Jurnal Ilmu Komputer dan Sistem Informasi (JIRSI) **e-ISSN 2830-3954**
Volume: 5, Nomor: 3, September 2026: 1169-1179 **p-ISSN 2830-6031**
https://jurnal.unity-academy.sch.id/index.php/jirsi/index

Sistem Monitoring Kualitas Air Limbah Berbasis IoT dengan Thresholding Bertingkat pada UMKM Batik

IoT-Based Wastewater Quality Monitoring System with Multi-Level Thresholding for Batik SMEs

Syaeful Anwar*[1]
[1]Program Studi Teknik Informatika, Universitas Hasyim Asy'ari, Jombang
E-mail: [1]*syaefula465@gmail.com

Abstrak

UMKM Pesona Batik Jombang menghasilkan limbah cair dari proses pewarnaan dan pencucian kain batik yang hingga saat ini masih dipantau secara manual dan tidak berkelanjutan. Kondisi ini berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan dan melanggar Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Penelitian ini merancang dan membangun sistem monitoring kualitas air limbah berbasis Internet of Things (IoT) dengan metode thresholding bertingkat yang mengklasifikasikan kondisi air menjadi tiga kategori: Aman, Hati-hati, dan Tidak Aman. Sistem mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 Dev Module, sensor pH PH4502C, sensor suhu DS18B20, dan sensor TDS DFRobot Gravity Analog V1.0 yang terhubung melalui protokol MQTT ke platform visualisasi Node-RED. Kebaruan penelitian terletak pada penerapan fungsi minimum K = min(f(pH), f(T), f(TDS)) sebagai mekanisme agregasi multi-parameter berbasis prinsip worst-case scenario, dengan nilai ambang batas bersumber langsung dari Permen LH No. 5 Tahun 2014 dan Guidelines WHO 2022. Kalibrasi sensor menghasilkan MAPE 1,86% (pH), 0,37% (suhu), dan 2,20% (TDS), keseluruhannya di bawah toleransi 5%. Pengujian lapangan pada 20 sampel data nyata menunjukkan akurasi klasifikasi thresholding bertingkat sebesar 100%.

***Kata kunci**: IoT, Thresholding Bertingkat, Monitoring Air Limbah, ESP32, UMKM Batik*

Abstract

Pesona Batik Jombang SME generates liquid waste from batik dyeing and washing processes that is still monitored manually and non-continuously, risking environmental pollution and violating Indonesian Minister of Environment Regulation No. 5 of 2014. This study designs and develops an IoT-based wastewater quality monitoring system using a multi-level thresholding method that classifies water conditions into three categories: Safe, Caution, and Unsafe. The system integrates an ESP32 Dev Module, a PH4502C pH sensor, a DS18B20 temperature sensor, and a DFRobot Gravity Analog TDS Sensor V1.0 connected via the MQTT protocol to a Node-RED visualization platform. The novelty lies in applying the minimum function K = min(f(pH), f(T), f(TDS)) as a multi-parameter aggregation mechanism based on the worst-case scenario principle, with thresholds derived directly from Indonesian regulations and WHO Guidelines 2022. Sensor calibration yielded a MAPE of 1.86% (pH), 0.37% (temperature), and 2.20% (TDS), all below the 5% tolerance. Field testing on 20 real samples demonstrated a classification accuracy of 100%.

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Keywords: *IoT, Multi-Level Thresholding, Wastewater Quality Monitoring, ESP32, Batik SME*

1. PENDAHULUAN

UMKM Pesona Batik Jombang merupakan industri batik skala kecil yang beroperasi di Kabupaten Jombang. Proses produksi batik meliputi pewarnaan, pencucian, dan pelorodan kain yang menghasilkan limbah cair mengandung zat warna sintetis, bahan kimia organik, dan partikel terlarut setiap harinya. Pemantauan kualitas air limbah bukan hanya kebutuhan teknis, tetapi juga kewajiban hukum berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup RI Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah [1], yang menetapkan standar parameter pH, suhu, dan TDS sebelum limbah dibuang ke lingkungan. Pelanggaran berpotensi berujung pada sanksi administratif hingga pidana sesuai UU No. 32 Tahun 2009 [2]. Namun hingga saat ini, UMKM tersebut masih memantau limbah secara manual dan tidak berkelanjutan sehingga perubahan kualitas air tidak terdeteksi secara dini.

Pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pemantauan secara otomatis dan *real-time* [3]. Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem monitoring kualitas air berbasis IoT, antara lain Sugiharto *et al.* [4] dengan parameter pH, suhu, TDS, dan kekeruhan; Pratama dan Qodri [5] dengan notifikasi biner; Iswanto *et al.* [6] dengan sistem monitoring dan controlling IPAL; serta Kainama dan Purnomo [8] dengan dua parameter (pH dan suhu). Namun sebagian besar masih terbatas pada penyajian data tanpa mekanisme klasifikasi otomatis berbasis nilai ambang batas yang sesuai regulasi.

Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring berbasis IoT dengan metode *thresholding* bertingkat yang mengklasifikasikan kondisi air menjadi tiga kategori: Aman, Hati-hati, dan Tidak Aman. Kebaruan penelitian terletak pada: (1) integrasi tiga parameter (pH, suhu, TDS) secara simultan; (2) penerapan fungsi minimum K = min(f(pH), f(T), f(TDS)) berbasis prinsip *worst-case scenario*; dan (3) nilai ambang batas yang bersumber langsung dari Permen LH No. 5 Tahun 2014
[1] dan WHO Guidelines 2022 [7], bukan berdasarkan nilai empiris *ad hoc*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Tabel 1 merangkum perbandingan penelitian terdahulu dan posisi penelitian ini terhadap penelitian yang ada.

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Tahun	Parameter	Metode	Keterbatasan
Sugiharto et al. [4]	2023	pH, Suhu, TDS, Kekeruhan	IoT + Cloud	Tanpa klasifikasi otomatis berbasis regulasi
Pratama & Qodri [5]	2023	pH, Suhu, TDS	IoT Monitoring	Notifikasi biner, tanpa zona peringatan dini
Iswanto et al. [6]	2023	pH, Kekeruhan, Amonia	IoT + Kontrol	Kompleksitas tinggi, kurang sesuai UMKM

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Kainama & Purnomo [8]	2025	pH, Suhu	IoT Monitoring	Dua parameter, tanpa klasifikasi bertingkat
Penelitian Ini	2026	pH, Suhu, TDS	IoT + Thresholding Bertingkat	Dibutuhkan kalibrasi bertahap

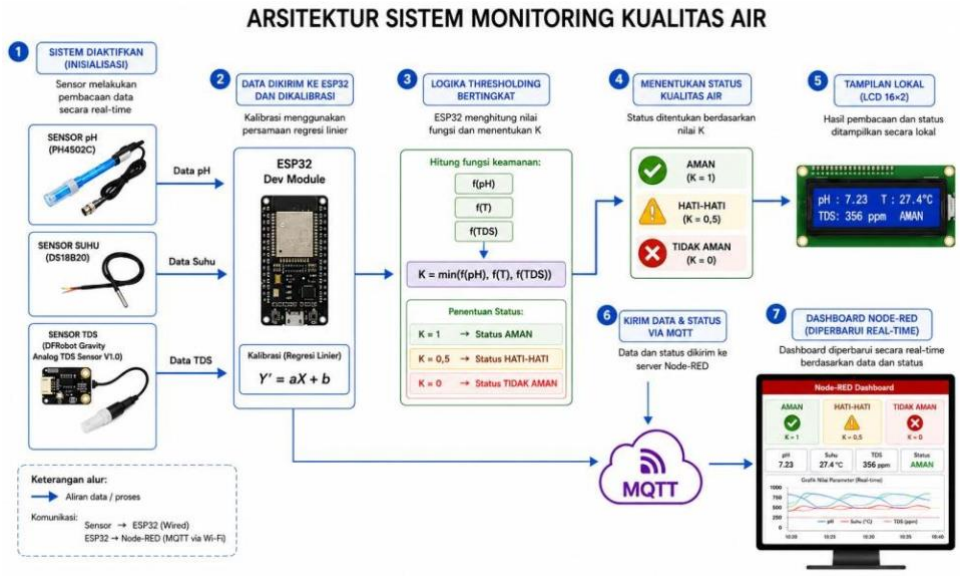
Berdasarkan kajian literatur, belum ada penelitian yang secara simultan mengintegrasikan tiga parameter, menerapkan klasifikasi tiga level, serta menggunakan ambang batas yang bersumber langsung dari regulasi lingkungan Indonesia untuk UMKM batik. Penelitian ini mengisi *gap* tersebut.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode pengembangan sistem *Waterfall* yang bersifat sekuensial: (1) Analisis Kebutuhan, (2) Perancangan Sistem, (3) Implementasi, (4) Pengujian, dan (5) Evaluasi Sistem.

3.1. Arsitektur Sistem

Sistem terdiri atas tiga lapisan: (1) lapisan akuisisi data berupa perangkat keras sensor; (2) lapisan pemrosesan dan komunikasi berupa mikrokontroler ESP32 dan protokol MQTT; serta (3) lapisan visualisasi berupa platform Node-RED. ESP32 membaca data tiga sensor secara simultan setiap 5 detik, melakukan kalibrasi, menjalankan logika *thresholding* bertingkat, lalu mempublikasikan hasil ke *broker* MQTT Mosquitto. Node-RED berlangganan topik yang sama untuk memperbarui *dashboard* berbasis web secara *real-time*. Gambar 1 menyajikan arsitektur sistem secara keseluruhan.



Gambar 1. Arsitektur Sistem IoT Monitoring Kualitas Air Limbah

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

3.2. Metode Thresholding Bertingkat

Metode *thresholding* bertingkat membandingkan nilai hasil pembacaan sensor terhadap nilai ambang batas regulasi. Tabel 2 merangkum nilai ambang batas setiap parameter.

Tabel 2. Nilai Ambang Batas Parameter Kualitas Air Limbah

Parameter (Acuan)	AMAN (f = 1)	HATI-HATI (f = 0,5)	AMAN (f = 0)
pH (Permen LH No.5/2014)	6 ≤ pH ≤ 9	atau 9 < pH ≤ 9,5	atau pH > 9,5
°C (Permen LH No.5/2014)	T ≤ 38°C	38°C < T ≤ 40°C	T > 40°C
WHO Guidelines 2022)	TDS < 600	600 ≤ TDS ≤ 900	TDS > 900

Status akhir kualitas air ditentukan menggunakan fungsi minimum yang mengimplementasikan prinsip *worst-case scenario*:

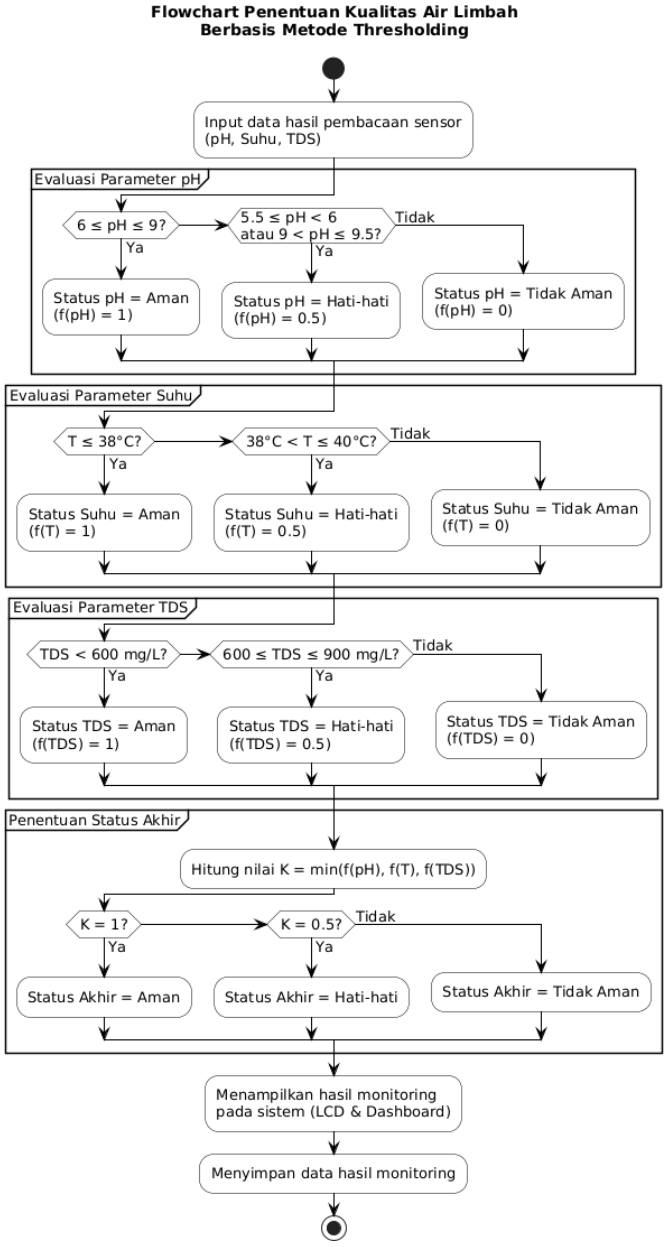
$$K = \min (f(pH), f(T), f(TDS)) \quad (1)$$

dengan K = 1 menyatakan status AMAN, K = 0,5 menyatakan status HATI-HATI, dan K = 0 menyatakan status TIDAK AMAN. Penggunaan fungsi minimum pada Persamaan (1) memastikan kondisi berbahaya pada satu parameter tidak tersembunyikan oleh kondisi baik pada parameter lainnya. Prosedur klasifikasi thresholding bertingkat yang diimplementasikan pada ESP32 dirangkum pada Algoritma 1.

Algoritma 1. Klasifikasi Thresholding Bertingkat

1: baca nilai pH, T, TDS dari sensor
2: f(pH) ← hitung fungsi keanggotaan pH sesuai Tabel 2 3: f(T) ← hitung fungsi keanggotaan suhu sesuai Tabel 2
4: f(TDS) ← hitung fungsi keanggotaan TDS sesuai Tabel 2 5: K ← min(f(pH), f(T), f(TDS))
6: jika K = 1 maka status ← "AMAN"
7: jika K = 0,5 maka status ← "HATI-HATI" 8: jika K = 0 maka status ← "TIDAK AMAN"
9: kirim {pH, T, TDS, K, status} ke broker MQTT
10: tampilkan status pada LCD dan dashboard Node-RED

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)



Gambar 2. Flowchart Metode Thresholding Bertingkat

3.3. Metode Kalibrasi dan Evaluasi

Kalibrasi sensor menggunakan metode regresi linier dua titik (*two-point linear calibration*) sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (2), dengan $a = (Y^2 - Y^1)/(X^2 - X^1)$ dan $b = Y^1 - aX^1$.

$$Y' = aX + b \tag{2}$$

Akurasi kalibrasi dievaluasi menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) pada Persamaan (3).

$$MAPE = (1/n) \times \Sigma \left|(A_i - F_i) / A_i\right| \times 100\% \tag{3}$$

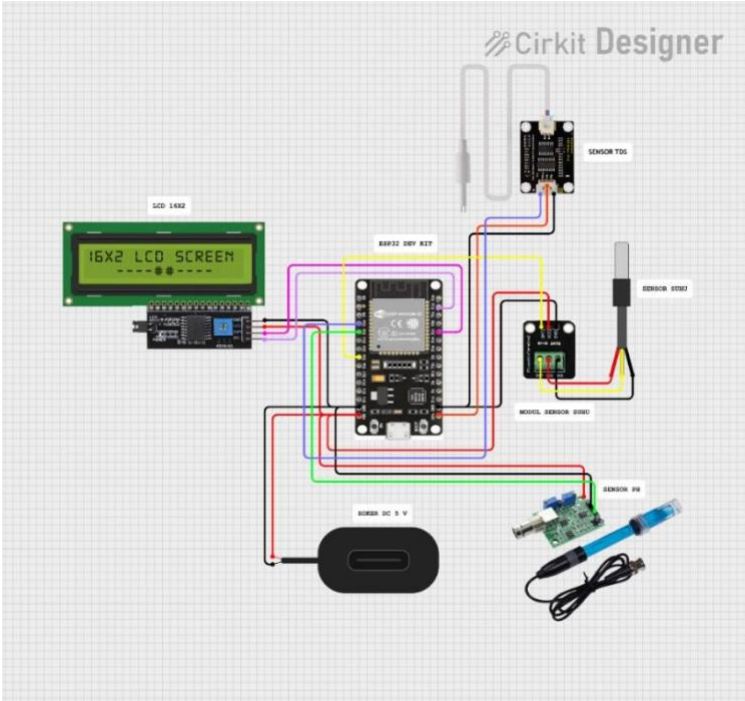
© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Akurasi kalibrasi kemudian dihitung sebagai Akurasi = 100% − MAPE. Sistem dinyatakan layak apabila nilai MAPE di bawah 5% dan akurasi klasifikasi minimal 90%. Pengujian metode dilakukan dalam dua tahap: (1) validasi desain melalui simulasi *boundary condition testing* 10 skenario; dan (2) pengujian lapangan menggunakan 20 data nyata dari titik pembuangan limbah UMKM Pesona Batik Jombang.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Implementasi Perangkat Keras dan Lunak

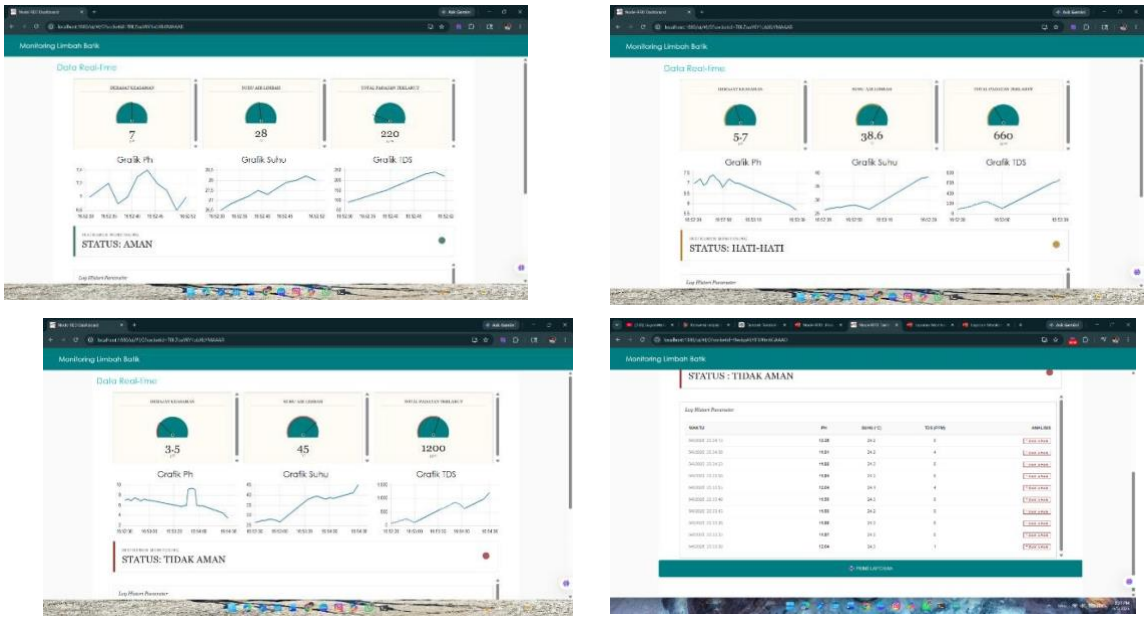
Perangkat keras sistem berhasil dirakit dalam satu unit di dalam *box waterproof*, terdiri atas ESP32 Dev Module sebagai pusat pemrosesan, sensor pH PH4502C, sensor suhu DS18B20, sensor TDS DFRobot Gravity Analog V1.0, dan LCD 16×2 dengan modul I2C. Sumber daya menggunakan baterai Li-Po 5V. Gambar 3 menampilkan diagram wiring sistem.



Gambar 3. Diagram Wiring Perangkat Keras Sistem Monitoring

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE untuk ESP32 dan Node-RED untuk visualisasi *dashboard*. Program pada ESP32 mencakup fungsi pembacaan sensor, kalibrasi linier, klasifikasi *thresholding* bertingkat dengan fungsi minimum, pengiriman data via MQTT, dan tampilan lokal pada LCD. Payload JSON dikirim ke topik *limbah/batik* setiap 5 detik dengan format: *{"ph":7.2, "suhu":36.1, "tds":580, "K":1, "status":"Aman", "timestamp":"..."}*. Gambar 4 menampilkan tampilan *dashboard* Node-RED hasil implementasi.

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)



Gambar 4. Tampilan Dashboard Node-RED

4.2. Hasil Kalibrasi Sensor

Kalibrasi dilakukan terhadap ketiga sensor menggunakan metode *two-point linear calibration*. Tabel 3 merangkum persamaan kalibrasi, nilai MAPE, dan akurasi masing-masing sensor.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Kalibrasi Sensor

No	Sensor	Persamaan Kalibrasi	MAPE (%)	Akurasi (%)	Keterangan
1	pH PH4502C	Y' = −3,37X + 13,78	1,86	98,14	Sangat Akurat
2	Suhu DS18B20	Y' = 0,943X + 0,61	0,37	99,63	Sangat Akurat
3	S DFRobot Gravity	Y' = 1,1111X − 33,33	2,20	97,80	Sangat Akurat

Keseluruhan nilai MAPE ketiga sensor berada jauh di bawah ambang toleransi 5%. Nilai MAPE terendah dicapai oleh sensor suhu DS18B20 (0,37%) karena sensor ini menggunakan komunikasi digital *one-wire* yang lebih stabil dibandingkan sensor berbasis ADC analog. Nilai MAPE sensor TDS (2,20%) sedikit lebih tinggi karena dipengaruhi oleh variasi ADC ESP32 dan kompensasi suhu. Meskipun demikian, seluruh sensor dinyatakan layak digunakan untuk keperluan monitoring kualitas air limbah.

4.3. Hasil Pengujian Metode Thresholding Bertingkat

Tabel 4 menyajikan hasil pengujian lapangan menggunakan 20 sampel data nyata yang diambil dari saluran pembuangan limbah cair UMKM Pesona Batik Jombang selama proses produksi berlangsung.

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Tabel 4. Hasil Pengujian Lapangan (20 Sampel Data Nyata)

No	pH	Suhu (°C)	TDS (mg/L)	f(pH)	f(T)	f(TDS)	K	Status
1	7,0	30	450	1	1	1	1	AMAN
2	5,9	32	500	0,5	1	1	0,5	HATI-HATI
3	9,5	33	550	0,5	1	1	0,5	HATI-HATI
4	7,2	39	580	1	0,5	1	0,5	HATI-HATI
5	5,0	37	950	0	1	0	0	TIDAK AMAN
6	7,0	36	1000	1	1	0	0	TIDAK AMAN
7	4,7	26,5	1087	0	1	0	0	TIDAK AMAN
8	5,3	30	1015	0	1	0	0	TIDAK AMAN
9	4,7	28	1093	0	1	0	0	TIDAK AMAN
10	5,5	39	650	0,5	0,5	0,5	0,5	HATI-HATI
11	6,8	31	520	1	1	1	1	AMAN
12	8,4	35	580	1	1	1	1	AMAN
13	5,7	34	570	0,5	1	1	0,5	HATI-HATI
14	9,3	36	590	0,5	1	1	0,5	HATI-HATI
15	7,1	39	570	1	0,5	1	0,5	HATI-HATI
16	7,8	37	750	1	1	0,5	0,5	HATI-HATI
17	5,2	35	700	0	1	0,5	0	TIDAK AMAN
18	7,4	41	550	1	0	1	0	TIDAK AMAN
19	5,0	42	1100	0	0	0	0	TIDAK AMAN
20	10,0	37	850	0	1	0,5	0	TIDAK AMAN

Tabel 5. Rekapitulasi Akurasi Klasifikasi Thresholding per Kategori

Kategori Status	Jumlah Data	Klasifikasi Benar	Persentase Keberhasilan
Aman	3	3	100%
Hati-hati	8	8	100%
Tidak Aman	9	9	100%
Total	20	20	100%

Dari 20 sampel data lapangan diperoleh distribusi 3 data AMAN, 8 data HATI-HATI, dan 9 data TIDAK AMAN. Seluruh data diklasifikasikan dengan benar oleh sistem tanpa kesalahan, sehingga akurasi klasifikasi mencapai 100%, melampaui kriteria kelayakan minimal 90% yang ditetapkan.

4.4. Pembahasan

Penelitian ini memperkuat dan melengkapi penelitian terdahulu dalam bidang monitoring kualitas air berbasis IoT. Sugiharto *et al.* [4] mengembangkan sistem monitoring tanpa mekanisme klasifikasi berbasis regulasi, sehingga pengguna harus menginterpretasikan data secara manual. Penelitian ini membuktikan bahwa penambahan metode *thresholding* bertingkat berbasis regulasi secara signifikan

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

meningkatkan nilai informatif sistem — sistem langsung memberikan status yang dapat ditindaklanjuti tanpa keahlian teknis.

Pratama dan Qodri [5] menggunakan notifikasi biner (aman/tidak aman). Penelitian ini membuktikan bahwa zona peringatan dini (status HATI-HATI, K = 0,5) memberikan nilai praktis yang bermakna: pengelola mendapat jendela waktu untuk melakukan tindakan korektif sebelum kondisi kritis. Iswanto *et al.* [6] mengembangkan sistem dengan kompleksitas tinggi yang kurang sesuai untuk UMKM. Penelitian ini membuktikan bahwa sistem berbasis ESP32 berbiaya rendah dapat memberikan fungsionalitas monitoring yang memadai.

Penggunaan fungsi minimum K = min(f(pH), f(T), f(TDS)) pada Persamaan (1) terbukti efektif mengimplementasikan prinsip *worst-case scenario*. Sebagai contoh konkret pada sampel no. 6 (pH = 7,0; Suhu = 36°C; TDS = 1000 mg/L): dua parameter berada dalam rentang aman (f(pH) = 1; f(T) = 1) namun TDS melampaui batas (f(TDS) = 0), sehingga K = min(1, 1, 0) = 0 dan sistem mengklasifikasikan kondisi sebagai TIDAK AMAN. Hal ini membuktikan keunggulan fungsi minimum dibandingkan pendekatan rata-rata yang dapat menyembunyikan kondisi berbahaya.

Dari aspek komunikasi dan stabilitas, pembaruan data LCD berlangsung dalam waktu kurang dari 1 detik setelah pembacaan sensor, sedangkan pembaruan *dashboard* Node-RED terjadi dalam rentang 1–3 detik bergantung kondisi jaringan. Komunikasi MQTT melalui *broker* Mosquitto berjalan stabil selama pengujian dengan tingkat keberhasilan pengiriman data 100%. Arsitektur *dual-output* (LCD lokal + *dashboard* web) terbukti berfungsi sebagaimana mestinya, termasuk saat terjadi gangguan jaringan.

Terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, sistem hanya mengukur tiga parameter (pH, suhu, TDS), sementara kualitas air limbah batik juga dipengaruhi BOD, COD, kekeruhan, dan logam berat. Kedua, kalibrasi dua titik mengasumsikan respons sensor linier di seluruh rentang sehingga akurasi pada nilai ekstrem perlu diverifikasi lebih lanjut. Ketiga, pengujian lapangan dilakukan dalam rentang waktu terbatas sehingga belum merepresentasikan seluruh variasi kondisi limbah sepanjang tahun.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan membangun sistem monitoring kualitas air limbah berbasis IoT dengan metode *thresholding* bertingkat pada UMKM Pesona Batik Jombang. Tiga kesimpulan utama dapat ditarik.

Pertama, sistem monitoring berbasis IoT berhasil direalisasikan menggunakan ESP32 Dev Module, sensor pH PH4502C, sensor suhu DS18B20, dan sensor TDS DFRobot Gravity Analog V1.0, dengan komunikasi MQTT dan platform Node-RED. Sistem beroperasi secara *real-time* dengan interval 5 detik melalui arsitektur *dual-output*: LCD 16×2 lokal dan *dashboard* web.

Kedua, metode *thresholding* bertingkat berbasis fungsi minimum K = min(f(pH), f(T), f(TDS)) pada Persamaan (1) berhasil mengklasifikasikan kondisi air menjadi tiga kategori dengan nilai ambang batas bersumber dari regulasi resmi. Validasi desain melalui simulasi 10 skenario *boundary condition testing* menunjukkan

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

akurasi 100%.

Ketiga, akurasi sistem berada pada kategori sangat baik. Kalibrasi sensor menghasilkan MAPE 1,86% (pH), 0,37% (suhu), dan 2,20% (TDS), seluruhnya di bawah toleransi 5%. Pengujian lapangan pada 20 data nyata menunjukkan akurasi klasifikasi 100% pada seluruh kategori status, membuktikan kelayakan sistem untuk digunakan pada lingkungan operasional nyata.

Untuk pengembangan selanjutnya disarankan: (1) penambahan parameter BOD, COD, dan kekeruhan; (2) kalibrasi multi-titik untuk rentang nilai lebih luas; (3) integrasi platform *cloud* publik agar data dapat diakses dari mana saja; serta (4) mekanisme *adaptive threshold* berbasis data historis.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Kementerian Lingkungan Hidup RI, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup RI Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah," Jakarta: KLH, 2014.

[2] Republik Indonesia, "Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup," Lembaran Negara RI Tahun 2009 Nomor 140, 2009.

[3] A. Syahfitri, "Internet of Things (IoT), Sejarah, Teknologi, dan Penerapannya," Uranus: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, Sains dan Informatika, vol. 3, no. 1, pp. 113-120, 2025.

[4] W. H. Sugiharto, H. Susanto, and A. B. Prasetijo, "Real-Time Water Quality Assessment via IoT: Monitoring pH, TDS, Temperature, and Turbidity," Ingenierie des Systemes d Information, vol. 28, no. 4, pp. 823-831, 2023.

[5] B. G. Pratama and M. F. Qodri, "Sistem Monitoring Kualitas Air Limbah Industri Plastik Berbasis Internet of Things," Jurnal KURVATEK, vol. 8, no. 2, pp. 45-52, 2023.

[6] Iswanto, F. Hunaini, and D. U. Effendy, "Prototype Monitoring and Controlling of Wastewater Treatment Plant (WWTP) Berbasis IoT," Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA, vol. 7, no. 1, pp. 21-29, 2023.

[7] World Health Organization, Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda. Geneva: WHO, 2022.

[8] M. D. Kainama and H. D. Purnomo, "Implementasi sistem monitoring kualitas air berbasis IoT pada penampung mata air di daerah Larier Ambon," AITI: Jurnal Teknologi Informasi, vol. 22, no. 2, pp. 206-220, 2025.

[9] I. Albanna and B. Kurniawan, "Komunikasi Multi-Perangkat dan Manajemen Aliran Data dalam Sistem Internet of Things Menggunakan Node-Red," Jurnal Riset Inovasi Bidang Informatika dan Pendidikan Informatika (KERNEL), vol. 4, no. 1, pp. 51-60, 2023.

[10] R. M. R. Akbar, T. Y. Arif, and M. Irhamsyah, "Analisis Performansi Protokol MQTT Pada Sistem Pemantauan Kualitas Udara Ruangan Berbasis IoT," KITEKTRO: Jurnal Komputer, Informasi Teknologi, dan Elektro, vol. 8, no. 3, pp. 102-109, 2023.

[11] M. F. Kahfi and Sujono, "Implementasi Internet of Things Berbasis ESP32 dan Blynk untuk Monitoring Mikroklimat Ruang Hunian," Jurnal Sains Student Research (JSSR), vol. 4, no. 1, pp. 616-621, 2026.

[12] P. Marpaung, M. Jannah, and B. Sinaga, "Implementasi Metode Thresholding Dalam Mengenali Bentuk Citra Buah Salak," Jurnal Media Informatika (JUMIN), vol. 6, no. 3, pp. 2227-2235, 2025.

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

[13] J. H. Sipakkar et al., "Reduction of Total Dissolved Solids (TDS) in Tapioca Industrial Wastewater Using The Fine-Bubble Aerator Method," Journal of Industrial Innovation, vol. 10, no. 1, pp. 12-19, 2024.

[14] A. L. Sidiq, K. Dewi, B. J. Nugroho, and P. S. P. Pranida, "Integrasi Sistem IoT Berbasis Multi-Sensor untuk Pemantauan Real-Time Kualitas Air Limbah," Jurnal Kumparan Fisika, vol. 7, no. 2, pp. 88-95, 2024.

[15] D. Arianto, A. R. Putra, and F. Saputra, "Rancang bangun sistem monitoring pH air limbah industri tahu berbasis IoT menggunakan ESP32," Jurnal Rekayasa Sistem dan Teknologi, vol. 9, no. 1, pp. 45-53, 2025.

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)