p-ISSN: 2301-5373
e-ISSN: 2654-5101

Implementasi Sistem Monitoring Kualitas Air Berbasis *Internet of Things* dengan Multisensor

Ni Made Ayu Wirasih[a1], I Ketut Gede Suhartana[a2], Luh Arida Ayu Rahning Putri[a3], I Gede Surya Rahayuda[a4]

[a]Program Studi Informatika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Jimbaran, Kuta Selatan, Badung, Bali, Indonesia

[1]ayuwirasih2@gmail.com
[2]ikg.suhartana@unud.ac.id
[3]rahningputri@unud.ac.id
[4]igedesuryarahayuda@unud.ac.id

Abstract

Continuous monitoring of household borewell water quality is essential for the early detection of changes in water conditions. This study develops and evaluates a laboratory-scale prototype of an Internet of Things (IoT)-based monitoring system for early water condition indicators, utilizing a TDS sensor (SEN0244) and a temperature sensor (DS18B20) connected to an ESP8266 microcontroller. The prototype was tested using a plastic bucket filled with borewell water to simulate a household water storage system. Measurement data were transmitted via the HTTP protocol to a Flask server, stored in an SQLite database, and displayed on a web-based dashboard in near real-time. The Sugeno fuzzy logic method was implemented to provide a more stable and gradual interpretation of water conditions based on TDS values as the primary indicator and temperature as a supporting parameter, in accordance with the Indonesian Ministry of Health Regulation (Permenkes RI) Number 2 of 2023. The experimental results showed an average accuracy of 97.76% for the TDS sensor and 98.59% for the temperature sensor. Black-box testing achieved a 100% success rate (19/19 test scenarios), while data transmission was successful in 100% of cases under normal network conditions. One-day monitoring produced 180 valid data records, with TDS values ranging from 106.47 to 116.51 mg/L, all of which complied with the water quality standards specified in Permenkes RI Number 2 of 2023. These findings are consistent with the characteristics of borewell water in rural areas of Tabanan, which were not exposed to significant contamination during the observation period. This study provides empirical evidence of the feasibility of integrating Sugeno fuzzy logic into an IoT-based monitoring system architecture using TDS and temperature measurements as a foundation for the development of similar systems at a full implementation scale.

Keywords: *Internet of Things (IoT), water quality monitoring, borewell water, Sugeno fuzzy logic, TDS sensor, temperature sensor, ESP8266.*

1. Pendahuluan

Air merupakan kebutuhan dasar manusia yang tidak dapat digantikan dan menjadi prasyarat fundamental bagi derajat kesehatan masyarakat. Data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2024 menunjukkan bahwa tingkat akses rumah tangga Indonesia terhadap sumber air layak telah mencapai 92,64%, dengan Provinsi Bali menempati peringkat kedua nasional sebesar 98,32% [1]. Meskipun demikian, angka tersebut hanya mencerminkan ketersediaan infrastruktur akses fisik terhadap sumber air dan tidak secara langsung merefleksikan kualitas air yang sampai ke pengguna akhir. Dengan demikian, terdapat kesenjangan signifikan antara statistik akses air layak dan kondisi aktual kualitas air yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari.

Dalam praktiknya, sebagian masyarakat di berbagai wilayah, termasuk Kabupaten Tabanan, Provinsi Bali, masih mengandalkan air sumur bor sebagai sumber air utama untuk keperluan rumah tangga. Kualitas air sumur bor bersifat dinamis dan rentan terhadap degradasi akibat faktor alamiah, seperti perubahan kondisi geologi dan intrusi air laut, maupun faktor antropogenik. Kontaminasi berupa *Coliform* dan *Escherichia coli* pada air sumur bor di Kabupaten Gianyar telah dilaporkan dalam penelitian terdahulu [2], sementara temuan serupa di berbagai wilayah Indonesia menunjukkan tingginya nilai indeks MPN bakteri fekal pada sumber air tanah [3]. Potensi penurunan kualitas air di wilayah Bali akibat intrusi air laut yang ditandai dengan peningkatan kadar zat terlarut juga telah terdokumentasi [4].

Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 menetapkan batas parameter fisika untuk keperluan higiene dan sanitasi, di antaranya nilai *Total Dissolved Solids* (TDS) maksimum sebesar 300 mg/L dan rentang suhu air 20–30°C [5]. TDS dipilih sebagai indikator utama karena dapat diukur secara langsung dan berkelanjutan menggunakan sensor berbasis konduktivitas elektrolitik. Peningkatan nilai TDS secara konsisten dapat mengindikasikan masuknya ion-ion baru ke dalam perairan, sehingga TDS dapat berfungsi sebagai penanda awal yang memerlukan evaluasi lebih lanjut. Parameter suhu diposisikan sebagai parameter pendukung karena fluktuasi termal secara langsung memengaruhi konduktivitas elektrolitik larutan yang menjadi dasar fisis pembacaan sensor TDS.

Pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pengukuran indikator kualitas air seperti TDS dan suhu dilakukan secara otomatis dan berkala, dengan data dikirimkan melalui jaringan secara *near real-time* serta tersimpan sebagai data historis untuk memantau tren perubahan dari waktu ke waktu. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis NodeMCU ESP32 dengan sensor TDS dan suhu mampu menghasilkan pengukuran dengan akurasi yang baik [6]. Meskipun demikian, sebagian besar sistem monitoring kualitas air berbasis IoT yang telah dikembangkan masih memiliki keterbatasan mendasar, yaitu hanya menyajikan data numerik mentah tanpa mekanisme interpretasi otomatis, sehingga pengguna tanpa latar belakang teknis harus menentukan sendiri apakah nilai yang terbaca berada pada kondisi aman. Adapun sistem yang telah menerapkan mekanisme klasifikasi umumnya masih menggunakan pendekatan ambang batas tegas (*crisp threshold*), di mana status kondisi air berubah secara biner pada satu nilai batas tertentu sehingga fluktuasi kecil akibat noise sensor dapat mengakibatkan perubahan status kondisi air secara berulang, meskipun secara fisik tidak terjadi perubahan kondisi air yang signifikan. Keterbatasan inilah yang menjadi celah penelitian (*research gap*) utama yang coba dijawab oleh penelitian ini, yaitu kebutuhan mekanisme interpretasi otomatis yang lebih adaptif terhadap fluktuasi kecil pada data sensor IoT dibandingkan pendekatan crisp threshold.

Logika *fuzzy* Sugeno dipilih untuk mengatasi keterbatasan tersebut, karena mampu merepresentasikan kondisi gradual melalui derajat keanggotaan (*degree of membership*). Keluaran metode Sugeno berupa fungsi konstan atau linier per aturan sehingga proses *defuzzifikasi* menggunakan *Weighted Average* lebih efisien secara komputasi, relevan untuk implementasi pada mikrokontroler ESP8266 yang memiliki sumber daya terbatas [7]. Penelitian ini mengembangkan dan menguji prototipe sistem monitoring berbasis IoT menggunakan sensor TDS SEN0244 dan DS18B20 yang terhubung dengan mikrokontroler ESP8266, server Flask, basis data SQLite, dan *dashboard* berbasis web, dilengkapi dengan implementasi logika *fuzzy* Sugeno untuk interpretasi kondisi air secara gradual dan stabil.

2. Metode Penelitian

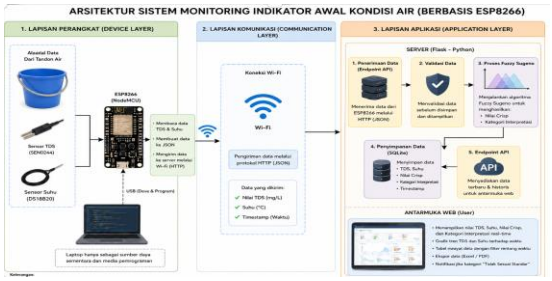
Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa (*engineering research*) dengan pendekatan kuantitatif deskriptif. Pengujian dilakukan pada media prototipe berupa ember plastik yang berisi air sumur bor dari Br. Pondok Kelod, Desa Gadungan, Kecamatan Selemadeg Timur, Kabupaten Tabanan, Bali, sebagai simulasi penampungan air rumah tangga skala laboratorium.

2.1 Arsitektur Sistem IoT

Sistem monitoring dirancang menggunakan arsitektur IoT tiga lapisan yang terdiri atas: (1) *device layer* berupa sensor TDS SEN0244 dan sensor suhu DS18B20 yang terhubung ke mikrokontroler ESP8266; (2) *network layer* menggunakan koneksi Wi-Fi dengan protokol HTTP POST dalam format JSON; serta (3) *application layer* berupa server Flask, basis data SQLite, dan *dashboard* web berbasis Bootstrap. Data dikirimkan setiap 60 detik secara otomatis. Sistem dilengkapi mekanisme *auto-reconnect* Wi-Fi

p-ISSN: 2301-5373
e-ISSN: 2654-5101

melalui pengecekan berkala setiap 60 detik untuk memastikan pemulihan koneksi tanpa intervensi manual.



Gambar 1. Arsitektur Sistem Monitoring Kualitas Air berbasis IoT

Sebagai fitur pendukung, sistem dilengkapi notifikasi otomatis melalui Telegram Bot yang bekerja terintegrasi dengan server Flask. Apabila hasil interpretasi logika *fuzzy* Sugeno menunjukkan kategori "Tidak Sesuai Standar", server secara otomatis mengirimkan pesan peringatan dini kepada pengguna yang telah mengaktifkan fitur notifikasi melalui halaman Pengaturan Akun. Mekanisme ini memungkinkan pengguna memperoleh informasi kondisi air tanpa harus memantau *dashboard* secara terus-menerus. Pengguna dapat mengaktifkan atau menonaktifkan notifikasi Telegram Bot sesuai preferensi melalui halaman pengaturan pada antarmuka web.

.

2.2 Implementasi Logika Fuzzy Sugeno

Implementasi logika *fuzzy* Sugeno dilakukan pada server Flask melalui tiga tahapan: (1) *fuzzifikasi*, (2) inferensi dengan 9 *rule base*, dan (3) *defuzzifikasi* menggunakan metode *Weighted Average*. Bobot variabel ditetapkan sebagai w_TDS = 0,70 dan w_suhu = 0,30 berdasarkan validasi pakar kesehatan lingkungan dari Dinas Kesehatan Provinsi Bali.

Fungsi keanggotaan variabel TDS didefinisikan menggunakan bentuk trapesium dan segitiga. Himpunan TDS_Rendah (Persamaan 1) bernilai 1 apabila TDS ≤ 280 mg/L, menurun secara linier pada rentang 280–320 mg/L, dan bernilai 0 apabila TDS ≥ 320 mg/L.

$$\mu_{Rendah}(TDS) = \begin{cases} 1, & TDS \leq 280 \\ \frac{320 - TDS}{40}, & 280 < TDS < 320 \\ 0, & TDS \geq 320 \end{cases} \quad (1)$$

Himpunan TDS_Sedang (Persamaan 2) menggunakan bentuk segitiga dengan puncak pada 400 mg/L.

$$\mu_{Sedang}(TDS) = \begin{cases} \frac{TDS - 280}{120}, & 280 < TDS < 400 \\ \frac{520 - TDS}{120}, & 400 \leq TDS < 520 \\ 0, & \text{selainnya} \end{cases} \quad (2)$$

Himpunan TDS_Tinggi (Persamaan 3) bernilai 0 apabila TDS ≤ 480 mg/L, meningkat secara linier pada rentang 480–650 mg/L, dan bernilai 1 apabila TDS ≥ 650 mg/L.

$$\mu_{Tinggi}(TDS) = \begin{cases} 0, & TDS \leq 480 \\ \frac{TDS - 480}{170}, & 480 < TDS < 650 \\ 1, & TDS \geq 650 \end{cases} \quad (3)$$

Fungsi keanggotaan variabel suhu didefinisikan serupa. Himpunan Suhu_Sedang (Persamaan 4) mempunyai nilai penuh (μ = 1) pada rentang 23–27°C, sesuai standar Permenkes RI No. 2 Tahun 2023.

$$\mu_{Sedang}(suhu) = \begin{cases} \frac{suhu - 20}{3}, & 20 < suhu < 23 \\ 1, & 23 \leq suhu \leq 27 \\ \frac{30 - suhu}{3}, & 27 < suhu < 30 \\ 0, & \text{selainnya} \end{cases} \quad (4)$$

Tahap inferensi menggunakan operator MIN (Persamaan 5) untuk menghitung derajat aktifasi (α) setiap aturan *fuzzy*, di mana i adalah indeks aturan, A_i dan B_i masing-masing adalah himpunan TDS dan suhu yang terlibat pada aturan ke-i.

$$\alpha_i = \min\left(\mu_{A_i}(TDS),\ \mu_{B_i}(suhu)\right) \tag{5}$$

Tahap *defuzzifikasi* menggunakan metode *Weighted Average* (Persamaan 6) untuk menghasilkan nilai crisp Z*, di mana z_i adalah nilai keluaran konstan setiap aturan yang dihitung dari bobot w_TDS × s_TDS + w_suhu × s_suhu.

$$Z^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i\, z_i}{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i} \tag{6}$$

Nilai Z* kemudian diklasifikasikan menjadi tiga kategori: Sesuai Standar (0,71 ≤ Z* ≤ 1,00), Perlu Perhatian (0,41 ≤ Z* ≤ 0,70), dan Tidak Sesuai Standar (0,00 ≤ Z* ≤ 0,40).

2.3 Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan melalui lima pendekatan: (1) pengujian fungsional *black box testing* terhadap 19 skenario yang mewakili 12 kebutuhan fungsional (KF-01 hingga KF-12), termasuk pengujian mekanisme notifikasi Telegram Bot (skenario BB-09) menggunakan metode injeksi data; (2) pengujian akurasi sensor TDS pada tiga kondisi larutan (air biasa, larutan garam rendah, larutan garam tinggi); (3) pengujian akurasi sensor suhu pada tiga kondisi (air dingin, suhu ruangan, air panas); serta (4) pengujian logika *fuzzy* Sugeno menggunakan 15 skenario purposive yang mewakili tiga kategori kondisi air, dilengkapi *boundary testing* pada 6 titik kritis; dan (5) pengujian pengiriman data serta latensi *near real-time*. Monitoring data dilakukan selama satu hari penuh pada tanggal 19 Mei 2026 pada tiga periode waktu: pagi (07.00–08.00 WITA), siang (13.00–14.00 WITA), dan malam (19.00–20.00 WITA), menghasilkan total 180 data pengukuran.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Implementasi Sistem

Sistem monitoring berhasil direalisasikan menggunakan arsitektur IoT tiga lapisan. Firmware ESP8266 mengimplementasikan pembacaan sensor setiap 60 detik disertai kompensasi suhu terhadap nilai TDS menggunakan koefisien 0,02 per °C. Data dikirimkan ke server Flask dalam format JSON melalui protokol HTTP POST, kemudian disimpan dalam basis data SQLite beserta *timestamp* dan hasil interpretasi *fuzzy*. Dashboard berbasis web menampilkan data TDS, suhu, skor *fuzzy*, dan kategori kondisi air secara *near real-time*, dilengkapi fitur grafik, rekapan data, dan ekspor ke Excel.

Sistem juga mengimplementasikan fitur notifikasi otomatis melalui Telegram Bot yang terintegrasi pada server Flask. Telegram Bot dikonfigurasi menggunakan Telegram Bot API dengan token yang diperoleh dari BotFather. Setiap kali server menerima data baru dari ESP8266 dan hasil interpretasi logika *fuzzy* Sugeno menunjukkan kategori “Tidak Sesuai Standar” (nilai Z* < 0,41), server secara otomatis memanggil endpoint Telegram API untuk mengirimkan pesan peringatan kepada *chat_id* pengguna yang telah mengaktifkan notifikasi. Pesan notifikasi memuat informasi nilai TDS, suhu, nilai Z*, kategori kondisi air, serta *timestamp* pengukuran. Pengguna dapat mengaktifkan atau menonaktifkan fitur ini melalui halaman Pengaturan Akun pada antarmuka web.

3.2. Hasil Pengujian *Black Box*

Pengujian fungsional *black box testing* menunjukkan tingkat keberhasilan 100% (19/19 skenario, 57 iterasi) tanpa *error* kritis, mengkonfirmasi bahwa seluruh kebutuhan fungsional KF-01 hingga KF-12 terpenuhi. Pengujian mencakup seluruh alur kerja sistem mulai dari autentikasi pengguna, pembacaan dan pengiriman data sensor, interpretasi logika *fuzzy*, penyajian data pada *dashboard*, hingga mekanisme notifikasi Telegram Bot (skenario BB-09). Khusus untuk skenario BB-09, pengujian notifikasi dilakukan menggunakan metode injeksi data (*data injection*) secara langsung ke dalam basis data karena kondisi “Tidak Sesuai Standar” tidak terjadi secara alami selama monitoring — nilai TDS air sumur bor di lokasi penelitian secara konsisten berada jauh di bawah 300 mg/L. Hasilnya, notifikasi Telegram Bot berhasil terkirim secara otomatis kepada pengguna pada ketiga iterasi pengujian (3/3), membuktikan mekanisme deteksi dan pengiriman peringatan dini berjalan sesuai rancangan.

3.3. Akurasi Sensor

Sensor TDS SEN0244 mencapai akurasi rata-rata 97,76% (*error* 2,24%), melampaui akurasi sensor tanpa kalibrasi yang dilaporkan oleh penelitian sebelumnya sebesar 85,94% [8], dan sebanding dengan

p-ISSN: 2301-5373
e-ISSN: 2654-5101

penelitian yang melaporkan akurasi TDS 98,4% menggunakan ESP32 [6]. Sensor suhu DS18B20 menghasilkan deviasi rata-rata 0,26°C pada kondisi operasional utama, memenuhi spesifikasi pabrikan (±0,5°C), dengan akurasi rata-rata 98,59%.

Tabel 1. Rekapitulasi Hasil Pengujian Akurasi Sensor

Sensor	Akurasi Rata-rata	Error Rata-rata (%)	Keterangan
TDS SEN0244	97,76%	2,24%	Memenuhi kriteria (≤ ±5%)
Suhu DS18B20	98,59%	0,26°C	Memenuhi kriteria (≤ ±0,5°C)

3.4. Hasil Pengujian Logika *Fuzzy* Sugeno

Hasil pengujian terhadap 15 skenario yang mewakili tiga kategori kondisi air menunjukkan bahwa nilai Z* yang dihasilkan sistem identik dengan hasil perhitungan manual pada presisi tiga desimal, dengan selisih 0,000 pada seluruh skenario. *Boundary testing* pada 6 titik kritis mengkonfirmasi bahwa transisi antarkategori berlangsung secara gradual pada zona transisi 280–520 mg/L. Pada nilai TDS = 300 mg/L yang berada tepat pada ambang batas Permenkes, sistem menghasilkan Z* sebesar 0,920 dengan kategori Sesuai Standar, tidak terjadi perubahan kategori secara mendadak sebagaimana pada pendekatan *crisp threshold*.

Tabel 2. Hasil Pengujian Logika *Fuzzy* Sugeno

No	TDS (mg/L)	Suhu (°C)	Z* Manual	Z* Sistem	Selisih	Kategori
1	120	25	1,000	1,000	0,000	Sesuai Standar
2	300	25	0,920	0,920	0,000	Sesuai Standar
3	390	25	0,650	0,650	0,000	Perlu Perhatian
4	450	25	0,520	0,520	0,000	Perlu Perhatian
5	600	32	0,150	0,150	0,000	Tidak Sesuai Standar

3.5. Hasil Pengiriman Data dan Latensi

Pengujian pengiriman data menunjukkan tingkat keberhasilan 100% (25/25 transmisi) pada kondisi jaringan Wi-Fi lokal normal. Integritas data sepanjang alur dari sensor hingga *dashboard* terkonfirmasi melalui kesesuaian nilai pada serial monitor ESP8266 dengan data yang tersimpan di basis data. Pengujian latensi *end-to-end* pada 10 transmisi berturut-turut menghasilkan latensi konsisten sebesar 1 detik, jauh di bawah kriteria keberhasilan ≤ 60 detik, membuktikan persyaratan *near real-time* terpenuhi dengan margin yang sangat besar (faktor 60×).

3.6. Hasil Monitoring Data

Monitoring selama satu hari menghasilkan 180 data valid secara otomatis. Terdapat pola kenaikan nilai rata-rata TDS yang konsisten sepanjang hari: 108,07 mg/L pada periode pagi, 111,27 mg/L pada periode siang, dan 112,53 mg/L pada periode malam. Kenaikan total sebesar 4,46 mg/L (sekitar 4,1%) dapat disebabkan oleh proses penguapan air yang meningkatkan konsentrasi relatif ion terlarut. Seluruh 180 data (100%) menghasilkan kategori Sesuai Standar berdasarkan Permenkes RI No. 2 Tahun 2023, konsisten dengan karakteristik air sumur bor di wilayah pedesaan Tabanan yang tidak terpapar pencemaran signifikan selama periode pengamatan.

Tabel 3. Perbandingan Statistik Data Monitoring Antar Periode Waktu

Metrik	Pagi (07–08)	Siang (13–14)	Malam (19–20)
Rata-rata TDS (mg/L)	108,07	111,27	112,53
Std. Deviasi TDS (mg/L)	±1,38	±2,04	±0,97
Rata-rata Suhu (°C)	25,57	26,72	26,21

Rentang TDS (mg/L)	106,47–110,51	110,41–116,51	112,29–115,31
Kategori Sesuai Standar	100%	100%	100%
Jumlah Data	60	60	60

3.7. Evaluasi Sistem

Evaluasi sistem dilakukan untuk menilai sejauh mana sistem monitoring berbasis IoT yang dikembangkan telah memenuhi kriteria keberhasilan yang ditetapkan. Evaluasi difokuskan pada dua dimensi: evaluasi keberfungsian sistem monitoring IoT dan evaluasi interpretasi logika fuzzy Sugeno.

Pada dimensi keberfungsian sistem monitoring IoT, seluruh lima aspek evaluasi dinyatakan memenuhi kriteria. Aspek keberfungsian fitur melalui black box testing menunjukkan 19/19 skenario berhasil (100%) pada 57 iterasi tanpa error kritis. Akurasi sensor TDS SEN0244 mencapai 97,76% dengan error rata-rata 2,24% (selisih 6,2 mg/L), melampaui kriteria deviasi ≤ ±5% dan mengkonfirmasi efektivitas prosedur kalibrasi. Akurasi sensor suhu DS18B20 mencapai 98,59% dengan selisih rata-rata 0,26°C pada kondisi operasional, memenuhi spesifikasi pabrikan ±0,5°C. Keandalan pengiriman data mencapai 100% (180/180 data tersimpan; 25/25 transmisi uji berhasil), melampaui batas minimal 95% yang ditetapkan. Latensi near real-time rata-rata 1 detik memenuhi kriteria ≤ 60 detik dengan margin faktor 60×, membuktikan sistem mampu menyajikan data monitoring secara near real-time sesuai perancangan.

Pada dimensi evaluasi interpretasi logika fuzzy Sugeno, seluruh empat aspek juga dinyatakan memenuhi kriteria. Ketepatan implementasi dibuktikan dengan kesesuaian nilai Z* sistem dan perhitungan manual pada 15/15 skenario pengujian dengan selisih 0,000 pada presisi tiga desimal. Gradualitas interpretasi di zona transisi terkonfirmasi melalui boundary testing pada 6 titik kritis, di mana pada nilai TDS = 300 mg/L (tepat di ambang batas Permenkes) sistem menghasilkan Z* = 0,920 dengan kategori Sesuai Standar tanpa perubahan kategori mendadak. Stabilitas di zona normal terkonfirmasi dari seluruh 180 data monitoring yang menghasilkan Z* stabil pada 1,000 (TDS 106–117 mg/L, jauh dari zona transisi 280–520 mg/L). Kesesuaian kategori dengan rule base terkonfirmasi pada seluruh 9 aturan fuzzy yang menghasilkan kategori sesuai rancangan ketika diuji dengan derajat keanggotaan penuh (μ = 1,0).

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan menguji prototipe sistem monitoring indikator awal kondisi air sumur bor rumah tangga berbasis IoT dengan logika *fuzzy* Sugeno pada skala laboratorium. Beberapa simpulan utama yang dapat ditarik adalah sebagai berikut. Pertama, sistem monitoring berbasis IoT berhasil diimplementasikan menggunakan sensor TDS SEN0244, sensor suhu DS18B20, mikrokontroler ESP8266, server Flask, basis data SQLite, dan *dashboard* web, disertai fitur notifikasi otomatis via Telegram Bot sebagai mekanisme peringatan dini. Tingkat keberhasilan *black box testing* mencapai 100% (19/19 skenario, termasuk skenario pengiriman notifikasi Telegram Bot). Kedua, logika *fuzzy* Sugeno berhasil diterapkan untuk menginterpretasikan kondisi air secara gradual, menghasilkan nilai Z* yang konsisten dengan perhitungan manual pada presisi tiga desimal. Pada ambang batas Permenkes (TDS = 300 mg/L), sistem menghasilkan Z* = 0,920 tanpa perubahan kategori mendadak. Ketiga, sensor TDS mencapai akurasi rata-rata 97,76% dan sensor suhu 98,59%. Pengiriman data berhasil 100% pada kondisi jaringan normal dengan latensi rata-rata 1 detik. Monitoring satu hari menghasilkan 180 data valid dengan seluruh nilai TDS (106,47–116,51 mg/L) dikategorikan Sesuai Standar Permenkes RI No. 2 Tahun 2023.

Hasil penelitian ini perlu dimaknai dengan mempertimbangkan sejumlah keterbatasan yang membatasi ruang lingkup generalisasinya, yaitu pengujian yang hanya dilakukan pada satu lokasi pengambilan sampel (Br. Pondok Kelod, Kabupaten Tabanan), durasi monitoring yang hanya berlangsung selama satu hari, penggunaan dua parameter kualitas air (TDS dan suhu), serta belum adanya pengujian jangka panjang pada kondisi lingkungan yang bervariasi. Keterbatasan tersebut menunjukkan bahwa temuan penelitian ini masih bersifat awal pada skala laboratorium dan belum tentu merepresentasikan kondisi lapangan secara menyeluruh, sehingga perlu divalidasi lebih lanjut sebelum diterapkan pada skala implementasi penuh. Meskipun demikian, penelitian ini tetap memberikan bukti empiris kelayakan

p-ISSN: 2301-5373
e-ISSN: 2654-5101

integrasi logika *fuzzy* Sugeno pada arsitektur sistem monitoring IoT berbasis TDS dan suhu sebagai fondasi pengembangan sistem serupa pada skala implementasi penuh. Pengembangan selanjutnya dapat mencakup penambahan parameter kualitas air (pH, kekeruhan, *dissolved oxygen*), optimasi parameter *fuzzy* menggunakan pendekatan ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*), perluasan saluran notifikasi ke platform lain di luar Telegram Bot, serta pengujian pada skala lapangan dengan sumber air yang lebih beragam.

Daftar Pustaka

[1] Badan Pusat Statistik, "Indikator Kesejahteraan Rakyat 2024," BPS, Jakarta, 2024.
[2] N. W. Korniasih dan I. M. Sumarya, "Total coliform dan Escherichia coli air sumur bor dan sumur gali di Kabupaten Gianyar," Widya Biologi, vol. 12, no. 2, hlm. 90–98, 2021.
[3] L. Suryani, E. Yuniarini, dan D. A. Putri, "Cemaran coliform fekal pada air sumur bor dengan metode MPN di Perumahan Bumi Ayu Kota Bengkulu," Jurnal Ilmiah Pharmacy, vol. 11, no. 1, hlm. 70–78, 2023.
[4] Bali Water Protection, "Rilis Pers Hasil Penelitian Program Bali Water Protection 2018," 2018.
[5] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan, 2023.
[6] P. N. Setiawati dan F. Fitriyani, "Sistem monitoring realtime kualitas air berbasis IoT dengan sensor TDS dan NodeMCU ESP32," JIKA, vol. 1, no. 1, hlm. 1–8, 2025.
[7] A. Saputra, S. Anwar, dan R. Hidayat, "Sistem kontrol dan monitoring kualitas air reverse osmosis (RO) menggunakan fuzzy logic metode Sugeno berbasis Internet of Things," Innovative: Journal of Social Science Research, vol. 5, no. 3, hlm. 7842–7861, 2025.
[8] S. Tansa, I. Pakaya, dan R. D. R. Dako, "Monitoring kualitas air sungai (kekeruhan, suhu, TDS, pH) menggunakan mikrokontroler ATmega328," Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering, vol. 6, no. 1, hlm. 40–49, 2024.
[9] M. N. N. Novian, M. W. Walid, dan M. M. Makruf, "Implementasi logika fuzzy untuk monitoring tingkat pencemaran air sungai berbasis Internet of Things," Jurnal Siskom-KB, vol. 7, no. 3, hlm. 148–155, 2024.
[10] H. A. Putra dan A. Rosano, "Implementasi IoT dalam sistem monitoring kualitas air menggunakan platform Blynk dan Google Spreadsheet," Insantek Journal, vol. 5, no. 1, hlm. 45–52, 2024.
[11] T. Takagi dan M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-15, no. 1, hlm. 116–132, 1985.
[12] [L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," Information and Control, vol. 8, no. 3, hlm. 338–353, 1965.