kapasitas daerah.

4.4.3. *Estimasi Biaya dan Skema Pendanaan*

Estimasi kebutuhan investasi untuk pelaksanaan roadmap *smart water* Kota Singkawang selama periode 2025-2035 dihitung berdasarkan harga satuan perangkat IoT yang tercantum dalam e-catalog Kementerian PUPR tahun 2024. Informasi harga perangkat AMR dan LoRaWAN pada katalog resmi tersebut digunakan sebagai dasar penyusunan biaya untuk fase *Development* [10]. Sementara itu, referensi biaya implementasi *District Metered Area* (DMA) diperoleh dari laporan Perumda Tirta Manuntung Balikpapan tahun 2024 yang mencatat kebutuhan investasi sekitar Rp 1,2 miliar untuk satu zona DMA [12]. Total kebutuhan biaya selama sepuluh tahun diperkirakan mencapai sekitar Rp 24,5 miliar. Komposisi terbesar dari total pembiayaan berada pada fase *Foundation* dengan nilai sekitar Rp 15,5 miliar, yang dialokasikan terutama untuk pembangunan intake Bendungan Eria. Estimasi ini disusun dengan mengacu pada pola pembiayaan infrastruktur air baku yang dijabarkan secara komprehensif dalam laporan *Cities Development Initiative* for Asia (CDIA) tahun 2020 [4].

Pada fase *Development*, kebutuhan biaya diperkirakan sebesar Rp 3,5 miliar. Perhitungan ini didasarkan pada harga satuan perangkat IoT yang tercantum pada e-catalog PUPR, termasuk perangkat *smart meter* dan *gateway* yang menjadi komponen utama dalam tahap digitalisasi awal sistem distribusi [10]. Selanjutnya, fase *Optimization* membutuhkan sekitar Rp 5,5 miliar untuk pengembangan lima zona DMA beserta integrasi SCADA. Nilai ini dihitung dengan mengacu pada pengalaman implementasi DMA di Balikpapan yang terbukti mampu menurunkan NRW secara signifikan setelah intervensi dilakukan [12].

Skema pendanaan disusun agar tidak membebani APBD (Anggaran Pendapatan dan Belanja Daerah) Kota Singkawang secara berlebihan. Porsi pendanaan utama berasal dari APBD untuk mendukung pembangunan infrastruktur dasar dan peningkatan kapasitas teknis. Sumber pendanaan tambahan diproyeksikan berasal dari program *Corporate Social Responsibility* (CSR) perusahaan teknologi, terutama untuk mendukung penyediaan perangkat IoT. Pendekatan kolaboratif seperti ini telah digunakan dalam berbagai program digitalisasi infrastruktur di tingkat daerah, sebagaimana dijelaskan dalam laporan OpenGov Asia terkait modernisasi sistem meter air berbasis IoT di Indonesia [9]. Selain itu, sebagian kecil dana direncanakan berasal dari hibah internasional, terutama untuk mendukung pelatihan teknisi dan sertifikasi IoT. Mekanisme hibah seperti ini sebelumnya digunakan dalam kemitraan Kota Balikpapan dengan Korea *Water Partnership* dalam rangka peningkatan kapasitas pengendalian NRW [12].

Melalui struktur pembiayaan yang memadukan APBD, CSR, dan hibah internasional, roadmap *smart water* Kota Singkawang memiliki landasan finansial yang realistis dan berkelanjutan. Pendekatan pembiayaan berlapis ini sejalan dengan rekomendasi yang dikemukakan dalam laporan CDIA mengenai strategi investasi kota menengah yang memiliki keterbatasan fiskal [4]. Dengan demikian, model pendanaan ini dapat direplikasi oleh daerah lain yang menghadapi kondisi serupa.

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

4.4.4. *Validasi Roadmap*

Validasi roadmap dilakukan dengan mencocokkan setiap rekomendasi dengan bukti empiris yang telah diterapkan pada kota rujukan. Validasi pertama merujuk pada implementasi teknologi yang diterapkan oleh PDAM Surya Sembada Surabaya. Berdasarkan laporan resmi tahun 2024, Surabaya telah menginstal 1.000 unit *smart water* meter berbasis AMR serta delapan LoRaWAN *Gateway* yang mampu melakukan pembacaan konsumsi air pelanggan secara otomatis setiap jam [11]. Bukti ini mengonfirmasi bahwa penggunaan AMR dan LoRaWAN merupakan teknologi yang telah teruji di lapangan dan memberikan peningkatan transparansi data secara signifikan.

Validasi kedua diperoleh dari hasil implementasi pengendalian *non-revenue water* (NRW) di Kota Balikpapan. Menurut laporan Perumda Tirta Manuntung Balikpapan tahun 2024, penerapan *District Metered Area* (DMA) dan kolaborasi teknis bersama Korea *Water Partnership* berhasil menurunkan nilai NRW dari 35% menjadi 25,85% dalam kurun empat tahun [12]. Data ini menunjukkan bahwa strategi zonasi DMA terbukti efektif untuk memperbaiki efisiensi jaringan pipa dan mengurangi kebocoran fisik.

Dengan merujuk pada dua praktik terbaik tersebut, setiap elemen dalam roadmap mulai dari pemasangan 500 AMR dan empat *gateway* LoRaWAN, hingga ekspansi lima zona DMA memiliki landasan empiris yang kuat dan bukan merupakan intervensi eksperimental. Oleh karena itu, roadmap *smart water* untuk Kota Singkawang dapat direplikasi dengan tingkat keandalan yang tinggi serta disesuaikan dengan kapasitas lokal tanpa mengorbankan efektivitas implementasi.

Implementasi roadmap berpotensi menghadapi sejumlah risiko, seperti keterbatasan anggaran tahunan PDAM, kesiapan sumber daya manusia dalam mengoperasikan perangkat IoT, serta ketergantungan pada vendor penyedia teknologi. Selain itu, faktor eksternal seperti fluktuasi harga peralatan, kebijakan pemerintah daerah, dan kondisi sumber air baku dapat memengaruhi kelancaran fase implementasi. Oleh karena itu, setiap fase roadmap perlu disertai mekanisme mitigasi risiko melalui pelatihan teknis, penguatan tata kelola data, serta evaluasi periodik terhadap pencapaian kinerja digitalisasi.

4.5. *Estimasi Biaya dan Skema Pendanaan*

Estimasi kebutuhan biaya untuk pelaksanaan roadmap *smart water* selama periode 2025-2035 disusun berdasarkan harga satuan perangkat dan infrastruktur yang tercantum dalam e-catalog Kementerian PUPR tahun 2024 serta referensi biaya implementasi DMA dari Perumda Tirta Manuntung Balikpapan. Total kebutuhan investasi diperkirakan sebesar Rp 24,5 miliar yang terbagi ke dalam tiga fase utama. Fase *Foundation* merupakan komponen biaya terbesar, yaitu sekitar Rp 15,5 miliar, yang dialokasikan terutama untuk pembangunan intake Bendungan Eria. Pada fase *Development*, kebutuhan investasi diperkirakan mencapai Rp 3,5 miliar, meliputi instalasi 500-unit AMR dan empat LoRaWAN *Gateway* sebagaimana dirinci dalam katalog perangkat IoT resmi. Selanjutnya, fase *Optimization* memerlukan sekitar Rp 5,5 miliar untuk pengembangan lima zona DMA beserta integrasi awal SCADA.

Skema pendanaan dirancang menggunakan model pembiayaan berlapis agar tidak membebani APBD secara berlebihan. Porsi terbesar berasal dari APBD untuk pembangunan infrastruktur dasar dan penguatan kapasitas teknis. Dukungan tambahan diperoleh melalui program CSR (*Corporate Social Responsibility*) perusahaan teknologi untuk penyediaan perangkat IoT dan pelatihan teknisi. Selain itu, sebagian kecil pendanaan direncanakan berasal dari hibah internasional, terutama untuk mendukung kegiatan pelatihan, sertifikasi IoT, dan pendampingan teknis. Pendekatan pembiayaan campuran ini sejalan dengan praktik kota *benchmark* dan model investasi kota menengah yang direkomendasikan pada literatur *smart water* serta laporan infrastruktur perkotaan. Struktur pembiayaan ini memastikan bahwa roadmap memiliki landasan finansial yang realistis, berkelanjutan, dan dapat direplikasi oleh pemerintah daerah lain yang menghadapi tantangan serupa dalam modernisasi sistem air minum.

4.6. *Implikasi Model Roadmap terhadap DSS dan Tata Kelola Data Kota Cerdas*

Roadmap yang disusun dalam penelitian ini tidak hanya berfungsi sebagai panduan implementasi teknologi, tetapi juga memiliki implikasi konseptual yang lebih luas terhadap pengembangan *Decision Support System* (DSS) dan tata kelola data pada kota cerdas. Pemasangan AMR dan LoRaWAN pada fase *Development*, misalnya, membuka peluang terbentuknya *real-time data pipeline* yang memungkinkan prediksi kebutuhan air, deteksi kebocoran berbasis anomali, hingga optimasi tekanan jaringan. Data granular ini dapat menjadi

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

komponen utama dalam DSS untuk mendukung pengambilan keputusan operasional maupun strategis, seperti penjadwalan pemeliharaan, proyeksi investasi, atau manajemen risiko kekeringan.

Selain itu, penerapan DMA dan SCADA pada fase *Optimization* menyediakan fondasi bagi konsolidasi data lintas unit PDAM, yang merupakan prasyarat bagi tata kelola data perkotaan yang terstandarisasi. Integrasi perangkat IoT ke dalam sistem perencanaan daerah melalui matriks RPJMD menunjukkan bahwa transformasi digital tidak dapat dipisahkan dari tata kelola kebijakan publik. Dengan demikian, model roadmap ini memberikan kontribusi konseptual dengan memperlihatkan hubungan antara digitalisasi operasional, struktur data terintegrasi, dan kapasitas institusional dalam mendukung sistem air minum yang lebih cerdas, adaptif, dan berbasis bukti.

5. DISKUSI

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kesenjangan kinerja PDAM Singkawang dibandingkan kota benchmark terutama disebabkan oleh rendahnya kesiapan infrastruktur digital dan keterbatasan kapasitas air baku, yang secara langsung memengaruhi efektivitas pengelolaan jaringan distribusi. Temuan ini mengonfirmasi bahwa penerapan *smart water* berbasis *Internet of Things* (IoT) tidak dapat dilakukan secara instan tanpa penguatan fondasi teknis dan kelembagaan, sebagaimana ditunjukkan oleh skor kapasitas dan risiko yang rendah pada Singkawang. Roadmap tiga fase yang diusulkan menjawab tujuan penelitian dengan menyediakan urutan intervensi yang realistis, dimulai dari penguatan air baku hingga integrasi *District Metered Area* (DMA) dan *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). Dengan demikian, hasil ini menegaskan bahwa transformasi digital sistem air minum harus dipahami sebagai proses bertahap yang bergantung pada kesiapan lokal, bukan sekadar adopsi teknologi.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu, temuan penelitian ini memperkuat hasil studi yang menyatakan bahwa efektivitas IoT dalam menurunkan *non-revenue water* (NRW) sangat bergantung pada kesiapan jaringan fisik dan struktur zonasi distribusi [13], [14]. Keberhasilan Surabaya dalam transparansi data pelanggan melalui *Automatic Meter Reading* (AMR) dan LoRaWAN sejalan dengan temuan sebelumnya mengenai peningkatan efisiensi monitoring berbasis data *real-time* [11], [19]. Sementara itu, capaian Balikpapan dalam menurunkan NRW melalui DMA mendukung literatur yang menekankan pentingnya manajemen tekanan sebagai prasyarat keberhasilan digitalisasi [12], [21]. Namun, penelitian ini memperluas kontribusi literatur dengan mengintegrasikan kedua pendekatan tersebut ke dalam satu kerangka *roadmapping* bertahap yang disesuaikan untuk kota menengah.

Temuan penelitian juga menunjukkan bahwa penerapan IoT tanpa stabilitas pasokan air baku, seperti yang terjadi di Singkawang selama musim kemarau, berpotensi menghasilkan manfaat yang terbatas atau bahkan tidak optimal. Hasil ini sedikit menantang asumsi dalam beberapa studi yang menempatkan teknologi digital sebagai solusi utama pengendalian NRW tanpa mempertimbangkan faktor eksternal seperti risiko iklim dan fluktuasi debit intake [20]. Dalam konteks ini, penelitian ini memberikan penjelasan bahwa krisis air baku musiman dapat mengaburkan dampak teknologi IoT terhadap kinerja jaringan jika tidak ditangani terlebih dahulu. Oleh karena itu, integrasi antara perencanaan sumber air dan digitalisasi jaringan menjadi temuan penting yang melengkapi literatur sebelumnya.

Secara teoretis, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan konsep *smart water maturity model* dengan menekankan pentingnya keselarasan antara kesiapan infrastruktur, kapasitas kelembagaan, dan tahapan teknologi. Secara praktis, roadmap yang dihasilkan memberikan panduan implementatif bagi PDAM kota menengah dalam mengadopsi IoT secara adaptif dan berkelanjutan, terutama di wilayah dengan keterbatasan fiskal dan risiko iklim tinggi. Meski demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan karena sepenuhnya bergantung pada data sekunder tanpa verifikasi lapangan, sehingga potensi bias data dan perbedaan standar pelaporan antar kota tidak dapat sepenuhnya dihindari. Selain itu, roadmap yang disusun bersifat simulatif dan memerlukan validasi teknis lanjutan sebelum diterapkan sebagai kebijakan operasional penuh.

6. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. *Kesimpulan*

Penelitian ini bertujuan menyusun roadmap pengembangan sistem *smart water* berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk Kota Singkawang melalui pendekatan studi komparatif terhadap praktik pengelolaan air minum di Surabaya dan Balikpapan. Analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa Singkawang berada pada posisi yang jauh tertinggal dalam hal kapasitas produksi, tingkat efisiensi jaringan, pengendalian *non-revenue* water (NRW), kesiapan infrastruktur digital, serta kemampuan menghadapi risiko iklim yang semakin sering

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

terjadi. Kesenjangan ini berhasil diidentifikasi secara sistematis melalui analisis komparatif dan penilaian kapasitas–risiko yang menggunakan enam parameter objektif sehingga memberikan gambaran menyeluruh mengenai kelemahan struktural yang harus segera ditangani.

Temuan empiris dari kota *benchmark* memperlihatkan bahwa penggunaan teknologi AMR (*Automatic Meter Reading*), LoRaWAN *Gateway*, dan *District Metered Area* (DMA) telah memberikan dampak signifikan terhadap transparansi data konsumsi, peningkatan efisiensi operasional, dan penurunan NRW secara terukur. Efektivitas teknologi tersebut menjadi rujukan dalam merumuskan intervensi yang relevan bagi Singkawang, terutama karena ketiga teknologi tersebut terbukti mampu meningkatkan kinerja jaringan bahkan pada kota dengan tingkat pertumbuhan yang tinggi maupun keterbatasan infrastruktur awal.

Berdasarkan identifikasi kesenjangan tersebut, penelitian ini menyusun roadmap pengembangan *smart water* dalam tiga fase utama: *Foundation* (2025-2026), *Development* (2027-2029), dan *Optimization* (2030-2035). Setiap fase dilengkapi dengan matriks operasional, visualisasi melalui *Gantt Chart*, skema pendanaan, serta estimasi biaya multi-tahun yang disusun agar sesuai dengan struktur perencanaan pemerintah daerah. Roadmap ini dirancang agar dapat langsung diintegrasikan ke dalam dokumen strategis daerah seperti RPJMD dan Renstra PERUMDA Gunung Poteng sehingga implementasinya memiliki dasar kebijakan yang jelas dan operasional.

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa penguatan air baku merupakan langkah awal yang tidak dapat diabaikan sebelum proses digitalisasi dilakukan. Digitalisasi melalui AMR dan LoRaWAN menjadi fondasi utama untuk memperoleh data konsumsi dan tekanan jaringan secara real-time, yang selanjutnya memungkinkan penerapan zonasi DMA secara bertahap. Ekspansi DMA berbasis data inilah yang menjadi strategi paling efektif untuk menurunkan NRW di Singkawang dalam jangka menengah hingga panjang. Roadmap yang dihasilkan tidak hanya memiliki landasan empiris dan relevansi praktis, tetapi juga bersifat realistis, terukur, dan dapat direplikasi oleh kota menengah lain yang menghadapi permasalahan serupa.

6.2. *Saran*

Dari sisi akademis, penelitian ini memperluas penerapan teknologi roadmapping dalam konteks utilitas air pada kota menengah di Indonesia. Dari sisi praktis, roadmap yang disusun memberikan panduan implementatif bagi pemerintah daerah dan PDAM dalam menetapkan prioritas investasi, mengembangkan kapabilitas digital, serta merencanakan modernisasi jaringan secara bertahap.

Berdasarkan hasil penelitian dan penyusunan roadmap, beberapa saran yang dapat dipertimbangkan adalah sebagai berikut.

1. Bagi Pemerintah Kota Singkawang dan PERUMDA AMGP, penting untuk memastikan pembangunan *intake* Bendungan Eria berjalan sesuai target waktu karena keberhasilan seluruh fase roadmap bergantung pada stabilitas debit air baku. Keterlambatan pada fase ini berpotensi menggeser seluruh jadwal transformasi.
2. Implementasi teknologi IoT perlu dilakukan secara bertahap dengan prioritas pada akurasi data konsumsi pelanggan melalui AMR dan LoRaWAN. PDAM perlu menyiapkan pelatihan teknis bagi SDM untuk memastikan kemampuan operasional tidak bergantung pada vendor. Persiapan kelembagaan dan tata kelola data sangat diperlukan sebelum masuk ke fase DMA. Pengembangan *dashboard monitoring*, standar operasi kebocoran, dan audit tekanan harus mulai dibangun pada fase *Development* agar kesiapan operasional meningkat.
3. Skema pendanaan berlapis harus dirumuskan lebih awal, termasuk pembagian peran antara APBD, CSR perusahaan teknologi, serta potensi hibah internasional. Pendekatan multi-sumber ini diperlukan mengingat keterbatasan fiskal Kota Singkawang.
4. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengembangkan simulasi hidrolik berbasis perangkat lunak (misalnya EPANET) agar desain zona DMA lebih presisi, serta evaluasi kelayakan finansial (NPV/IRR) dari setiap fase roadmap untuk memperkuat argumen investasi.

Dengan saran tersebut, roadmap *smart water* berbasis IoT yang dihasilkan diharapkan tidak hanya menjadi dokumen perencanaan, tetapi juga dapat diimplementasikan secara bertahap dan berkelanjutan, sehingga Singkawang mampu meningkatkan efisiensi layanan air minum serta mewujudkan fondasi menuju kota cerdas yang adaptif.

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

Penelitian lanjutan juga dapat memperluas cakupan analisis dengan memasukkan simulasi skenario berbasis *Decision Support System* (DSS) untuk memprediksi pola konsumsi, risiko kebocoran, dan ketahanan jaringan terhadap variabilitas iklim. Selain itu, pendekatan evaluasi ekonomi yang lebih mendalam seperti analisis sensitivitas biaya investasi, model proyeksi pendapatan PDAM, atau perhitungan manfaat sosial dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai nilai jangka panjang dari roadmap yang diusulkan. Dengan demikian, penelitian selanjutnya tidak hanya memperdalam aspek teknis, tetapi juga memperkuat landasan ilmiah dan finansial dalam implementasi *smart water* di kota menengah.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Tjendani, H. Trimurtiningrum, and S. Susanto, "Konsep Smart Water Management System pada Badan Penyelenggara Penyediaan Air Minum," *J. INTAKINDO Jatim*, vol. 1, no. 1, pp. 82–91, 2022. [Online]. Available: https://ejurnal.matakuliah.ac.id/index.php/intakindo/article/view/1/1

[2] S. M. Ibrahim and M. Ikhwan Najmi, "Computational Fluid Dynamics (CFD) Optimization in Smart Factories: AI-Based Predictive Modelling," *Journal of Technology Informatics and Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 56–74, Apr. 2025, doi: 10.51903/jtie.v4i1.264.

[3] F. Roni, M. Handoko, R. B. Parancika, M. Aris, Y. M. Ardi, and S. Syabrinildi, "Determination of Employee Performance: Work Environment and Leadership Style (Case Study at PT. MPIW Jakarta)," *Journal of Management and Informatics*, vol. 4, no. 2, pp. 773–790, Aug. 2025, doi: 10.51903/jmi.v4i2.216.

[4] CDIA, "Bulk Water Supply Project: Balikpapan–Singkawang Enhanced Water Supply Services," *Final Report*, Cities Development Initiative for Asia, Manila, Philippines, 2020. [Online]. Available: https://cdia.asia/project/bulk-water-supply

[5] Media Center Singkawang, "Krisis Air Baku, Distribusi Air Bersih Terganggu – Ini Upaya Perumda AMGP," *Pemkot Singkawang Official News*, Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://mediacenter.singkawangkota.go.id/berita/krisis-air-baku-distribusi-air-bersih-terganggu-ini-upaya-perumda-amgp

[6] Antara News Kalimantan Barat, "Perumda AMGP Singkawang Terus Berupaya Atasi Krisis Air Bersih," *Antara Kalbar*, Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://kalbar.antaranews.com/berita/654813/perumda-amgp-singkawang-terus-berupaya-mengatasi-krisis-air-bersih

[7] A. Nahya Amanta, M. Migunani, and M. U. Dewi, "Design and Development of STEKOM Learning Management System (SIAKAD) to Optimize User Experience," *Jurnal Ilmiah Sistem Informasi*, vol. 5, no. 1, pp. 1–16, Jan. 2026, doi: 10.51903/s15fn419.

[8] BPS, "Statistik Penduduk Indonesia 2024," Badan Pusat Statistik, Jakarta, Indonesia, 2024. [Online]. Available: https://www.bps.go.id/id/publication/2024/12/31/2f9b0be965c8f7f07cbd5d3f/statistik-penduduk-indonesia-2024.html

[9] Open Gov Asia, "IoT Smart Meters: Revolutionising Indonesia's Water Management," *Open Gov Asia*, Jun. 5, 2024. [Online]. Available: https://archive.opengovasia.com/2024/06/05/iot-smart-meters-revolutionising-indonesias-water-management

[10] XL Axiata, "LoRaWAN untuk Smart Water: Efisiensi Daya dan Jangkauan," *IoT White Paper*, 2023. [Online]. Available: https://www.xl.co.id/id/business/iot-solutions/white-paper-lorawan-smart-water

[11] PDAM Surya Sembada, "PDAM Surabaya Luncurkan 1.000 Smart Water Meter Dukung Smart City," *Official News*, Dec. 2024. [Online]. Available: https://www.pdam-sby.go.id/read/pdam-surabaya-luncurkan-1000-smart-water-meter-dukung-smart-city

[12] PTMB, "PTMB Raih Penghargaan Penyelenggaraan Air Minum Aman 2024," *Berita Resmi*, Nov. 2024. [Online]. Available: https://www.tirtamanuntung.co.id/berita/ptmb-raih-penghargaan-penyelenggaraan-air-minum-aman-2024

[13] B. Adebisi, A. Al-Emadi, M. Saeed, A. H. Abdullah, and S. H. Ahmed, "Cyber-Physical Systems for Water Supply Network Management: Basics, Challenges, and Roadmap," *Sustainability*, vol. 12, no. 22, p. 9555, 2020. doi: 10.3390/su12229555

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

[14] R. Gomes, J. Cassidy, B. Barbosa, M. Damião, P. Ramalho, A. Ganhão, A. Santos, and J. Feliciano, "Taking Water Efficiency to the Next Level: Digital Tools to Reduce Non-Revenue Water," *Journal of Hydroinformatics*, vol. 23, no. 3, pp. 453–465, Dec. 2020. doi: 10.2166/hydro.2020.072.

[15] R. Phaal and D. Probert, "A Practical Guide to Roadmapping," University of Cambridge, 2004. [Online]. Available: https://www.ifm.eng.cam.ac.uk/research/research-roadmapping

[16] Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*, 4th ed. Bandung: Alfabeta, 2018. [Online]. Available: https://alfabeta.co.id/book/metode-penelitian-kuantitatif-kualitatif-dan-rd

[17] R. C. Camp, *Benchmarking: The Search for Industry Best Practices*. Milwaukee: ASQC Press, 1989. [Online]. Available: https://asq.org/quality-press/display-item?item=h0939

[18] Media Center Singkawang, "Krisis Air Baku, Distribusi Air Bersih Terganggu – Ini Upaya Perumda AMGP," *Pemkot Singkawang*. Available: https://mediacenter.singkawangkota.go.id/berita/krisis-air-baku-distribusi-air-bersih-terganggu-ini-upaya-perumda-amgp

[19] R. Gomes, J. Cassidy, B. Barbosa, M. Damião, P. Ramalho, A. Ganhão, A. Santos, and J. Feliciano, "Taking Water Efficiency to the Next Level: Digital Tools to Reduce Non-Revenue Water," *Journal of Hydroinformatics*, vol. 23, no. 3, pp. 453–465, 2021. doi: 10.2166/hydro.2020.072.

[20] S. A. Matos, J. P. Hespanhol, R. A. dos Santos, T. M. F. Oliveira, and J. M. A. de Souza, "Digital Transformation of Water Utilities: A Systematic Review of IoT, Big Data, and DSS Integration," *Utilities Policy*, vol. 72, p. 101256, 2021. doi: 10.1016/j.jup.2021.101256.

[21] P. R. D. Farias and J. de Carvalho, "SCADA–IoT Convergence for Smart Water Grids: Challenges and Opportunities," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 38, p. 101604, 2020. doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101604.

[22] J. Wu, X. Li, Y. Zhang, S. Liang, and L. Wang, "IoT-Based Smart Water System for Real-Time Leakage Detection and Consumption Analytics," *Water Resources Management*, vol. 34, no. 12, pp. 3987–4002, 2020. doi: 10.1007/s11269-020-02616-z.

[23] J. Lynch, E. A. Smith, M. O'Connell, and L. T. Grant, "Data Governance Frameworks for Smart Cities: Implications for Water Utilities," *Government Information Quarterly*, vol. 39, no. 4, p. 101765, 2022. doi: 10.1016/j.giq.2022.101765.

[24] S. A. Nadafi, R. Sukmana, A. H. Nugroho, and M. F. Iskandar, "A Review of Smart Water Management Systems in Smart Cities," *Sustainable Cities and Society*, vol. 62, p. 102354, 2020. doi: 10.1016/j.scs.2020.102354.

[25] A. Sharma, P. K. Singh, R. Gupta, S. K. Sharma, and B. K. C. K., "A Review of NRW Reduction Strategies in Developing Countries: Role of IoT and Pressure Management," *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 20, no. 7, pp. 2323–2334, 2020. doi: 10.2166/ws.2020.064.