

Optimasi sistem deteksi kebocoran pipa distribusi air bersih secara real-time menggunakan LoRa Ebyte E220-400T22D dan visualisasi webserver

Isa Mahfudi¹, Muhammad Syirajuddin S.², Rifqi Ihza Syahputra³, Dhava Wirayuda⁴
e-mail: ¹isa_mahfudi@polinema.ac.id, ²svirajuddin@polinema.ac.id, ³rifqihzasyahputra@gmail.com,
⁴daffawirayuda128@gmail.com

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 30 Agustus 2025

Direvisi 29 September 2025

Diterbitkan 28 Oktober 2025

Kata kunci:

Deteksi kebocoran

Fusi sensor

Internet of Things (IoT)

LoRa E220

Sensor flowmeter

Sensor Pressure Transmitter

ABSTRAK

Kebocoran pada jaringan distribusi air bersih menjadi salah satu penyebab utama tingginya angka *non-revenue water* (NRW), yang berdampak pada kerugian finansial dan inefisiensi distribusi. Penelitian ini mengembangkan sistem deteksi kebocoran pipa berbasis fusi sensor (flowmeter dan pressure transmitter) yang diintegrasikan dengan modul komunikasi LoRa Ebyte E220-400T22D. Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan, katup solenoid sebagai aktuator, serta *web server* sebagai media pemantauan real-time. Algoritma fusi sensor menggabungkan data debit dan tekanan untuk meningkatkan akurasi deteksi serta mengurangi *false alarm*. Hasil kalibrasi menunjukkan rata-rata galat sensor $\pm 2\%$, masih dalam batas toleransi standar ($< 5\%$). Pengujian sistem pada kondisi normal memperlihatkan selisih debit dan tekanan yang sangat kecil ($< 1\%$), sehingga dikategorikan normal. Pada skenario kebocoran sisi pelanggan, sistem mengklasifikasikan tiga kondisi, yaitu normal (0 mm), mencurigakan (0,5 mm), dan terindikasi kebocoran ($\geq 1,0$ mm), dengan respons otomatis menutup katup solenoid. Uji komunikasi LoRa menunjukkan performa optimal pada jarak 100–800 m, dengan RSSI -55 hingga -92 dBm, PDR $\geq 90\%$, dan latensi ≤ 100 ms. Di atas jarak tersebut, kualitas komunikasi menurun signifikan hingga pesan gagal diterima pada 1.500 m. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi kebocoran secara efektif sekaligus mendukung pemantauan jaringan distribusi air berbasis IoT dengan komunikasi yang andal.

ABSTRACT

Keywords:

Flowmeter sensor

Internet of Things (IoT)

Leak detection

LoRa E220

Pressure transmitter sensor

Sensor fusion.

Leaks in potable-water distribution networks are a major contributor to non-revenue water (NRW), leading to financial losses and distribution inefficiency. This study develops a real-time pipe-leak detection system based on sensor fusion of a flowmeter and a pressure transmitter, integrated with a LoRa Ebyte E220-400T22D communication module. The system employs an ESP32 microcontroller as the processing unit, a solenoid valve as the actuator, and a web server for real-time monitoring. The fusion algorithm combines flow and pressure signals to improve detection accuracy and reduce false alarms. Calibration results show an average sensor error of $\pm 2\%$, within the standard tolerance ($< 5\%$). Under normal operating conditions, the difference in flow and pressure is very small ($< 1\%$), and is therefore classified as normal. For customer-side leakage scenarios, the system distinguishes three states: normal (0 mm), suspicious (0.5 mm), and indicated leak (≥ 1.0 mm), with an automatic response that closes the solenoid valve. LoRa communication tests indicate optimal performance at distances of 100–800 m, with RSSI ranging from -55 to -92 dBm, packet delivery ratio (PDR) $\geq 90\%$, and latency ≤ 100 ms. Beyond this range, communication quality degrades significantly, and messages may fail at 1,500 m. These findings demonstrate that the proposed system can effectively detect leaks while supporting reliable IoT-based monitoring of water distribution networks.

Penulis Korespondensi:

Isa Mahfudi,

Jurusan Teknik Elektro,

Politeknik Negeri Malang,

Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur, Indonesia

Email: isa_mahfudi@polinema.ac.id**1. PENDAHULUAN**

Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk dunia, kebutuhan akan air bersih juga terus bertambah. Rata-rata kebutuhan air bersih per orang per hari mencapai 100 hingga 150 liter[1]. Kondisi ini menuntut adanya pengelolaan sumber daya air yang efisien. Salah satu permasalahan utama dalam distribusi air adalah kebocoran pada jaringan pipa, yang menyebabkan tingginya angka kehilangan air atau *non-revenue water* (NRW). Di Kota Malang, tingkat kehilangan air tercatat sebesar 19,76%, yang setara dengan kerugian finansial sekitar Rp 3,28 miliar per bulan[2]. Tingginya angka NRW tersebut menunjukkan urgensi penerapan sistem deteksi kebocoran yang efektif untuk mendukung efisiensi distribusi air. Dengan demikian, pengembangan metode deteksi kebocoran yang tepat dan tanggap menjadi hal yang sangat krusial untuk mendukung efisiensi distribusi air.

Berbagai pendekatan telah diusulkan dalam penelitian sebelumnya. Herdiyanto dkk [3] merancang sistem deteksi kebocoran menggunakan sensor flowmeter serta membandingkan performa jaringan komunikasi *Bluetooth* HC-05 dan LoRa SX1278 Ra-02. Hasil penelitian menunjukkan bahwa LoRa SX1278 Ra-02 lebih optimal dengan jangkauan hingga 400 meter, sementara *Bluetooth* terbatas pada 10 meter. Namun, *flowmeter* memiliki keterbatasan karena kesulitan mendeteksi kebocoran dengan debit yang kecil. Santosa dkk. (2025) [4], mengimplementasikan sensor *pressure transmitter* yang mampu membaca tekanan hingga 178 Psi, di mana penurunan di bawah ambang tersebut diindikasikan sebagai kebocoran. Meski demikian, metode ini tidak mampu mengukur total aliran ketika terjadi kebocoran. Simulasi pencarian rute terpendek dari kebocoran pipa telah diusulkan oleh Irsyada (2021) [5], setiap konsumen / pipa cabang / unit kontrol dianggap sebagai node. Panjang pipa, jarak jalan, atau waktu tempuh dijadikan sebagai bobot. Algoritma Dijkstra digunakan untuk mencari jalur terpendek dari titik teknisi menuju ke lokasi kebocoran.

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, Andini dkk. (2024) [6], mengusulkan integrasi sensor flowmeter dan *pressure transmitter*. Penggabungan ini meningkatkan akurasi deteksi secara *real-time*. Flowmeter digunakan untuk membandingkan debit sebelum dan sesudah titik kebocoran, sedangkan sensor tekanan menganalisis kondisi jaringan pipa yang dapat menjadi indikator kebocoran, misalnya tekanan tinggi saat debit rendah. Pendekatan ini terbukti lebih presisi, tetapi masih menghadapi tantangan dalam hal pengiriman data jarak jauh karena karakteristik jaringan pipa yang tersebar di daerah pemukiman.

Dalam konteks transmisi data, teknologi *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN), khususnya LoRa/LoRaWAN, banyak dipilih karena jangkauannya yang luas, kebutuhan daya rendah, dan biaya operasional yang efisien. Sejumlah studi juga telah menunjukkan efektivitas LoRa/LoRaWAN dalam pemantauan hidraulik, deteksi kebocoran, dan pengembangan layanan air cerdas [7][8]. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada perancangan dasar atau monitoring parameter tunggal, tanpa menekankan aspek optimasi seperti latensi pengiriman, keandalan komunikasi, efisiensi *payload*, strategi *sampling* adaptif, maupun fusi sensor [9][10][11][12][13].

Agbolade dkk (2023) [10], mengusulkan arsitektur deteksi kebocoran berbasis LoRaWAN dengan pengiriman data laju alir dan tekanan ke *cloud*. Selain itu Alghamdi dkk (2022)[14] juga mengevaluasi performa LoRaWAN untuk pemantauan air, khususnya dari sisi jangkauan dan reliabilitas. Hasil-hasil tersebut memperkuat kelayakan LoRa/LoRaWAN pada sistem perpipaan berskala kota. Kendati demikian, penelitian terkait optimasi *real-time* (misalnya *end-to-end delay*, *packet success rate*, maupun penyyetelan parameter radio SF/BW/CR) untuk deteksi kebocoran masih terbatas. Selain itu, sebagian studi hanya menekankan pemantauan salah satu parameter atau sebatas integrasi dengan aplikasi seluler dan *cloud*[8] [13][14][15].

Dari sisi metodologi, *multisensor data fusion* memberikan dasar teoretis untuk menggabungkan informasi debit-tekanan secara sistematis agar meningkatkan akurasi, mengurangi ambiguitas, dan menekan *false alarm*[16]. Klasifikasi *Dasarathy* menempatkan penggabungan pada level *data/feature/decision*, sementara model *JDL* memetakan proses dari praproses level rendah hingga penilaian situasi. Dengan mempertimbangkan keterbatasan komputasi *edge* dan *bandwidth* komunikasi, penggabungan pada tingkat skor/keputusan (*score/decision-level fusion*) sering menjadi pilihan praktis untuk sistem IoT terdistribusi[17][18].

Di sisi lain, implementasi praktis modul Ebyte E220-400T22D, yang beroperasi pada band 400 MHz dengan keunggulan jangkauan luas dan konsumsi daya rendah, masih jarang diuji dalam konteks deteksi kebocoran pipa. Hal ini membuka ruang penelitian terkait konfigurasi, integrasi sensor, serta pengujian lapangan pada kondisi nyata. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini berfokus pada optimasi sistem deteksi

kebocoran pipa secara real-time melalui fusi sensor flowmeter dan pressure transmitter, dengan transmisi data menggunakan modul LoRa Ebyte E220-400T22D. Hasil deteksi akan divisualisasikan melalui tampilan webserver interaktif untuk memudahkan pemantauan dan peringatan dini.

2. METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian ini diawali dengan identifikasi dan analisis masalah, yaitu menelaah permasalahan kebocoran pipa yang berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi dan lingkungan, sekaligus mengkaji keterbatasan metode deteksi yang selama ini digunakan. Tahap berikutnya adalah studi literatur, yang dilakukan dengan mengumpulkan dan menelaah berbagai penelitian terdahulu yang relevan, terutama terkait metode deteksi kebocoran, penerapan fusi sensor, serta pemanfaatan komunikasi LoRa sebagai media transmisi data. Berdasarkan hasil studi literatur, dilakukan perancangan sistem yang meliputi desain arsitektur perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras terdiri atas sensor flowmeter dan pressure transmitter sebagai akuisisi data, mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan, serta modul LoRa E220 untuk komunikasi nirkabel. Sistem ini juga terhubung ke *web server* sebagai media monitoring. Pada tahap ini ditentukan pula algoritma fusi data sensor untuk meningkatkan akurasi deteksi kebocoran. Tahap selanjutnya adalah kalibrasi sensor, di mana flowmeter dan pressure transmitter diuji serta disesuaikan dengan standar pengukuran agar data yang dihasilkan lebih akurat. Setelah itu dilakukan implementasi sistem, berupa perakitan perangkat keras (sensor, ESP32, modul LoRa, dan solenoid valve) serta pengembangan perangkat lunak berupa firmware mikrokontroler, komunikasi data LoRa, dan pembuatan dashboard monitoring berbasis web. Selanjutnya tahap evaluasi dan analisis, di mana dilakukan pengukuran kinerja sistem berdasarkan parameter performa deteksi, waktu deteksi, akurasi kebocoran, tingkat false alarm, serta efisiensi konsumsi energi. Pada tahap ini juga dibandingkan performa sistem berbasis sensor tunggal dengan sistem berbasis fusi sensor. Tahap akhir adalah kesimpulan dan rekomendasi, yang berisi penarikan kesimpulan mengenai efektivitas sistem deteksi kebocoran yang dikembangkan serta pemberian saran untuk pengembangan lebih lanjut agar sistem dapat diterapkan secara lebih luas dan efisien di lapangan.

2.1 Algoritma Fusi Sensor

Algoritma fusi digunakan untuk menggabungkan informasi dari sensor *flowmeter* (Q) dan sensor *pressure transmitter* (P) untuk mendeteksi anomali (kebocoran), menurunkan *false alarm*, dan menentukan estimasi besaran kebocoran dalam waktu nyata. Tahapan dalam metode ini meliputi: pra-proses, penentuan skor anomali per-node, Penentuan aturan fusi dan penggabungan skor, penentuan estimasi kebocoran dan optimasi parameter.

2.2.1 Pra-Proses

Tahap ini dilakukan untuk mengurangi noise, menghilangkan *outlier*, dan membuat data *comparable* antar-node.

1. **Sampling & time sync.** Pada tahap ini semua node sampling pada frekuensi tetap f_{sf_sfs} (mis. 1 Hz). Pastikan *timestamp* ter-sinkron (RTC atau koreksi gateway) karena *mass-balance* dan perbandingan antar-node memerlukan sinkronisasi waktu.
2. **Filter anti-outlier.** Pada tahap menggunakan *median filter* dengan jendela kecil $w_{medw_}\{med\}w_{med}$ (mis. 3–7 sampel) untuk menghilangkan spike. Terdapat tindakan alternatif seperti menerapkan *Hampel filter* untuk deteksi dan koreksi *outlier*.
3. **Smoothing.** Pada tahap ini diterapkan *Exponential Moving Average* (EMA) untuk sinyal Q dan P[19]:

$$\hat{x}_t = \alpha x_t + (1 - \alpha) \hat{x}_{t-1} \quad (1)$$

Keterangan variabel:

- \hat{x}_t merupakan nilai hasil estimasi atau data yang telah dihaluskan (*smoothed value*) pada waktu t . Ini adalah output setelah dilakukan proses *exponential smoothing*.
 - x_t merupakan nilai data aktual (*raw data*) yang diperoleh sensor pada waktu
 - \hat{x}_{t-1} merupakan nilai hasil estimasi atau nilai yang telah dihaluskan pada waktu sebelumnya ($t-1$). Ini digunakan sebagai referensi untuk menghitung nilai saat ini.
 - α merupakan parameter *smoothing* ($0 < \alpha \leq 1$) yang menentukan seberapa besar bobot data terbaru dibandingkan dengan data sebelumnya. Nilai α telah ditentukan sebesar $\alpha=0.2$ sebagai titik awal.
4. **Normalisasi terhadap baseline per-segmen.** Normalisasi terhadap baseline per-segmen dilakukan dengan membangun profil operasi normal pada setiap segmen atau node. Pada tahap ini, data aliran (*flow rate*) dan tekanan dicatat dalam kondisi tanpa kebocoran untuk mendapatkan baseline statistik. Nilai rata-rata aliran dan deviasi standar dihitung untuk setiap node sebagai acuan dalam mendeteksi penyimpangan aliran pada kondisi aktual. Selain itu, baseline tekanan, yaitu perbedaan tekanan antar-node pada kondisi operasi normal, juga ditentukan. Baseline ini berfungsi sebagai referensi pembandingan ketika sistem mendeteksi adanya penurunan aliran atau anomali tekanan yang berpotensi

mengindikasikan kebocoran pada pipa. Dengan pendekatan ini, sistem dapat menyesuaikan hasil deteksi terhadap kondisi normal tiap segmen sehingga meningkatkan akurasi dalam identifikasi anomali.

5. **Pembaruan *baseline* adaptif.** Ini digunakan pembelajaran adaptif untuk menyesuaikan perubahan kondisi operasi.

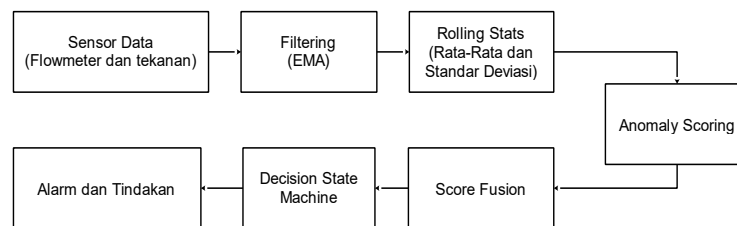
2.2.2 Deteksi Anomali per Node

Setiap node menghitung skor anomali dari Q dan P secara lokal.

1. **Flow anomaly score (Skor anomali aliran).** Digunakan untuk mengukur tingkat penyimpangan data aliran (Q) terhadap kondisi normal (*baseline*). Dengan cara ini, nilai skor dapat dipetakan secara konsisten ke dalam rentang $[0,1]$, sehingga lebih mudah digunakan dalam sistem deteksi otomatis maupun ketika dilakukan fusi dengan indikator lain, seperti gradien tekanan.
2. **Pressure gradient (kenaikan/gradien tekanan).** Digunakan untuk mendeteksi perubahan distribusi tekanan antar-node pada jaringan pipa. Transformasi ini memudahkan integrasi skor tekanan ke dalam sistem fusi sensor sehingga dapat dibandingkan secara konsisten dengan skor aliran.
3. **Skor trend (perubahan temporal atau *derivative*).** Digunakan untuk mendeteksi pola kebocoran yang muncul secara bertahap (*cumulative drop*) maupun mendadak (*sudden step*). Untuk menangkap perubahan ini, digunakan pendekatan derivatif terestimasi (*slope*) pada jendela waktu tertentu $w_{trend_}\{trend\}w_{trend}$

2.2.3 Penerapan Algoritma Fusi (Rule-based dan Skor Gabungan)

Formulasi skor gabungan dilakukan dengan mengintegrasikan tiga skor utama, yaitu skor anomali aliran, skor gradien tekanan, dan skor tren. Selanjutnya, pada *rule-based decision*, sistem deteksi kebocoran menggunakan kombinasi aturan dan ambang batas (*threshold*) agar deteksi lebih cepat dan mudah diinterpretasikan. Tahapan dari algoritma fusi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Algoritma Fusi

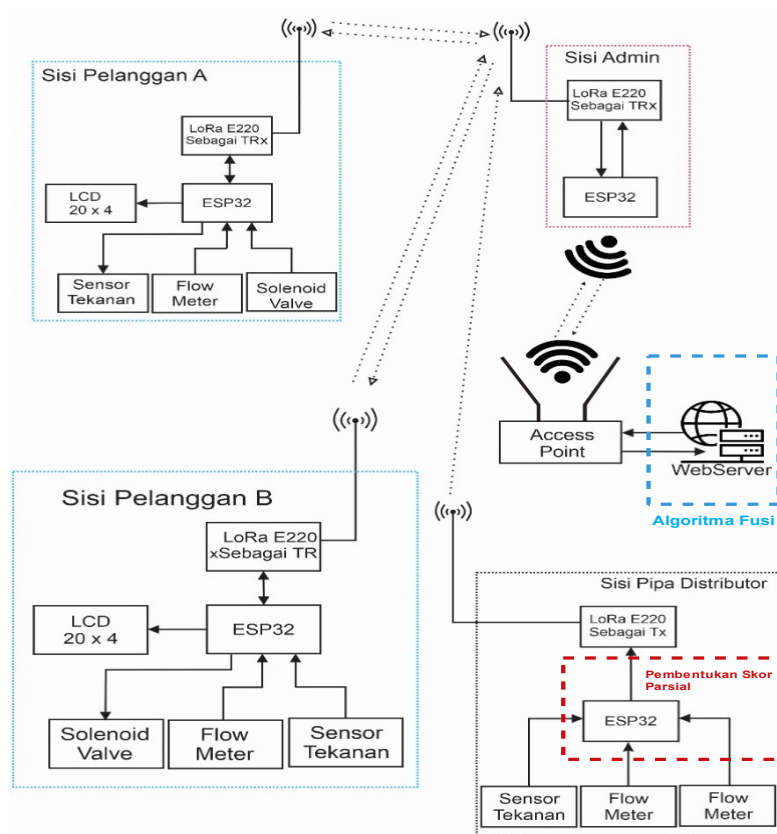
Gambar 1 memperlihatkan tahapan algoritma fusi; proses deteksi kebocoran dimulai dari akuisisi data sensor. Sistem membaca debit dari *flowmeter* dan tekanan dari *pressure transmitter* setiap detik dengan *timestamp* tersinkron. Data kemudian diseragamkan satuannya—misalnya liter per detik (L/s) untuk debit dan bar untuk tekanan—sehingga dihasilkan rangkaian data mentah debit dan tekanan terhadap waktu. Tahap berikutnya adalah penyaringan menggunakan *exponential moving average (EMA)* guna mereduksi derau sensor dan menghaluskan sinyal, terutama saat terjadi lonjakan sesaat (misalnya pompa menyala/mati). Setelah sinyal halus diperoleh, sistem menghitung *rolling statistics*—rata-rata dan simpangan baku dalam jendela waktu (± 30 –60 detik). Rata-rata dipakai sebagai *baseline* dinamis, sedangkan simpangan baku mewakili variabilitas normal. Agar bisa dibandingkan secara konsisten, sinyal melalui tahap normalisasi (mis. *z-score* atau *min-max scaling*) sehingga debit, tekanan, dan tren perubahan dianalisis seimbang tanpa bias satuan.

Berikutnya dilakukan pemberian skor anomali (*anomaly scoring*). Skor debit meningkat bila terdapat perbedaan signifikan antara debit masuk (hulu) dan akumulasi di sisi pelanggan (indikasi kehilangan volume). Skor tekanan meningkat bila terjadi penurunan tekanan dibanding *baseline*. Skor tren (opsional) mempertajam deteksi terhadap perubahan mendadak atau berkelanjutan. Keluaran tahap ini berupa skor parsial untuk debit, tekanan, dan tren pada skala 0 (normal) hingga 1 (sangat menyimpang). Arsitektur eksekusi. Seluruh praproses sinyal—*filtering EMA*, *rolling stats*, dan normalisasi—serta pembentukan skor parsial dijalankan di node/edge ESP32 pada sisi Distributor dan masing-masing pelanggan. Fusi sensor (*score fusion*)—yakni penggabungan skor debit/tekanan/tren menjadi skor gabungan S—serta state machine keputusan dieksekusi di sisi server (backend *web server*) setelah server menerima paket data dari semua node; pendekatan ini dipilih karena membutuhkan agregasi hulu-hilir secara bersamaan. Node tetap memiliki failsafe lokal (misalnya menutup katup bila terjadi penurunan tekanan ΔP yang ekstrem). Untuk pengambilan keputusan, skor gabungan S yang dihitung di server diproses oleh *state machine* bertingkat. Jika S masih rendah/berfluktuasi, status normal dipertahankan. Bila S melampaui ambang bawah secara berkelanjutan (≥ 15 –30 detik), status menjadi

mencurigakan dan sistem memberi peringatan dini. Jika *S* melewati ambang atas secara berkelanjutan (sekitar ≥ 20 detik), status naik ke terindikasi kebocoran dan siap dieksekusi tindakan. Untuk mencegah *chatter*, diterapkan clear time (30–60 detik) sebelum status turun kembali saat kondisi stabil. Tahap terakhir adalah alarm dan tindakan. Ketika status berubah menjadi *mencurigakan* atau *terindikasi*, server menampilkan badge peringatan di dashboard, membunyikan alarm, dan mengirim *event* ke *web server*. Jika kebocoran terindikasi, aksi lapangan (misalnya perintah penutupan katup solenoid) dipicu dari server dan dikirim kembali ke node; opsi *override* manual tetap tersedia untuk keselamatan atau pemeliharaan. Seluruh peristiwa dicatat dalam *event log* sebagai jejak audit.

2.2 Perancangan Sistem

Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengoptimasi sistem deteksi kebocoran pipa real-time dengan fusi data dari flowmeter dan pressure transmitter, serta transmisi data nirkabel menggunakan modul LoRa Ebyte E220-400T22D. Sistem terbagi menjadi tiga domain: (1) Sisi Pipa Distributor, (2) Sisi Pelanggan, dan (3) Sisi Admin/Server. Arsitektur dari sistem yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Arsitektur dari sistem yang diusulkan

Gambar 2, menunjukkan tiga domain utama: Sisi Pipa Distributor (kanan bawah), Sisi Pelanggan A/B (kiri), dan Back-end melalui *access point* menuju *web server* (kanan). Komunikasi jarak jauh antar node menggunakan LoRa E220; antarmuka ke server menggunakan Wi-Fi melalui *access point*.

(1) Sisi Pipa Distributor (Praproses & Skor Parsial)

Node berbasis ESP32 membaca sensor tekanan dan flowmeter hulu. Di node ini dilakukan praproses: *filtering exponential moving average (EMA)*, *rolling statistics* (rata-rata & simpangan baku), normalisasi, lalu pembentukan skor parsial (debit/tekanan). Paket data + skor parsial dikirim via LoRa (Tx) ke sisi admin/server.

(2) Sisi Pelanggan A dan B (Akuisisi & Kontrol Lokal)

Masing-masing pelanggan memiliki ESP32 yang membaca flowmeter dan sensor tekanan, menampilkan informasi di LCD 20x4, serta mengendalikan katup solenoid. Di node pelanggan juga dilakukan praproses dan skor parsial seperti di distributor. Data dan skor dikirim via LoRa (TRx). Node menyediakan failsafe lokal (mis. menutup katup bila terjadi penurunan tekanan ΔP yang ekstrem atau perintah server terputus).

(3) Sisi Admin (Gateway LoRa)

Modul LoRa E220 pada sisi admin menerima paket dari semua node (Distributor dan Pelanggan A/B) lalu meneruskan ke jaringan Wi-Fi melalui *access point* untuk dikirim ke *web server*.

(4) *Back-end Web Server* (Algoritma Fusi & Keputusan)

Di *web server* (kotak biru “Algoritma Fusi”) dilakukan fusi sensor (*score fusion*) dengan menggabungkan skor parsial dari hulu dan seluruh pelanggan (agregasi multi-node), menghasilkan skor gabungan S. Selanjutnya state machine keputusan menetapkan status normal → mencurigakan → terindikasi kebocoran dengan ambang dan *holding/clear time*. Saat status “terindikasi”, server memicu tindakan: mengirim perintah tutup katup ke node pelanggan terkait, menampilkan peringatan di dashboard, dan mencatat *event* ke *event log*.

(5) Jalur data & kontrol

- *Uplink* (data): Sensor → praproses/parsial di ESP32 → LoRa → gateway/admin → Wi-Fi → *web server*.
- *Downlink* (kontrol): *Web server* → Wi-Fi → gateway/admin → LoRa → node pelanggan → katup solenoid.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil implementasi sistem ditunjukkan pada Gambar 3.

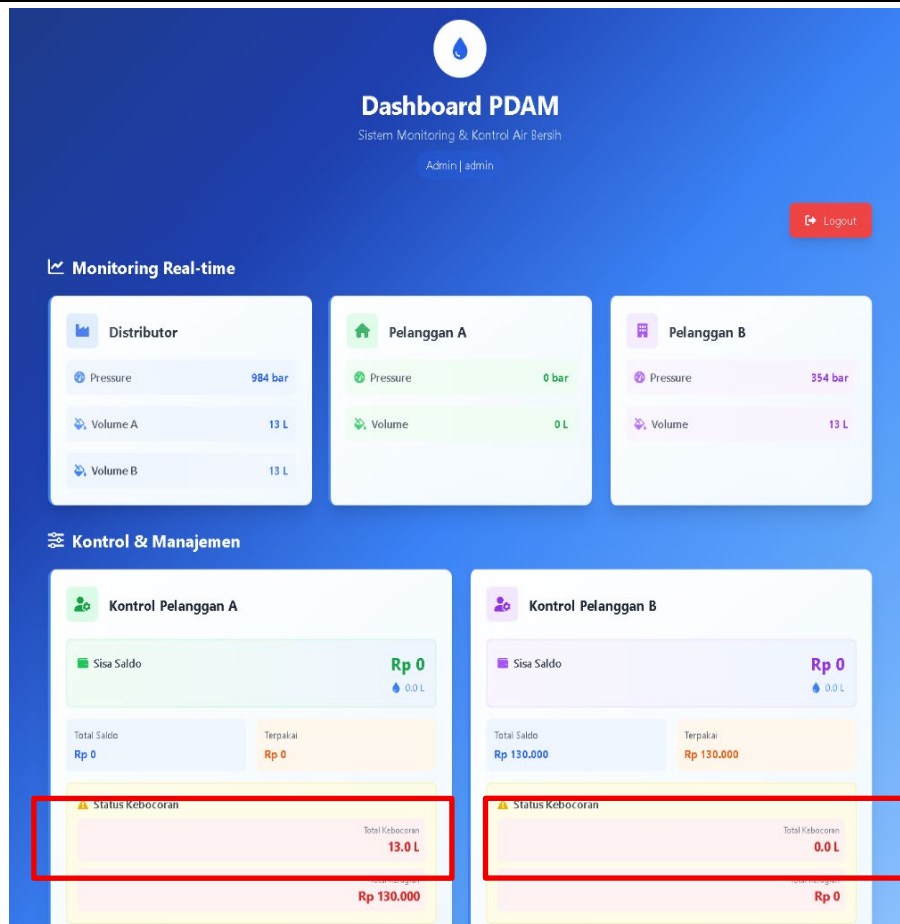


Gambar 3. Hasil Implementasi sistem

Berdasarkan Gambar 3, menunjukkan rancangan prototipe sistem deteksi kebocoran pipa berbasis sensor aliran (*flowmeter*) dan sensor tekanan yang diintegrasikan dengan modul komunikasi LoRa Ebyte E220-400T22D. Prototipe ini terdiri atas dua jalur pipa uji berbahan PVC yang dilengkapi sensor, mikrokontroler, modul LoRa, serta layar LCD sebagai penampil lokal. Setiap jalur pipa dikonfigurasi untuk mensimulasikan kondisi normal maupun kebocoran dengan cara membuka katup buangan tertentu. Sistem dilengkapi dengan unit catu daya portabel dan antena LoRa untuk memastikan transmisi data secara *real-time* ke *web server* sebagai pemantauan kondisi dari aliran air dalam pipa distribusi. Dari hasil instalasi ini dapat diamati bahwa sistem mampu bekerja pada kondisi lapangan dengan tata letak yang sederhana namun representatif, sehingga validasi performa algoritma deteksi dapat dilakukan secara langsung melalui skenario uji kebocoran. Tampilan halaman *web server* ditunjukkan pada Gambar 4.

Gambar 4 memperlihatkan dashboard *web server* yang digunakan untuk monitoring dan kontrol distribusi air bersih. Pada panel *Monitoring real-time*, sistem menampilkan tekanan dan volume di sisi Distributor (hulu) serta di tiap Pelanggan A/B (hilir). Angka yang ditampilkan adalah pembacaan terkini berikut akumulasi pemakaian, sehingga operator dapat melihat perbedaan hulu–hilir secara langsung. Panel *Kontrol & Manajemen* melengkapi informasi tersebut dengan saldo pemakaian dan status kebocoran per pelanggan. Indikator status disajikan sebagai *badge* berwarna (misalnya: hijau = normal, kuning = mencurigakan, merah = terindikasi kebocoran) agar keputusan operasional bisa diambil cepat.

Mekanisme deteksinya bekerja seperti ini: sistem terus membandingkan volume yang tercatat di hulu dengan total volume di sisi pelanggan. Jika terdapat defisit volume (volume hulu lebih besar daripada akumulasi hilir) yang melampaui batas toleransi selama durasi minimum tertentu, status dinaikkan bertahap dari normal → mencurigakan → terindikasi kebocoran. Batas toleransi sudah memperhitungkan akurasi alat ukur (kelas akurasi *metering*) serta keterlambatan fisik pengisian pipa (*pipeline storage*)—jadi selisih kecil yang wajar tidak langsung memicu alarm. Untuk mencegah *false alarm* akibat lonjakan sesaat, sistem menggunakan penyaringan waktu dan *holding time* (misalnya puluhan detik) sebelum mengubah status. Sebaliknya, ketika selisih kembali berada di bawah toleransi secara konsisten, status otomatis turun kembali.

Gambar 4. Tampilan halaman *webserver*

Begitu status mencapai terindikasi kebocoran, dashboard menampilkan peringatan pada kartu pelanggan terkait dan dapat memicu tindakan otomatis—misalnya perintah menutup katup (katup solenoid) pada pelanggan tersebut. Operator masih memiliki kendali manual melalui panel kontrol untuk *override* (membatalkan atau menunda) tindakan otomatis jika diperlukan, misalnya saat sedang ada pekerjaan pemeliharaan. Semua kejadian (perubahan status, perintah buka/tutup katup, dan catatan operator) dicatat di *event log* sehingga jejak audit dan analisis insiden bisa dilakukan di kemudian hari. Dengan alur ini, dashboard bukan hanya menampilkan data, tetapi juga mendukung keputusan lapangan yang cepat dan akuntabel.

3.1 Kalibrasi Sensor Flowmeter dan Pressure Transmitter

Kalibrasi dilakukan untuk memastikan akurasi sensor sebelum dilakukan implementasi. Adapun hasil kalibrasi ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Kalibrasi Sensor Flowmeter dan Pressure Transmitter

Sensor	Nilai Referensi	Nilai Sensor	Error (%)	Keterangan
Flowmeter (Q)	2,00 L/min	1,96 L/min	2,0 %	Dalam batas toleransi
Flowmeter (Q)	3,50 L/min	3,43 L/min	2,0 %	Dalam batas toleransi
Pressure Transmitter (P)	1,50 bar	1,47 bar	2,0 %	Dalam batas toleransi
Pressure Transmitter (P)	2,00 bar	1,96 bar	2,0 %	Dalam batas toleransi

Berdasarkan Tabel 1, menunjukkan bahwa sensor *flowmeter* dan sensor *pressure transmitter* memiliki rata-rata error $\pm 2\%$, yang masih dalam batas toleransi standar ($<5\%$).

3.2 Pengujian Sistem pada Kondisi Normal (Tanpa Kebocoran)

Hasil pengujian sistem pada kondisi tanpa ada kebocoran ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2, pada kondisi tanpa kebocoran, selisih debit dan tekanan antar node sangat kecil ($<1\%$), sehingga sistem mengklasifikasikan status sebagai Normal.

Tabel 2. Hasil pengujian sistem pada kondisi tanpa ada kebocoran

Node	Debit Air (L/min)	Tekanan (bar)	ΔQ (%)	ΔP (bar)	Status
Distributor	3,50	2,00	–	–	Normal
Pelanggan A	2,00	1,50	0,5 %	0,02	Normal
Pelanggan B	1,50	1,48	0,6 %	0,01	Normal

3.3 Pengujian Kebocoran pada Sisi Pelanggan

Hasil Pengujian kebocoran pada sisi pelanggan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian kebocoran pada sisi pelanggan

Diameter lubang kebocoran (mm)	ΔQ (%)	ΔP (bar)	Skor Fusi (S)	Status Sistem	Respon Solenoid Valve
0,0	0,0 %	0,00	0,15	Normal	Tetap terbuka
0,5	1,2 %	0,05	0,42	Mencurigakan	Tetap terbuka
1,0	2,5 %	0,10	0,72	Terindikasi Kebocoran	Menutup otomatis
2,0	4,8 %	0,15	0,83	Terindikasi Kebocoran	Menutup otomatis
3,0	7,2 %	0,21	0,91	Terindikasi Kebocoran	Menutup otomatis

Berdasarkan Tabel 3, menunjukkan hasil pengujian variasi kebocoran pada sisi pelanggan dengan ukuran diameter lubang yang berbeda. Pada kondisi diameter 0 mm, tidak terjadi perbedaan debit (ΔQ) maupun penurunan tekanan (ΔP), sehingga skor fusi sensor sangat rendah (0,15). Sistem menilai kondisi ini sebagai Normal dan solenoid valve tetap terbuka. Ketika dilakukan simulasi kebocoran kecil dengan diameter lubang kebocoran diatur 0,5 mm, nilai ΔQ naik menjadi 1,2% dan ΔP sebesar 0,05 bar, menghasilkan skor fusi 0,42. Nilai ini berada dalam kategori Mencurigakan, di mana sistem belum langsung menutup aliran, tetapi memberi tanda peringatan untuk pemantauan lebih lanjut. Selanjutnya, pada kebocoran lebih besar (diameter diatur 1,0 mm, 2,0 mm, dan 3,0 mm), perbedaan debit dan tekanan semakin signifikan dengan skor fusi di atas 0,7. Kondisi ini dikategorikan sebagai “Terindikasi Kebocoran”, sehingga sistem secara otomatis memicu aksi proteksi berupa penutupan solenoid valve.

3.4 Pengujian Komunikasi LoRa

Hasil pengujian komunikasi LoRa Ebyte E220-400T22D ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil komunikasi LoRa Ebyte E220-400T22D

Jarak (m)	RSSI (dBm)	PDR (%)	Latensi (ms)	Status Komunikasi
100	-55	100 %	40	Stabil
300	-70	98 %	52	Stabil
600	-85	94 %	75	Layak
800	-92	90 %	95	Layak
1000	-101	72 %	160	Tidak Stabil
1200	-108	35 %	300	Sering Hilang Data
1500	< -115	0 %	–	Tidak Diterima

Berdasarkan Tabel 5, menunjukkan bahwa komunikasi LoRa E220 bekerja optimal pada rentang 100–800 meter. Pada jarak 100 m hingga 300 m, komunikasi sangat stabil dengan RSSI antara -55 dBm hingga -70 dBm dan *Packet Delivery Ratio* (PDR) hampir 100%. Latensi juga rendah (40–52 ms), sehingga sangat layak digunakan untuk pemantauan secara real-time. Pada jarak 600–800 m, kualitas komunikasi mulai menurun, dengan RSSI sekitar -85 hingga -92 dBm dan PDR 90–94%. Walaupun demikian, sistem masih dapat bekerja dengan baik dalam kategori layak. Di atas jarak 800 m, kinerja LoRa menurun signifikan. Pada jarak 1000 m, PDR turun menjadi 72% dengan latensi meningkat hingga 160 ms, sehingga komunikasi tergolong tidak stabil. Pada jarak 1200 m, hanya 35% data yang berhasil diterima, sementara pada jarak 1500 m komunikasi benar-benar gagal (tidak diterima).

Dengan hasil ini, jarak ideal penggunaan LoRa E220 untuk penelitian adalah pada rentang 100–800 meter, karena masih menjamin stabilitas komunikasi, keandalan data, dan latensi rendah. Di atas jarak tersebut, kualitas komunikasi menurun tajam sehingga kurang layak digunakan.

4. KESIMPULAN

Sistem deteksi kebocoran pipa berbasis *flowmeter* (debit) dan *pressure transmitter* (tekanan) yang diintegrasikan dengan modul komunikasi LoRa Ebyte E220-400T22D berhasil dibangun dan diuji. Prototipe

Optimasi sistem deteksi kebocoran pipa distribusi air bersih secara real-time menggunakan LoRa Ebyte E220-400T22D dan visualisasi webserver (Isa Mahfudi)

yang terdiri atas pipa uji PVC, *flowmeter*, *pressure transmitter*, ESP32, modul LoRa, serta katup solenoid bekerja secara *real-time* dengan dukungan dashboard berbasis *web*. Hasil kalibrasi sensor menunjukkan akurasi yang baik dengan rata-rata galat $\pm 2\%$, masih dalam batas toleransi standar ($< 5\%$), sehingga layak untuk deteksi kebocoran. Pada kondisi tanpa kebocoran, selisih debit dan tekanan sangat kecil ($< 1\%$) sehingga sistem mengklasifikasikan status sebagai Normal. Pada skenario kebocoran sisi pelanggan, sistem membedakan tiga kategori: Normal, Mencurigakan, dan Terindikasi Kebocoran. Kebocoran kecil berdiameter 0,5 mm menghasilkan status Mencurigakan tanpa menutup katup, sedangkan kebocoran $\geq 1,0$ mm terdeteksi sebagai Terindikasi Kebocoran yang memicu penutupan katup secara otomatis. Uji komunikasi LoRa menunjukkan jarak operasi ideal 100–800 m dengan kualitas stabil (RSSI -55 hingga -92 dBm, *packet delivery ratio* (PDR) $\geq 90\%$, latensi ≤ 100 ms). Di atas 800 m, kualitas menurun signifikan hingga data tidak lagi diterima pada 1.500 m. Secara keseluruhan, sistem terbukti efektif mendeteksi kebocoran dan mengirim data ke *web server* secara *real-time* dengan jangkauan komunikasi yang andal hingga 800 m, sehingga berpotensi menjadi solusi praktis dan efisien untuk pemantauan distribusi air bersih berbasis *Internet of Things* (IoT).

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. M. Danial, D. R. Djati, A. Supriyadi, and R. M. Rustamadji, "Perhitungan Kebutuhan Air Baku dan Rekomendasi Pengolahan Air Rusunawa UNTAN," J. Pengabdian, vol. 6, no. 2, p. 147, 2023.
- [2] A. Romdloni, A. Ahyar, and E. S. Soedjono, "studi kehilangan air fisik dan kehilangan air komersial (studi kasus pdam kota malang)," Syntax Lit. J. Ilm. Indones. p-ISSN, vol. 6, no. 2, 2021.
- [3] D. W. Herdiyanto, F. M. Alfian, C. S. Sarwono, D. Setiabudi, A. C. Eska, and M. A. Laagu, "Prototipe Deteksi Letak Kebocoran Pipa dengan Optimalisasi Kinerja Penerimaan Paket LoRa menggunakan Pengkodean Parameter Fisik," J. Appl. Comput. Sci. Technol., vol. 5, no. 1, pp. 40–49, 2024.
- [4] H. N. Santosa and W. Sulistyono, "Model sensor pressure transmitter berbasis internet of things untuk mendeteksi kebocoran pipa air," JIPI (Jurnal Ilm. Penelit. dan Pembelajaran Inform.), vol. 10, no. 3, 2025.
- [5] R. Irsyada and H. Audytra, "Deteksi Kebocoran Pipa Pdam Menggunakan Model Perancangan Pencarian Rute Terpendek Dengan Algoritma Dijkstra," J. Simantec, vol. 10, no. 1, pp. 17–24, 2021.
- [6] S. M. Andini, A. Harjanto, N. R. Alham, and H. Nugroho, "Prototype Design and Implementation of Water Distribution Pipeline Leak Detection based on the Internet of Things (IoT)," in Proceedings of the International Conference on Tropical Studies and Its Application (ICTROPS 2024), Advances in Engineering Research, 2025, no. Ictrops 2024, pp. 25–36.
- [7] E. F. Khairullah, A. M. Alghamdi, M. M. Al Mojamed, and S. Zeadally, "LoRaWAN-based smart water management IoT applications: a review," J. Inf. Telecommun., vol. 1839, pp. 420–446, 2025.
- [8] O. A. Agbolade, S. A. Oyetunji, and J. O. Babatola, "LoRaWAN-based Petroleum Pipeline Leakage Detection System Using Pressure Profile under a Pump Proximity Effect Condition," Saudi J. Eng. Technol., vol. 8, no. 08, pp. 209–218, 2023.
- [9] B. R. C. Andhini and A. B. Primawan, "Analysis of Water-Flow Sensor Network Performance on IoT-based Water Pipe Leakage Detection Prototype," Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro UIN Sunan Gunung Djati Bandung, no. November 2022, pp. 85–97, 2022.
- [10] O. Agbolade, O. Olanrewaju, S. Oyetunji, and J. Babatola, "A LoRaWAN-based IoT System for Leakage Detection in Pipelines," Eur. J. Eng. Technol. Res., vol. 8, no. 5, pp. 36–42, 2023.
- [11] S. Harahap and A. Setia Budi, "Sistem Pendeteksi Kebocoran Air Pada Saluran Air Rumah Berbasis Iot Menggunakan Metode K-NN," J. Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput., vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2017.
- [12] A. Bele, S. Fulawade, R. Chaudhari, and K. Dere, "Smart Water Flow And Pipeline Leakage Detection Using Iot And Arduino Uno," Int. J. Res. Publ. Rev., no. 6, pp. 5219–5222, 2025.
- [13] A. Razaqqi et al., "Pendeteksian Kebocoran pada Jaringan Pipa Berbasis Internet of Things (IoT) dengan Notifikasi dan Lokalisasi Sumber Kebocoran," Router J. Tek. Inform. dan Terap., vol. 3, no. 2, 2025.
- [14] A. M. Alghamdi, E. F. Khairullah, and M. M. Al Mojamed, "LoRaWAN Performance Analysis for a Water Monitoring and Leakage Detection System in a Housing Complex," Sensors, vol. 22, no. 19, pp. 1–15, 2022.
- [15] Hudiono, M. Taufik, R. H. Y. Perdana, and A. E. Rakhmania, "Digital centralized water meter using 433 mhz lora," Bull. Electr. Eng. Informatics, vol. 10, no. 4, pp. 2062–2071, 2021.
- [16] D. L. Hall and J. Llinas, "An introduction to multisensor data fusion," Proc. IEEE, vol. 85, no. 1, pp. 6–23, 1997.
- [17] B. Khaleghi, A. Khamis, F. O. Karray, and S. N. Razavi, "Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art," Inf. Fusion, vol. 14, no. 1, pp. 28–44, 2013.
- [18] F. Castanedo, "A review of data fusion techniques," Sci. World J., vol. 2013, 2013.
- [19] R. Rachman, "Penerapan Metode Moving Average Dan Exponential Smoothing Pada Peramalan Produksi Industri Garment," J. Inform., vol. 5, no. 2, pp. 211–220, 2018.