

Sistem Deteksi Lokasi Kebocoran Pipa Distribusi Air Menggunakan Analisis Pola Aliran Multi-Node Berbasis Protokol MQTT

Diky Zakaria¹, Mahmudah Salwa Gianti¹, Hanif Aidil Rachman², Muhamad Rifai Ayatulloh³,
Farah Aulia Kirana⁴, Aulia Aufa Zahron⁵

[Submission: 06-01-2026, Accepted: 23-02-2026]

Abstract— This preliminary study presents a prototype of an *Internet of Things* (IoT)-based leak detection system for water distribution pipelines. Water loss in conventional networks can reach 20–50% due to delayed response. This research aims to design a prototype that monitors *flow rate* patterns from multiple pipeline points to identify leak locations based on deviations from normal flow. The system integrates ESP32 microcontrollers and *flow sensors* across four *nodes*, transmitting data in *real-time* to a PHP-based graphical interface via the MQTT protocol. Controlled experiments were conducted using a small-scale prototype with two simulated leak points. Unlike conventional systems that solely rely on *monitoring*, this architecture implements a *closed-loop control* mechanism for automated mitigation. Test results show the system successfully localized leaks with a 100% success rate across 13 simulated scenarios without any *false positives*. Hydraulic anomalies, characterized by increased flow at the sensor before the leak point (due to pump compensation) and a drastic flow reduction at the sensor after the leak point, proved to be effective localization parameters. Communication system evaluation recorded data transmission operating with <1-second latency and 0% *data loss*. Furthermore, the automated mechanism successfully executed the pump shutdown command (*relay off*) within 1-2 seconds after a leak was detected. These results confirm the reliability of the proposed architecture in rapidly minimizing water loss. Future research will focus on field testing, sensor optimization, and the development of predictive models.

Intisari— Studi pendahuluan ini menyajikan prototipe sistem deteksi kebocoran pada saluran distribusi air berbasis *Internet of Things* (IoT). Kehilangan air pada jaringan konvensional dapat mencapai 20–50% akibat keterlambatan penanganan. Penelitian ini bertujuan merancang prototipe pemantau pola laju aliran (*flow rate*) dari beberapa titik pipa guna mengidentifikasi lokasi kebocoran berdasarkan penyimpangan aliran normal. Sistem mengintegrasikan ESP32 dan *flow sensor* pada empat *node*, yang mengirimkan data secara *real-time* ke antarmuka grafis PHP melalui protokol MQTT. Eksperimen terkontrol dilakukan menggunakan purwarupa berskala kecil dengan dua titik simulasi. Berbeda dengan sistem konvensional yang hanya bersifat *monitoring*, arsitektur ini menerapkan mekanisme *closed-loop control* untuk mitigasi otomatis. Hasil pengujian menunjukkan sistem berhasil melokalisasi kebocoran dengan tingkat keberhasilan penuh pada 13 skenario simulasi tanpa *false positive*. Anomali hidrolik berupa peningkatan debit pada sensor sebelum

titik kebocoran (akibat kompensasi pompa) dan penurunan drastis debit pada sensor setelah titik kebocoran menjadi parameter pelokalan yang efektif. Evaluasi sistem komunikasi mencatat transmisi data beroperasi dengan latensi <1 detik dan 0% *data loss*. Selain itu, mekanisme otomatisasi terbukti mampu mengeksekusi pemutusan pompa (*relay off*) dalam waktu 1-2 detik setelah kebocoran terdeteksi. Hasil ini mengonfirmasi keandalan arsitektur yang diusulkan untuk meminimalkan kehilangan air secara cepat. Penelitian lanjutan akan difokuskan pada pengujian lapangan, optimasi sensor, dan pengembangan model prediktif.

Kata Kunci— Leak detection; IoT; flow sensor; ESP32; MQTT; water distribution; pipeline monitoring.

I. PENDAHULUAN

Sustainable Development Goals (SDGs) poin 6 adalah tentang *Clean Water and Sanitation* yang bertujuan untuk memastikan ketersediaan dan keberlanjutan manajemen air dan sanitasi untuk semua. Berdasarkan data *United Nation* tahun 2022 pada gambar 1 [1], miliaran orang mengalami kekurangan air minum, sanitasi dan fasilitas kebersihan yang tidak layak. Hal ini menjadi sebuah ironi karena air dan sanitasi menjadi elemen penting dalam pembangunan berkelanjutan. Dengan adanya air dan sanitasi yang baik dapat berkontribusi pada pencapaian tujuan poin SDGs lainnya seperti pengentasan kemiskinan, peningkatan ekonomi, serta pelestarian lingkungan [2].



Gambar 1: SDGs goals report untuk poin 6 [2].

Salah satu poin dalam Prioritas Riset Nasional (PRN) tahun 2020-2024 yang sejalan dengan SDGs poin 6 adalah kesehatan

p-ISSN:1693 – 2951; e-ISSN: 2503-2372

^{1,2,3,4,5} Program Studi Mekatronika dan Kecerdasan Buatan,
Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia; email:
dikyzak@upi.edu, msg.salwa@upi.edu,
hanifrahman3012@upi.edu, farahaul@upi.edu,
m.rifaiayyat@upi.edu, aufazahron@upi.edu



[3]. Air merupakan sumber daya terpenting untuk keberlangsungan kehidupan dan kesehatan manusia [4]. Hal ini kemudian diadaptasi dalam Rencana Induk Penelitian UPI tahun 2021-2025 yang fokusnya merujuk pada PRN 2020-2024. Salah satu hal yang menjadi urgen untuk diteliti adalah tentang pengelolaan air bersih bagi masyarakat.

Ketersediaan air bersih untuk konsumsi dan sanitasi biasanya diperoleh dari sumur mandiri yang dibuat oleh masyarakat. Jika di lokasi tersebut tidak memiliki cadangan air yang memadai, maka masyarakat perlu membeli pada penyedia air. Penyediaan air bersih di Indonesia ditugaskan pada Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) yang kemudian melalui jaringan pipa terdistribusi, air bersih hasil pengolahan dari sumber mata air dialirkan ke rumah-rumah warga [5]. Dalam prosesnya distribusi tersebut tidak jarang terjadi kendala-kendala besar yang menyebabkan pasokan air terganggu seperti kualitas air yang di bawah standar dan kebocoran pipa distribusi.

Berdasarkan data penelitian El-Zahab and Zayed [4], secara periodik terjadi kebocoran rata-rata 20-30% air yang didistribusikan melalui pipa. Bahkan jumlah tersebut dapat meningkat sampai 50% untuk sistem distribusi air konvensional. Di Indonesia, pada 2022 berdasarkan data Badan Pengawas Keuangan dan Pembangunan (BPKP) mencatat jumlah kehilangan air di Indonesia rata-rata sebanyak 3% dari total produksi air minum nasional sebesar 127.000 liter/detik [6]. Pada 2023, PAM Jaya melaporkan tingkat kebocoran pipa air di DKI Jakarta mencapai 46,67%, yang menyebabkan kerugian ditaksir mencapai Rp2,5 triliun [7]. Terbaru pada Desember 2024, terjadi kebocoran pada saluran pipa induk PDAM Tirtawening Kota Bandung, yang berdampak pada sekitar 40 ribu pelanggan sehingga PDAM Tirtawening harus menyiapkan truk air bersih untuk memenuhi kebutuhan air masyarakat yang terdampak [8]. Mengacu pada permasalahan tersebut, penelitian ini mengambil studi kasus kondisi distribusi air di Kabupaten Purwakarta. Pemilihan lokasi ini didasari oleh observasi faktual di lingkungan domisili penulis, di mana kebocoran pipa distribusi PDAM kerap menyebabkan terhentinya suplai air ke rumah warga. Proses deteksi titik kebocoran di lapangan pun memerlukan waktu lama karena petugas harus menelusuri jalur pipa secara manual dari *reservoir* menuju ke perumahan yang melaporkan gangguan pasokan. Gambar 2 memperlihatkan dokumentasi kebocoran pipa di lingkungan penulis yang mengakibatkan *downtime* layanan hingga 3 hari.



Gambar 2: Kebocoran pipa air yang terjadi di lingkungan perumahan penulis.

Secara skala makro, Kabupaten Purwakarta memiliki luas wilayah sekitar 971,72 km². Berdasarkan data Perumda Air

Minum (PDAM) Gapura Tirta Rahayu, perusahaan melayani lebih dari 23.000 pelanggan aktif yang tersebar di berbagai kecamatan. Dengan luasnya cakupan jaringan pipa distribusi tersebut, metode konvensional seperti penelusuran manual jelas tidak efisien dan sangat merugikan pelanggan. Implementasi sistem deteksi otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) pada jaringan PDAM skala kota memang memiliki tantangan investasi. Sebagai analisis kualitatif, jika diasumsikan panjang jalur pipa utama mencapai ratusan kilometer, maka pemantauan ideal membutuhkan ratusan hingga ribuan titik sensor (dengan asumsi pemasangan node tiap 500 meter). Besarnya biaya pengadaan perangkat keras (*hardware*), pemeliharaan *server*, dan catu daya menjadi kendala utama adopsi teknologi ini. Namun, jika dikomparasikan dengan rasio kehilangan air (*Non-Revenue Water*) yang terus terjadi serta kerugian akibat lambatnya penanganan, investasi sistem IoT ini secara jangka panjang sangat krusial.

Berdasarkan latar belakang tersebut, masalah utama dalam penelitian ini adalah bagaimana merancang sebuah prototipe sistem berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu mengidentifikasi lokasi kebocoran pipa distribusi secara akurat berdasarkan anomali pola laju aliran air (*flow rate*), sekaligus memitigasi kerugian material melalui mekanisme pemutusan otomatis pada pompa pendorong.

II. STUDI PUSTAKA

Evolusi penelitian dalam deteksi kebocoran pipa air sejak tahun 1985 sampai sekarang telah beralih dari metode manual tradisional ke pendekatan teknologi canggih [4], [9]–[15]. Pada tahun 2025, Al-ammari et al telah melakukan review tentang digital twin untuk deteksi kebocoran pada pipa gas [16] yang secara teknologi memiliki sedikit kemiripan untuk deteksi kebocoran pipa air. Awalnya, deteksi kebocoran mengandalkan inspeksi manual dan pemantauan tanda-tanda kebocoran yang terlihat, seperti genangan air permukaan atau penurunan tekanan air yang nyata. Meskipun mudah, metode ini membutuhkan banyak tenaga kerja dan sering kali tidak efektif untuk mendeteksi kebocoran tersembunyi [15]. Ismail et al [9] mereview deteksi kebocoran berdasarkan metode deteksi getaran, hasil menunjukkan akurasi yang tinggi namun rentan terhadap getaran yang terjadi di lingkungan sekitar dan biaya yg tinggi. Yussof et al [17] dan Korlapati et al [18] mereview bahwa deteksi kebocoran terdiri dari 2 tipe yaitu berdasarkan *hardware* (sensor) dan *software* (prediksi kebocoran berbasis kecerdasan buatan). Siregar et al [19] melakukan deteksi kebocoran air pada pipa irigasi kelapa sawit berbasis IoT. Deteksi dilakukan dengan menggunakan flow sensor dan keberhasilan deteksi mencapai 94,41%.

Tampubolon et al [20] melakukan deteksi kebocoran pipa menggunakan sensor kelembaban dan *flow sensor* berbasis algoritma *fuzzy* dan memberikan notifikasi telegram saat terdeteksi kebocoran pipa. Terakhir pada tahun 2024, Harahap et al [5] melakukan deteksi kebocoran pipa dengan *flow sensor* berbasis IoT dan menggunakan algoritma K-NN untuk memprediksi lokasi kebocoran pipa air rumah tangga. Hasil riset yang telah dilakukan hanya berfokus pada deteksi kebocoran dan pengiriman informasi melalui IoT atau tampilan pada LCD. Namun, sistem tidak melakukan tindakan otomatis untuk mengurangi dampak dari kebocoran misalnya mematikan pompa pendorong. Dari *literature review* yang telah

dilakukan diperoleh data bahwa mayoritas sensor yang digunakan adalah *flow sensor*, sensor kelembaban dan sensor tekanan.

III. METODOLOGI

Metodologi pada penelitian ini mengacu pada gambar 3.



Gambar 3. Metodologi penelitian yang dilakukan.

Sistem yang diusulkan dalam penelitian ini terdiri dari tiga blok arsitektur utama: (1) Blok *hardware* berupa *node* sensor yang mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dan *water flow sensor*; (2) Blok komunikasi data menggunakan protokol MQTT melalui *broker* pihak ketiga (*shiftr.io*) untuk memastikan latensi pengiriman yang rendah; dan (3) Blok antarmuka pengguna (*dashboard* GUI) berbasis PHP untuk pemantauan *real-time* dan perekaman log riwayat. Keseluruhan sistem ini bekerja dalam mekanisme *closed-loop*, di mana sistem tidak hanya membaca data, tetapi juga memberikan umpan balik berupa aksi aktuasi *relay* mati/hidup.

Dalam implementasinya, penelitian ini mengadopsi pendekatan pengembangan sistem berbasis eksperimen dengan empat tahapan utama. Tahap pertama merupakan fase studi pendahuluan. Pada tahap ini dilakukan identifikasi alat dan bahan yang diperlukan dalam pengembangan sistem. Selain itu, dirancang pula skenario uji coba untuk mengukur akurasi deteksi titik kebocoran pipa air beserta sistem kendalinya. Skenario menetapkan bahwa jika deteksi kebocoran berhasil diidentifikasi, maka sistem harus mampu melakukan aksi mematikan pompa penyuplai (*supply*) air.

Tahap kedua berfokus pada investigasi dan perancangan. Proses ini diawali dengan investigasi desain yang efisien untuk deteksi kebocoran pipa air dan pengendaliannya melalui tinjauan literatur (*literature review*). Setelah fondasi teoretis didapatkan, tahapan dilanjutkan dengan membuat desain 3D prototipe sistem deteksi kebocoran pipa air distribusi, yang kemudian diwujudkan dengan membangun fisik prototipe tersebut.

Tahap ketiga merupakan fase pengembangan antarmuka pengguna grafis (*Graphical User Interface/GUI*) yang informatif. Fitur GUI dirancang spesifik untuk menampilkan laju aliran (*flow rate*) air dari tiap titik sensor (total 4 titik) secara *real-time*, dilengkapi dengan kendali *on/off*, serta indikator status kebocoran.

Diky Zakaria: Rancangan Awal Sistem Deteksi...

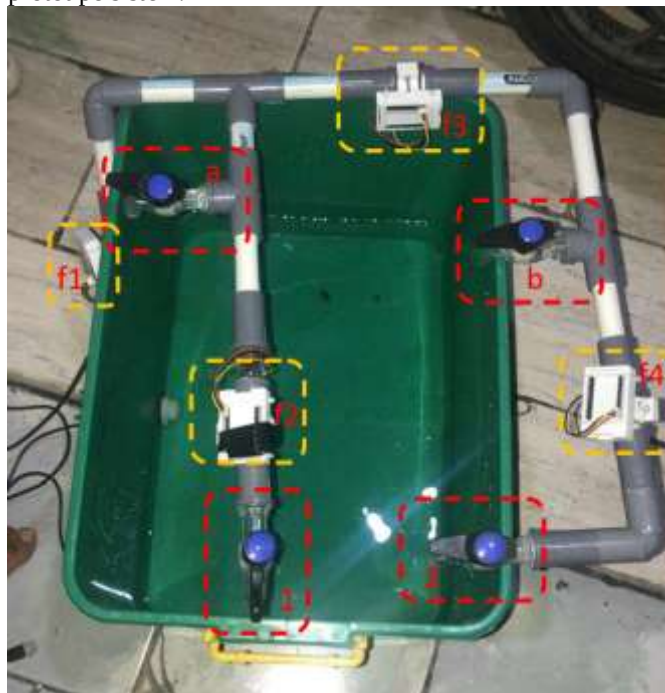
Tahap keempat adalah integrasi sistem perangkat keras dengan GUI yang telah dikembangkan. Pada tahap ini dilakukan perancangan komprehensif terhadap berbagai skenario pengujian sistem. Evaluasi kinerja sistem difokuskan pada kemampuan deteksi dan pengendalian kebocoran air secara otomatis.

Metode yang digunakan untuk pengujian sistem adalah eksperimen fungsional terkontrol menggunakan prototipe berskala kecil. Pengujian dilakukan dengan menyimulasikan berbagai skenario operasional, mulai dari kondisi pipa normal hingga kondisi bocor di titik-titik tertentu (diatur melalui bukaan katup/keran simulasi). Evaluasi kinerja sistem difokuskan pada validasi dua parameter utama: akurasi pembacaan penyimpangan *flow rate* untuk melokalisasi titik kebocoran, dan kecepatan respons aktuator (pemutusan arus pompa air otomatis) sesaat setelah status kebocoran dikonfirmasi oleh sistem.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perancangan Prototipe

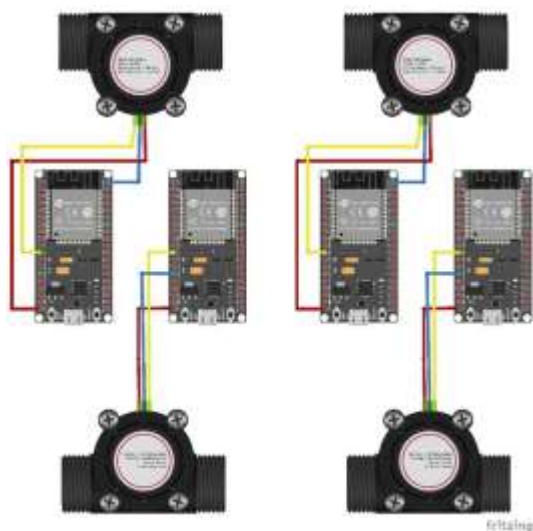
Tahap pertama yang dilakukan adalah perancangan prototipe sistem deteksi kebocoran pipa. Gambar 4 menunjukkan prototipe sistem.



Gambar 4: Prototipe sistem deteksi kebocoran air.

Berdasarkan gambar 4, keran a dan b adalah 2 titik untuk simulasi kebocoran. Asumsinya, jika keran a dan/atau b terbuka, maka telah terjadi kebocoran pipa. Selanjutnya, keran 1 dan 2 adalah keran untuk distribusi air ke konsumen. Modul yang ditandai garis kuning (f1-f4) adalah modul yang di dalamnya masing-masing terdiri dari ESP32 dan *flow sensor* dengan konfigurasi seperti gambar 5. Sistem ini berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan platform MQTT *shiftr.io*.





Gambar 5: Konfigurasi ESP32 dan flow sensor.

Berdasarkan gambar 5, masing-masing mikrokontroler akan merekam data aliran air dari *flow sensor*. Data tersebut nantinya ditampilkan pada *graphical user interface* yang telah dibangun. Hal ini untuk memudahkan proses monitoring dan mengetahui titik kebocoran. Dalam pipa distribusi *real* di lapangan, pemasangan modul ESP32 dan *flow sensor* dapat dilakukan secara berkala misal setiap 500 meter. Hal ini nantinya, jika terjadi kebocoran, sistem dapat memberikan informasi titik perubahan debit aliran air dan bisa langsung mematikan sistem pompa.

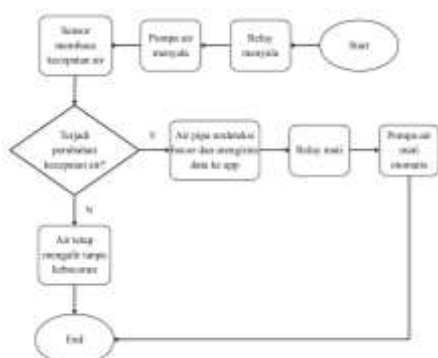
B. Perancangan Graphical User Interface (GUI)

GUI yang dirancang berbasis PHP. Gambar 6 menunjukkan GUI yang telah dirancang.



Gambar 6. GUI yang telah dirancang.

Berdasarkan gambar 6, fitur yang tersedia adalah monitoring *flow rate* tiap titik sensor, status kebocoran dan



Gambar 8. Flowchart deteksi kebocoran air.

status pompa kontrol utama. Selain itu, GUI (dashboard) ini dilengkapi dengan fitur *history* kebocoran seperti yang ditunjukkan pada gambar 7. Fitur ini nantinya bisa menjadi data yang dapat dianalisis terkait titik mana yang sering mengalami kebocoran.



Gambar 7: Fitur history kebocoran.

C. Implementasi Arsitektur Komunikasi IoT

Komunikasi *end-to-end* antara perangkat keras dan dashboard diimplementasikan menggunakan arsitektur *Internet of Things* (IoT) dengan protokol MQTT sebagai tulang punggungnya. Di sisi perangkat keras, setiap modul sensor yang berbasis ESP32 diprogram menggunakan Arduino IDE. ESP32 ini dikonfigurasi dengan kredensial Wi-Fi lokal serta detail koneksi broker MQTT (*server*, *username*, dan *password*) yang diperoleh dari platform *shiftr.io*. Setelah membaca data dari *flow sensor*, ESP32 memublikasikan nilai aliran (L/min) ke topik spesifik di broker *shiftr.io* secara *real-time*. Sebagai perantara komunikasi, *shiftr.io* berfungsi sebagai broker MQTT yang menangani distribusi pesan secara efisien. Di sisi penerima, dashboard yang dikembangkan dengan PHP dijalankan pada server web lokal XAMPP. Dashboard ini berlangganan (*subscribe*) ke seluruh topik data sensor pada broker *shiftr.io*, memungkinkannya untuk menerima dan memproses data dari semua modul ESP32. Arsitektur ini memisahkan fungsi dengan jelas: Arduino IDE untuk pemrograman perangkat keras, *shiftr.io* untuk komunikasi *middleware* yang andal, dan XAMPP untuk menghosting logika aplikasi dan antarmuka pengguna secara lokal. Hasilnya adalah sistem yang mampu melakukan monitoring *real-time*, analisis deteksi kebocoran, dan pengiriman perintah kontrol (seperti mematikan pompa) melalui saluran MQTT yang sama, membentuk *loop* kontrol yang tertutup dan responsif.

D. Pengujian Sistem

Setelah prototipe dan GUI selesai dibangun, langkah selanjutnya adalah mengintegrasikan keduanya agar dapat saling berkomunikasi. *Flowchart* deteksi kebocoran pipa tercantum pada gambar 8.

Berdasarkan gambar 8, sistem akan mulai menyalakan *relay* untuk pompa mendorong air ke distribusi. Setiap *flow sensor* akan membaca rutin *flow rate* tiap titik dan mengirimkan data ke dashboard. Saat kita melakukan simulasi kebocoran pada salah satu atau kedua titik kebocoran di gambar 4, maka akan terdeteksi perubahan *flow rate* pada titik-titik sensor. Data tersebut akan menjadi patokan titik mana yang bocor dan ditampilkan pada dashboard / GUI. Selanjutnya, sistem akan mematikan pompa. Dengan hal ini, maka saat kondisi nyata, petugas akan menuju ke sekitar titik yang terindikasi mengalami kebocoran. Hal ini dapat mempersingkat waktu penanganan dan mengurangi jumlah air terbuang.

Selanjutnya, hasil pengujian dilakukan dengan skenario pada tabel 1. Tabel 1 berisi skenario pengujian dan disertai dengan pembacaan nilai flow rate dalam satuan L/min untuk setiap

sensor. Untuk mempermudah identifikasi titik tiap bagian, dapat mengacu pada gambar

TABEL 1. DATA HASIL PENGUJIAN SISTEM.

No	Skenario Pengujian	Flow1 (min)	Flow1 (max)	Flow2 (min)	Flow2 (max)	Flow3 (min)	Flow3 (max)	Flow4 (min)	Flow4 (max)
1	Keran Mati	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1
2	Normal (keran 1&2 ON)	12.88	13.32	7.33	7.55	5.94	6.22	6.22	6.44
3	Normal (keran 1 ON)	11.1	11.32	12.21	12.43	0	0.1	0	0.1
4	Normal (keran 2 ON)	10.21	10.43	0	0.1	9.77	9.99	10.43	10.76
5	Keran1 ON — Bocor di Pipa a	13.32	13.54	6.66	7.1	0	0.1	0	0.1
6	Keran1 ON — Bocor di Pipa b	13.1	13.32	7.1	7.33	5.99	6.22	0	0.1
7	Keran1 ON — Bocor di Pipa a & b	13.76	13.99	4.88	5.11	4.22	4.44	0	0.1
8	Keran2 ON — Bocor di Pipa a	13.32	13.99	0	0.1	5.55	5.77	5.77	5.99
9	Keran2 ON — Bocor di Pipa b	12.43	12.43	0	0.1	11.54	11.99	5.77	5.99
10	Keran2 ON — Bocor di Pipa a & b	13.76	13.99	0	0.1	7.1	7.33	2.66	2.99
11	Keran 1 & 2 ON — Bocor di Pipa a	13.76	13.99	5.11	5.55	3.33	3.33	3.55	3.77
12	Keran 1&2 ON — Bocor di Pipa b	13.54	13.76	6.44	6.66	7.33	7.55	2.66	2.89
13	Keran 1&2 ON — Bocor di Pipa a & b	13.99	14.21	4.44	4.44	5.11	5.33	1.78	2

Tabel 1 memperlihatkan hasil pengujian sistem yang menunjukkan kemampuan deteksi kebocoran berdasarkan analisis pola aliran air dari beberapa sensor. Sistem bekerja dengan membandingkan data *real-time* dari setiap *flow sensor* (Flow1 – Flow4) terhadap pola aliran normal yang telah ditetapkan untuk berbagai skenario penggunaan. Sebagai contoh, pada kondisi normal saat hanya Keran 1 aktif (Skenario 3), aliran tinggi tercatat di sensor Flow 1 dan Flow 2. Namun, saat terjadi simulasi kebocoran di Pipa a (Skenario 5), terjadi penyimpangan pola yang signifikan. Nilai Flow 1 meningkat karena pompa bekerja lebih keras untuk mengkompensasi air yang bocor, sementara nilai Flow 2 menurun drastis karena sebagian besar air telah keluar sebelum mencapai sensor tersebut. Logika serupa berlaku untuk lokasi kebocoran lain, di

mana peningkatan atau penurunan nilai pada sensor tertentu menjadi pola karakteristik unik yang mengidentifikasi titik masalahnya. Dengan demikian, analisis kuantitatif terhadap perubahan *flow rate* ini memungkinkan sistem tidak hanya mendeteksi adanya kebocoran, tetapi juga menentukan lokasinya secara akurat untuk mempercepat penanganan.

Selain pengujian akurasi pelokalan kebocoran (yang berhasil pada 13 dari 13 percobaan simulasi tertutup), evaluasi performa fungsional sistem dan antarmuka (GUI) juga dilakukan secara kuantitatif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengiriman data *flow rate* dari *node* sensor ke *dashboard* via protokol MQTT berlangsung secara *real-time* dengan latensi transmisi kurang dari 1 detik. Fitur perekaman riwayat (*log history*) pada *database* juga beroperasi secara



presisi tanpa adanya kehilangan paket data (0% data loss) selama simulasi berlangsung. Selain itu, metrik kecepatan respons aktuatur dalam mengeksekusi perintah pemutusan arus (*relay off*) tercatat berada pada rentang waktu 1 hingga 2 detik sesaat setelah *threshold* anomali terpenuhi. Waktu respons komputasi dan aktuasi yang singkat ini mengonfirmasi bahwa arsitektur *closed-loop control* yang diusulkan bekerja secara andal untuk skala prototipe.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini telah menghasilkan prototipe sistem deteksi kebocoran pipa distribusi berbasis IoT yang memanfaatkan kombinasi *flow sensor*, mikrokontroler ESP32, dan komunikasi MQTT. Melalui serangkaian pengujian terkontrol pada prototipe empat sensor, sistem berhasil mengidentifikasi lokasi kebocoran secara akurat berdasarkan analisis pola perubahan laju aliran air (*flow rate*). Pola penyimpangan hidrolik berupa peningkatan debit pada sensor sebelum titik kebocoran (akibat kompensasi pompa), serta penurunan debit yang signifikan pada sensor setelah titik kebocoran, terbukti menjadi indikator pelokalan yang konsisten. Selain kapabilitas pemantauan *real-time* dan rekam riwayat melalui *dashboard* GUI, keunggulan sistem ini terletak pada mekanisme otomatisasi pemutusan pompa (*relay off*) yang efektif meminimalisasi air terbuang dan mempercepat penanganan lapangan. Sebagai studi pendahuluan, pendekatan *multi-titik* ini berpotensi besar untuk diterapkan pada skala nyata. Meskipun demikian, pengembangan lanjutan berupa pengujian lapangan, optimasi jarak antar-sensor, serta integrasi algoritma prediksi sangat diperlukan untuk menyempurnakan sistem pada tahap penelitian berikutnya.

REFERENSI

- [1] United Nations, "Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all," 2023. <https://sdgs.un.org/goals/goal6> (accessed Jan. 28, 2025).
- [2] B. Shehu and F. Nazim, "Clean Water and Sanitation for All: Study on SDGs 6.1 and 6.2 Targets with State Policies and Interventions in Nigeria," *Environ. Sci. Proceeding*, vol. 15, no. 1, p. 71, 2022, doi: 10.3390/environsciproc2022015071.
- [3] Menteri Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Nomor 38 Tahun 2019 Tentang Prioritas Riset Nasional Tahun 2020-2024*, no. 1269. Indonesia, 2019, pp. 1–55. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/140206/permen-ristekdikti-no-38-tahun-2019>
- [4] S. El-zahab and T. Zayed, "Leak detection in water distribution networks: an introductory overview," *Smart Water*, vol. 4, no. 5, pp. 1–23, 2019.
- [5] S. Harahap and A. S. Budi, "Sistem Pendeteksi Kebocoran Air Pada Saluran Air Rumah Berbasis IoT Menggunakan Metode K-NN," *J. Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 8, no. 6, pp. 1–7, 2024.
- [6] Tridinamika, "Kasus Kebocoran Pipa Air Bawah Tanah Milik PDAM," 2022. <https://tridinamika.com/kasus-kebocoran-pipa-air-bawah-tanah-milik-pdam/> (accessed Jan. 28, 2025).
- [7] T. A. Azzahra, "Pipa PAM Jaya di Jakarta Bocor hingga 46%, Kerugian Ditaksir Rp 2,5 T," 2024. <https://news.detik.com/berita/d-6610190/pipa-pam-jaya-di-jakarta-bocor-hingga-46-kerugian-ditaksir-rp-2-5-t> (accessed Jan. 28, 2025).
- [8] Diskominfo Kota Bandung, "Saluran Pipa Bocor, PDAM Tirtawening Siapkan Truk Air Bersih," 2024. <https://jabarprov.go.id/berita/saluran-pipa-bocor-pdam-tirtawening-siapkan-truk-air-bersih-16981> (accessed Jan. 28, 2025).
- [9] M. I. Mohd Ismail *et al.*, "A review of vibration detection methods using accelerometer sensors for water pipeline leakage," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 51965–51981, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2896302.
- [10] A. Ayadi, O. Ghorbel, M. S. BenSalah, and M. Abid, "A framework of monitoring water pipeline techniques based on sensors technologies," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, no. 2, pp. 47–57, 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2019.12.003.
- [11] Z. Xu, H. Liu, G. Fu, Y. Zeng, and Y. Li, "Feature selection of acoustic signals for leak detection in water pipelines," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 152, no. July, p. 105945, 2024, doi: 10.1016/j.tust.2024.105945.
- [12] E. E. Atojunere and G. E. Amiegbe, "Automated Leak and Water Quality Detection System for Piped Water Supply," *Malaysian J. Sci.*, vol. 43, no. 3, pp. 98–108, 2024, doi: 10.22452/mjs.vol43no3.11.
- [13] R. Liu, T. Zayed, and R. Xiao, "Advanced acoustic leak detection in water distribution networks using integrated generative model," *Water Res.*, vol. 254, no. October 2023, p. 121434, 2024, doi: 10.1016/j.watres.2024.121434.
- [14] P. Guo *et al.*, "Leak detection in water supply pipeline with small-size leakage using deep learning networks," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 191, no. PB, pp. 2712–2724, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.10.011.
- [15] E. Farah and I. Shahrour, "Water Leak Detection: A Comprehensive Review of Methods, Challenges, and Future Directions," *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 20, p. 2975, 2024, doi: 10.3390/w16202975.
- [16] W. A. Al-ammari, A. K. Sleiti, M. Azizur, S. Rezaei-gomari, I. Hassan, and R. Hassan, "Digital twin for leak detection and fault diagnostics in gas pipelines: A systematic review, model development, and case study," *Alexandria Eng. J.*, vol. 123, no. March, pp. 91–111, 2025, doi: 10.1016/j.aej.2025.03.054.
- [17] N. A. M. Yussof and H. W. Ho, "Review of Water Leak Detection Methods in Smart Building Applications," *Buildings*, vol. 12, no. 10, p. 1535, 2022.
- [18] N. V. S. Korlapati, F. Khan, Q. Noor, S. Mirza, and S. Vaddiraju, "Review and analysis of pipeline leak detection methods," *J. Pipeline Sci. Eng.*, vol. 2, no. 4, 2022, doi: 10.1016/j.jpse.2022.100074.
- [19] H. Siregar, N. A. Pane, and Y. Yuvina, "Rancang Bangun Monitoring Kebocoran Pipa Air Pada Sistem Irigasi Bibit Kelapa Sawit Berbasis Iot," in *Konferensi Nasional Social dan Engineering Politeknik Negeri Medan*, 2023, pp. 428–439.
- [20] J. W. Tampubolon, A. B. Primawan, and L. Sumarno, "Implementasi Metode Fuzzy Berbasis Arduino Mega 2560 dan Api Telegram untuk Peringatan Kebocoran Pipa," in *Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi dan Teknik Informatika*, 2024, pp. 112–121.