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

Pengembangan Aplikasi Pengukur Kualitas Air Berbasis IoT Menggunakan Metode Support Vector Machine (SVM)

Ni Kadek Dwi Marhaeni[a1], I Made Widiartha[a2], I Wayan Santiyasa[a3], Luh Arida Ayu Rahning Putri[a4]

[a]Program Studi Informatika, FMIPA, Universitas Udayana
Bukit Jimbaran, Badung, Bali, Indonesia
[a1]marhaeni.2208561008@student.unud.ac.id
[a2]madewidiartha@unud.ac.id
[a3]santiyasa@unud.ac.id
[a4]rahningputri@unud.ac.id

Abstract

Manual monitoring of bore well water quality requires considerable time and is unable to provide real-time information, thereby posing potential risks to public health. This study develops Waterlytics, an Internet of Things (IoT)-based bore well water quality monitoring system that integrates Support Vector Machine (SVM) classification with a Radial Basis Function (RBF) kernel. The system utilizes a NodeMCU ESP8266 microcontroller equipped with a TDS Meter V1.0 sensor, Turbidity Sensor, and DS18B20 temperature sensor connected through an ADS1115 module. Sensor data are transmitted every 10 seconds to a Flask REST API server, stored in a MySQL database, and automatically classified into three water quality categories based on the Indonesian Ministry of Health Regulation No. 2 of 2023 standards. The SVM model parameters were optimized using Grid Search Cross-Validation with k-fold=5. Classification results are visualized through an interactive Flask-based web dashboard and delivered as automatic notifications via a Telegram Bot. The results indicate that the SVM model achieved an accuracy of 93.94% with optimal parameters of C=10 and gamma=10, exceeding the minimum target of 85%. Sensor validation against laboratory reference values from the Bali Provincial Environmental and Forestry Agency (DKLH) showed deviations below 2% for all measured parameters. Furthermore, both Black Box testing (25 scenarios) and White Box testing (19 logic cases) were successfully completed.

Keywords: *Internet of Things (IoT), Water Quality Monitoring, Support Vector Machine (SVM), Radial Basis Function (RBF), NodeMCU ESP8266, Flask, MySQL, Telegram Bot.*

1. Pendahuluan

Air bersih merupakan kebutuhan dasar manusia yang fundamental dan menjadi salah satu tantangan utama dalam pembangunan berkelanjutan di Indonesia. Berdasarkan data Kementerian Kesehatan, sebagian besar masyarakat Indonesia masih mengandalkan air sumur bor sebagai sumber air utama untuk kebutuhan sehari-hari [1]. Air sumur bor di kawasan padat penduduk seperti Jimbaran, Bali rentan terhadap pencemaran yang sulit terdeteksi secara visual maupun manual [2], sehingga berpotensi menimbulkan risiko kesehatan yang serius bagi masyarakat yang mengonsumsinya [3].

Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan menetapkan parameter kualitas air untuk keperluan *higiene* sanitasi, di antaranya *Total Dissolved Solids* (TDS) dengan batas maksimum 300 mg/L, *turbidity* (kekeruhan) dengan batas 3 NTU, dan suhu air dalam rentang 22–28°C [1]. Pemantauan parameter-parameter tersebut secara manual membutuhkan waktu, tenaga, dan biaya laboratorium yang tidak sedikit, sehingga tidak memungkinkan dilakukan secara terus-menerus dan *real-time*.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) membuka peluang untuk membangun sistem monitoring kualitas air yang otomatis, berkelanjutan, dan berbiaya rendah. Beberapa penelitian terdahulu telah memanfaatkan IoT untuk monitoring kualitas air. Mulia *et al*., (2025) mengembangkan AQUAMONITOR menggunakan NodeMCU ESP8266 dengan sensor TDS dan suhu yang terintegrasi dengan platform Blynk, mencapai akurasi sensor 98–99% setelah kalibrasi namun belum menerapkan klasifikasi otomatis [4]. Setiawati dan Fitriyani (2025) mengembangkan sistem monitoring *real-time*

berbasis NodeMCU ESP32 dengan notifikasi Telegram, namun hanya menggunakan ambang batas statis tanpa *machine learning* [5]. Chuzaini dan Dzulkiflih (2022) mengembangkan sistem monitoring IoT berbasis *cloud* dengan sensor pH, TDS, dan suhu, namun belum dilengkapi fitur klasifikasi dan *dashboard* web [6].

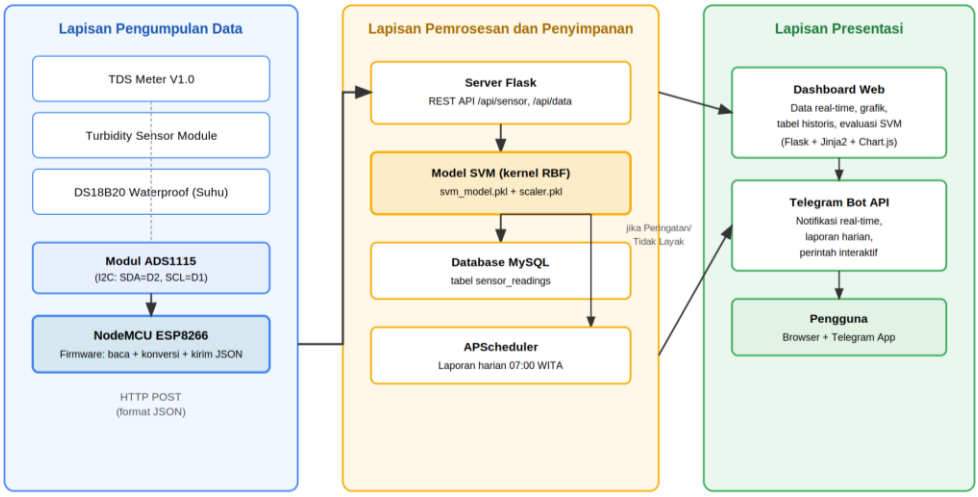
Prasetyo *et al*, (2025) mengembangkan sistem monitoring kualitas air sumur berbasis IoT dengan Logika Fuzzy Sugeno yang mencapai akurasi 92%, namun metode ini bergantung pada aturan manual sehingga kurang adaptif terhadap pola data baru [7]. Pendekatan *machine learning* yang lebih adaptif diperlukan untuk meningkatkan akurasi dan fleksibilitas sistem klasifikasi kualitas air.

Support Vector Machine (SVM) merupakan algoritma *machine learning* yang terbukti efektif untuk masalah klasifikasi dengan data berdimensi tinggi dan jumlah data yang relatif terbatas [8]. Leli *et al*, (2023) menerapkan SVM dengan kernel RBF untuk klasifikasi data tabular dan menghasilkan akurasi yang tinggi [9]. Fatmawati dan Rifai (2023) membuktikan bahwa optimasi parameter SVM menggunakan *Grid Search Cross-Validation* secara signifikan meningkatkan akurasi dari 80% menjadi 86,17% [10].

Berdasarkan gap yang teridentifikasi pada penelitian terdahulu, penelitian ini mengembangkan Waterlytics sistem monitoring kualitas air sumur bor berbasis IoT yang mengintegrasikan klasifikasi SVM dengan optimasi *Grid Search Cross-Validation*, *dashboard* web interaktif berbasis Flask, dan sistem notifikasi Telegram Bot dengan fitur laporan *screening* harian otomatis. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan sistem monitoring kualitas air yang lebih akurat, adaptif, dan informatif dibandingkan sistem-sistem sebelumnya.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan pengembangan sistem perangkat lunak. Arsitektur sistem Waterlytics terdiri dari tiga lapisan utama sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



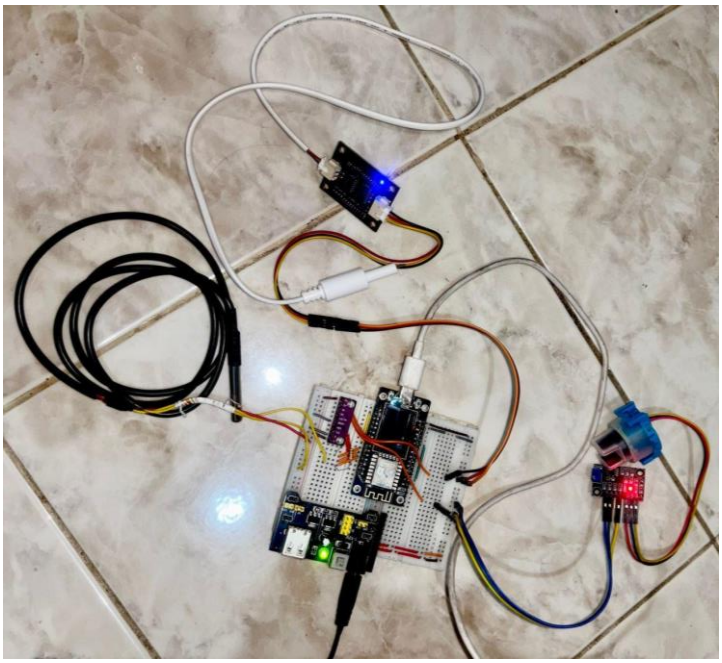
Gambar 1. Arsitektur Sistem Waterlytics

Gambar 1 mengilustrasikan arsitektur tiga lapisan sistem Waterlytics. Lapisan perangkat keras menangani akuisisi data dari sensor fisik melalui NodeMCU ESP8266. Lapisan *backend* memproses klasifikasi menggunakan model SVM, menyimpan data ke MySQL, dan mengintegrasikan notifikasi Telegram. Lapisan presentasi menyampaikan informasi kepada pengguna melalui dashboard web interaktif dan Telegram Bot.

2.1 Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras sistem Waterlytics dirakit pada *breadboard* dan terdiri dari NodeMCU ESP8266 sebagai mikrokontroler utama [11], modul ADS1115 16-bit ADC untuk konversi sinyal analog, sensor TDS Meter V1.0 untuk mengukur kadar zat terlarut, *Turbidity* Sensor untuk mengukur kekeruhan air, dan sensor suhu DS18B20 Waterproof untuk mengukur temperatur [12]. Seluruh komponen mendapatkan suplai daya dari modul MB102 *Breadboard* Power Supply. Skema rangkaian ditunjukkan pada Gambar 2 dan koneksi pin dirincikan pada Tabel 1.

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



Gambar 2. Rakitan Perangkat Keras Sistem Waterlytics

Gambar 2 menunjukkan rakitan perangkat keras sistem Waterlytics di mana sensor TDS dan *Turbidity* terhubung ke modul ADS1115 melalui koneksi analog (A1 dan A0), sementara ADS1115 berkomunikasi dengan ESP8266 melalui protokol I2C (SDA=D2, SCL=D1). Sensor DS18B20 terhubung langsung ke pin D4 (GPIO2) ESP8266 melalui protokol 1-Wire dengan resistor pull-up 4,7kΩ.

No	Komponen	Pin Komponen	Pin ESP8266/ADS1115	Protokol
1	ADS1115	SDA	D2 (GPIO4)	I2C
2	ADS1115	SCL	D1 (GPIO5)	I2C
3	ADS1115	VDD	3,3V	Power
4	ADS1115	ADDR	GND	I2C Address
5	Sensor TDS	Signal	A1 (ADS1115)	Analog
6	Turbidity Sensor	Signal	A0 (ADS1115)	Analog
7	DS18B20	Data	D4 (GPIO2)	1-Wire

Tabel 1. Koneksi Pin Perangkat Keras Sistem Waterlytics

2.2 Pengumpulan Data dan *Preprocessing*

Dataset dikumpulkan dari sumur bor di Jl. By Pass Ngurah Rai No. 2, Jimbaran, Bali selama 7 hari (1–7 Maret 2026) dengan interval pencatatan kurang lebih 30 menit, menghasilkan 330 rekaman data. Setiap rekaman terdiri dari tiga fitur: TDS (mg/L), *turbidity* (NTU), dan suhu (°C). Tahapan *preprocessing* yang dilakukan meliputi:

a. Pemeriksaan *missing values,* tidak ditemukan *missing values* pada seluruh rekaman.
b. Deteksi *outlier* menggunakan metode Interquartile Range (IQR), ditemukan 22 outlier pada fitur *turbidity* yang dipertahankan sebagai nilai valid di lapangan.
c. Normalisasi *Min-Max Scaling* untuk mengubah rentang nilai setiap fitur ke [0, 1].

Pelabelan data dilakukan berdasarkan ambang batas Permenkes RI No. 2 Tahun 2023. Distribusi kelas hasil pelabelan disajikan pada Tabel 2. Distribusi kelas yang relatif seimbang (34,5% : 32,1% : 33,3%) merupakan kondisi ideal untuk pelatihan model SVM karena meminimalkan risiko bias klasifikasi.

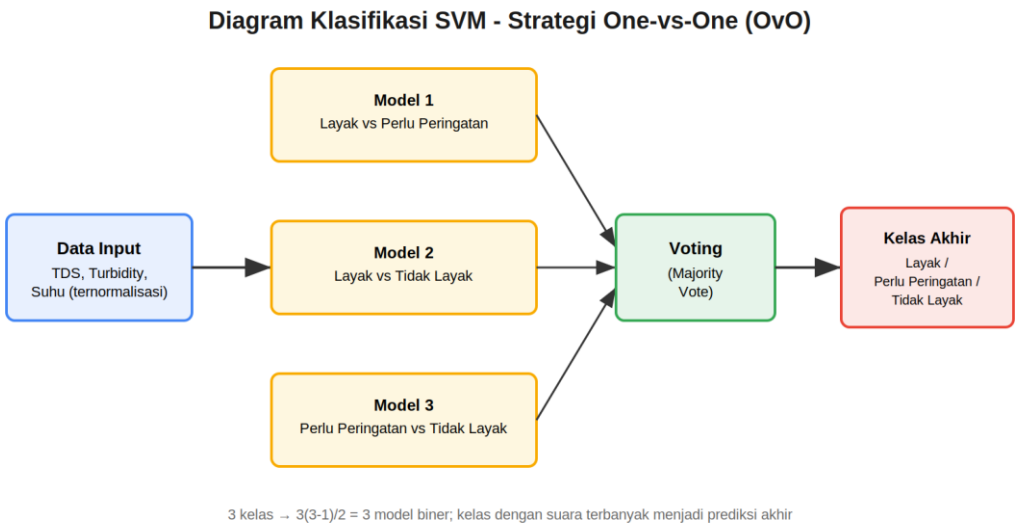
Tabel 2. Distribusi Kelas Hasil Pelabelan Data

Kelas	Kondisi TDS	Kondisi Turbidity	Jumlah Data	Persentase
Layak	< 250 mg/L DAN	< 2 NTU	114	34,5%
Perlu Peringatan	250–300 mg/L ATAU	2–3 NTU	106	32,1%
Tidak Layak	> 300 mg/L ATAU	> 3 NTU	110	33,3%
Total			330	100%

2.3 Model SVM dengan *Grid Search Cross-Validation*

Model SVM menggunakan kernel *Radial Basis Function* (RBF) dengan strategi multi kelas *OnevsOne* (OvO). Kernel RBF dipilih karena hubungan antara parameter sensor dengan kelas kualitas air bersifat non-linear, sehingga tidak dapat dipisahkan dengan *hyperplane* linear sederhana. Dua *hyperparameter* utama yang dioptimasi adalah parameter regularisasi C dan koefisien kernel gamma.

Optimasi parameter dilakukan menggunakan *Grid Search Cross-Validation* dengan *Stratified* K-*Fold* (k=5) untuk menjaga proporsi kelas pada setiap *fold*. Ruang pencarian parameter yang diuji adalah C ∈ {0,1; 1; 10; 100; 1000} dan gamma ∈ {0,001; 0,01; 0,1; 1; 10}, menghasilkan 25 kombinasi parameter. Total proses fitting yang dilakukan adalah 25 kombinasi × 5 fold = 125 kali proses training dan evaluasi. Dataset dibagi dengan rasio 80:20 menggunakan *stratified random sampling* menghasilkan 264 data latih dan 66 data uji.



Gambar 3. Diagram Klasifikasi SVM Strategi *One-vs-One* (OvO)

Gambar 3 menunjukkan strategi klasifikasi multi-kelas *One-vs-One* (OvO) yang digunakan model SVM. Karena terdapat tiga kelas, dibentuk 3(3-1)/2 = 3 model biner, yaitu Layak vs Perlu Peringatan, Layak vs Tidak Layak, dan Perlu Peringatan vs Tidak Layak. Ketiga nilai sensor ternormalisasi (TDS, *turbidity*, dan suhu) dievaluasi oleh seluruh model biner, kemudian kelas dengan suara terbanyak (*majority vote*) ditetapkan sebagai prediksi akhir.

2.4 Implementasi Sistem Backend dan Frontend

Backend diimplementasikan menggunakan *framework* Flask Python [13] dengan dua *endpoint* utama:

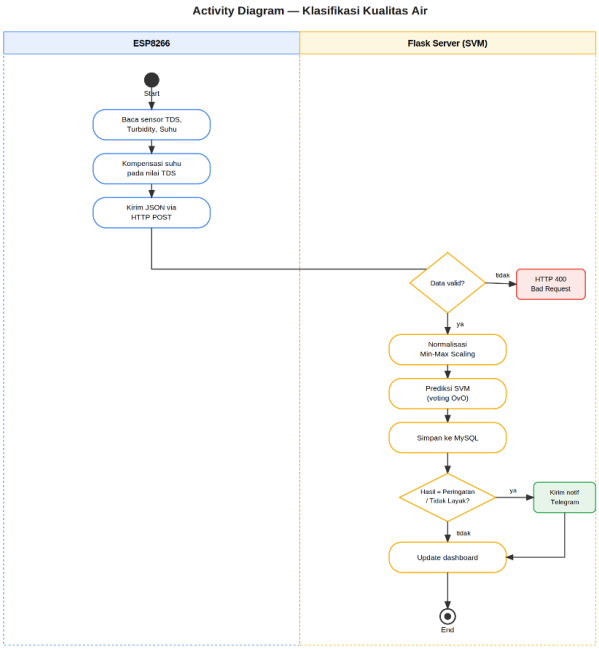
a. POST /api/sensor untuk menerima data dari ESP8266 dan menjalankan prediksi SVM secara *real-time*.
b. GET /api/data untuk mengembalikan 50 data historis terbaru.

Flask dikonfigurasi dengan host='0.0.0.0' agar dapat diakses dari seluruh perangkat dalam jaringan yang sama, termasuk NodeMCU ESP8266. *Dashboard* web Waterlytics dibangun menggunakan HTML5, CSS3, dan JavaScript dengan *library* Chart.js untuk visualisasi data. *Dashboard* menampilkan kartu status klasifikasi SVM dengan indikator warna, tiga kartu sensor dengan progress *bar persentase* terhadap ambang batas Permenkes, grafik tren historis untuk 50 data terbaru, donut

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

chart distribusi klasifikasi, tabel riwayat data, dan fitur unduh CSV. Halaman Evaluasi SVM menampilkan *confusion matrix* interaktif dan bar chart perbandingan metrik per kelas.

Telegram Bot (@waterlytics_monitor_bot) diimplementasikan dengan mekanisme *long polling* di *background thread* menggunakan APScheduler. Bot mendukung perintah /status untuk menampilkan data sensor terkini, /laporan untuk menampilkan tabel statistik harian, dan tombol *inline Refresh* yang memperbarui data tanpa mengirim pesan baru. Laporan *screening* harian dikirim otomatis setiap pukul 07.00 WITA.



Gambar 4. *Activity* Diagram Alur Klasifikasi Kualitas Air

Gambar 4 menyajikan activity diagram alur klasifikasi yang dibagi menjadi dua swimlane, yaitu ESP8266 dan Flask Server. ESP8266 membaca sensor TDS, *turbidity*, dan suhu, menerapkan kompensasi suhu pada nilai TDS, lalu mengirim data dalam format JSON melalui HTTP POST. Flask Server memvalidasi data, menormalisasi dengan *Min-Max Scaling*, menjalankan prediksi SVM, dan menyimpan hasil ke MySQL. Apabila hasil klasifikasi tergolong Perlu Peringatan atau Tidak Layak, sistem mengirimkan notifikasi Telegram sebelum memperbarui dashboard.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Validasi Sensor

Validasi sensor dilakukan dengan membandingkan nilai pembacaan sensor IoT terhadap nilai referensi hasil uji laboratorium Dinas Kehutanan dan Lingkungan Hidup (DKLH) Provinsi Bali pada sampel air yang sama yang diambil dari sumur bor di lokasi penelitian. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Validasi Sensor IoT terhadap Laboratorium DKLH Provinsi Bali

Parameter	Nilai Sensor IoT	Nilai Lab DKLH	Selisih Absolut	Deviasi (%)
Suhu (°C)	22,59	22,60	0,01	0,04%
Turbidity (NTU)	2,35	2,38	0,03	1,26%
TDS (mg/L)	338,30	343,50	5,20	1,51%

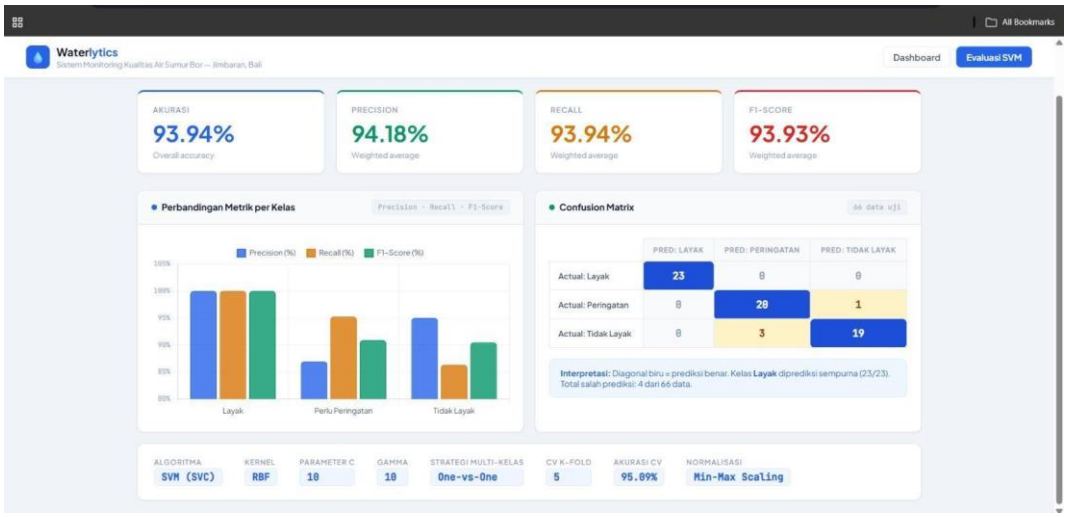
Berdasarkan Tabel 3, seluruh sensor menunjukkan deviasi di bawah 2% terhadap nilai referensi laboratorium. Sensor suhu DS18B20 memiliki deviasi terkecil (0,04%), diikuti sensor turbidity (1,26%) dan sensor TDS (1,51%). Rendahnya deviasi sensor TDS dipengaruhi oleh implementasi kompensasi suhu dalam firmware menggunakan koefisien 0,02 per derajat Celsius, yang meminimalkan pengaruh fluktuasi suhu terhadap konduktivitas air. Hasil validasi ini membuktikan bahwa sistem sensor IoT Waterlytics memberikan pengukuran yang andal dan sebanding dengan standar laboratorium resmi.

3.2. Hasil Evaluasi Model SVM

Proses *Grid Search Cross-Validation* berhasil mengidentifikasi kombinasi parameter optimal C=10 dan gamma=10 dengan rata-rata akurasi *cross-validation* sebesar 95,09%. Hasil evaluasi model pada 66 data uji yang tidak pernah digunakan selama training disajikan pada Tabel 4, sementara visualisasi *confusion matrix* dan metrik per kelas ditampilkan pada Gambar 5.

Tabel 4. Hasil Evaluasi Model SVM

Kelas	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)	Support
Layak	100,00	100,00	100,00	23
Perlu Peringatan	86,96	95,24	90,91	21
Tidak Layak	95,00	86,36	90,48	22
Rata-rata Berbobot	94,18	93,94	93,93	66
Akurasi Keseluruhan			93,94%	66



Gambar 5. Visualisasi *Confusion Matrix* dan Metrik Evaluasi pada Halaman Evaluasi Waterlytics

Gambar 5 menunjukkan *confusion matrix* di mana nilai diagonal merepresentasikan prediksi yang benar. Dari 66 data uji, model hanya melakukan 4 kesalahan prediksi 1 data Perlu Peringatan diprediksi sebagai Tidak Layak, dan 3 data Tidak Layak diprediksi sebagai Perlu Peringatan. Kelas Layak diprediksi sempurna (*precision*, *recall*, F1, 100%) karena nilai parameternya jauh di bawah ambang batas sehingga mudah dibedakan dari kelas lainnya.

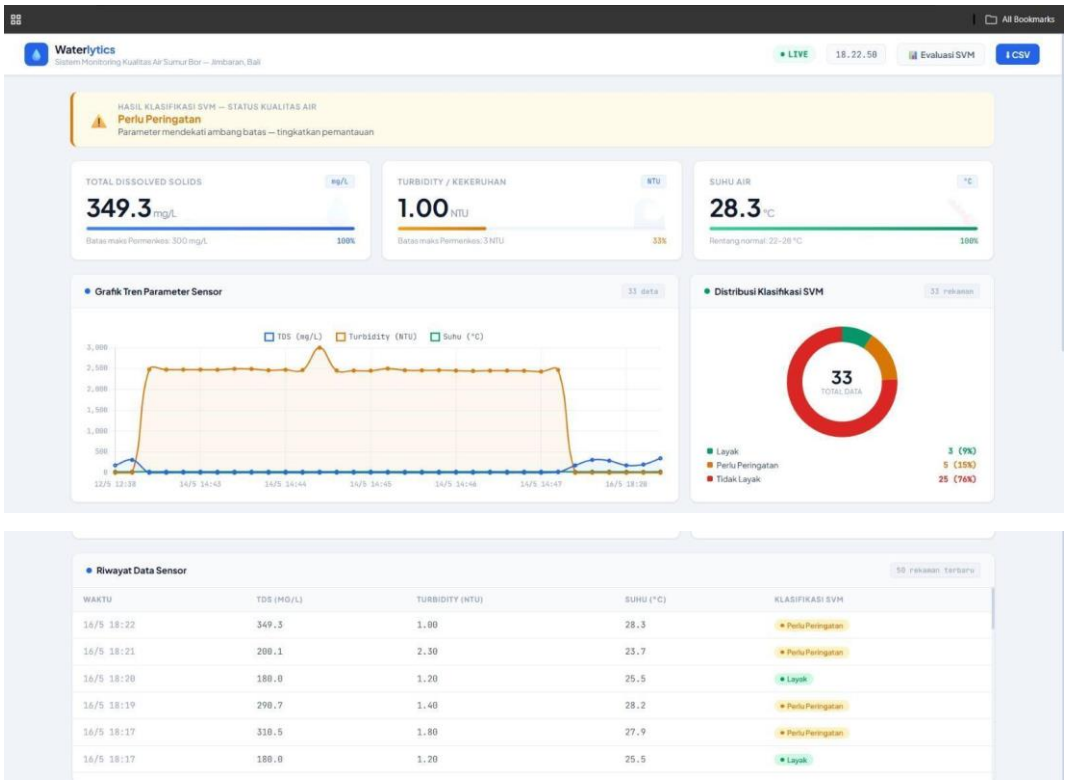
Kesalahan prediksi hanya terjadi antara kelas Perlu Peringatan dan Tidak Layak. Penelusuran terhadap karakteristik data menunjukkan bahwa kesalahan ini bukan sekadar akibat nilai TDS dan *turbidity* yang berdekatan, melainkan disebabkan oleh struktur aturan pelabelan yang bersifat OR pada kedua fitur tersebut. Kelas Perlu Peringatan didefinisikan oleh TDS 250–300 mg/L ATAU *turbidity* 2–3 NTU, sedangkan kelas Tidak Layak didefinisikan oleh TDS lebih dari 300 mg/L ATAU *turbidity* lebih dari 3 NTU, sehingga label kelas dapat ditentukan oleh salah satu fitur saja tanpa mempertimbangkan fitur lainnya. Akibatnya, data pada kedua kelas ini tidak membentuk kelompok yang kompak dalam ruang fitur, melainkan tersebar sesuai fitur mana yang memicu label, sehingga wilayah kedua kelas saling tumpang tindih di sekitar titik potong TDS=300 mg/L dan *turbidity*=3 NTU. Kondisi ini diperberat oleh variasi alami pengukuran sensor IoT, termasuk 22 data *outlier* valid pada fitur *turbidity* yang sebagian besar berada pada rentang tersebut, sehingga selisih nilai yang sangat kecil, misalnya TDS 299 mg/L dan TDS 301 mg/L, dapat menghasilkan label kelas yang berbeda meskipun kondisi air secara fisik hampir tidak berbeda. Karakteristik data semacam ini membuat *hyperplane* SVM sulit membentuk batas pemisah yang tegas antara kedua kelas, karena SVM mengoptimalkan margin berdasarkan kedekatan vektor data pada ruang fitur, sementara label pada data justru ditentukan oleh aturan ambang per-fitur yang independen.

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

Selisih kecil antara akurasi CV (95,09%) dan akurasi testing (93,94%) hanya 1,15% mengindikasikan bahwa model tidak mengalami *overfitting* yang signifikan dan mampu melakukan generalisasi dengan baik terhadap data baru.

3.3. Hasil Implementasi Dashboard Web dan Telegram Bot

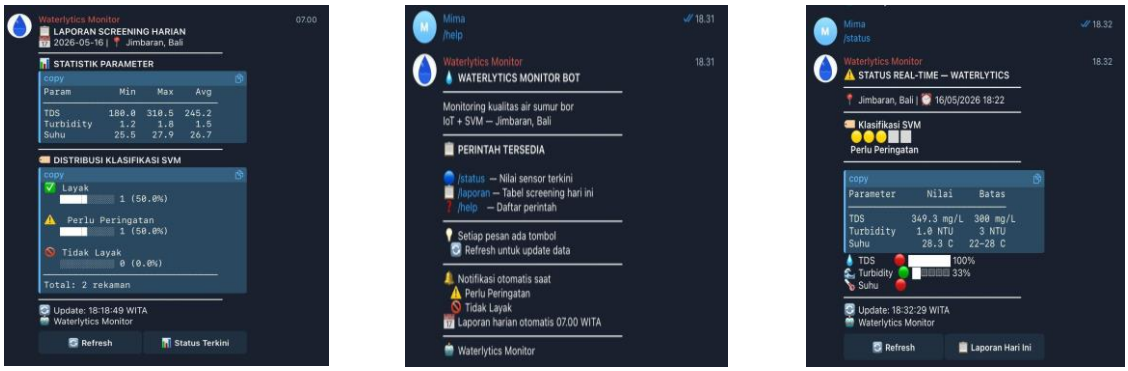
Dashboard web Waterlytics berhasil diimplementasikan dan menampilkan data kualitas air secara *real-time*. Antarmuka dashboard ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Antarmuka Dashboard Web Waterlytics

Gambar 6 menunjukkan antarmuka *dashboard* Waterlytics yang menampilkan status klasifikasi SVM terkini dengan indikator warna (hijau “Layak”, kuning “Perlu Peringatan”, merah “Tidak Layak”), tiga kartu sensor dengan nilai *real-time* dan *progress bar persentase* terhadap ambang batas Permenkes, grafik tren historis Chart.js untuk 50 rekaman terbaru, serta *donut chart* distribusi klasifikasi yang memperlihatkan proporsi setiap kelas secara visual.

Sistem notifikasi Telegram Bot Waterlytics berhasil mengirimkan peringatan otomatis dan laporan harian kepada pengguna. Tampilan Telegram Bot ditunjukkan pada Gambar 7.





Gambar 7. Antarmuka Notifikasi dan Perintah Telegram Bot Waterlytics

Gambar 7 menunjukkan Telegram Bot Waterlytics yang mengirimkan notifikasi peringatan lengkap dengan tabel nilai parameter dan indikator warna saat kualitas air terdeteksi Tidak Layak atau Perlu Peringatan. Perintah /status menampilkan nilai sensor terkini, klasifikasi SVM, dan progress bar dalam format yang mudah dibaca. Tombol inline Refresh memperbarui data tanpa mengirimkan pesan baru ke chat, menjaga tampilan lebih bersih dan efisien.

3.4. Hasil Pengujian Sistem

Pengujian fungsional dilakukan menggunakan dua metode, *Black Box Testing* untuk menguji perilaku eksternal sistem, dan *White Box Testing* untuk menguji logika internal kode program [14]. Pengujian *Black Box* mencakup 25 skenario dalam 6 kelompok:

a. Pengiriman data sensor (BB-01 s/d BB-04)
b. Penyimpanan database (BB-05 s/d BB-07)
c. Prediksi SVM (BB-08 s/d BB-11)
d. Fungsionalitas dashboard (BB-12 s/d BB-17)
e. Notifikasi Telegram (BB-18 s/d BB-22)
f. Validasi sensor (BB-23 s/d BB-25).

Seluruh 25 skenario menunjukkan hasil Berhasil.

Pengujian *White Box* mencakup 19 kasus logika dalam 6 kelompok yang menguji fungsi-fungsi utama:

a. receive_sensor()
b. kirim_telegram()
c. get_data()
d. polling_telegram()
e. laporan_harian_auto()
f. Fungsi pembuatan pesan.

Seluruh 19 kasus logika menunjukkan hasil Berhasil. Pengujian *end-to-end* membuktikan alur data lengkap dari ESP8266 ke *dashboard* dalam waktu kurang dari 15 detik, notifikasi Telegram terkirim dalam kurang dari 3 detik, dan *respons* perintah bot dalam kurang dari 2 detik.

3.5. Pembahasan

Waterlytics mendemonstrasikan performa yang unggul dibandingkan sistem-sistem terdahulu dalam hal akurasi klasifikasi, kelengkapan fitur, dan keandalan sensor. Dari sisi akurasi, Prasetyo *et al*., (2025) mencapai 92% menggunakan Logika Fuzzy berbasis aturan manual [7], sedangkan Fatmawati dan Rifai (2023) mencapai 86,17% menggunakan SVM dengan *Grid Search* pada data medis statis [10]. Waterlytics mencapai akurasi 93,94% dengan menerapkan SVM kernel RBF dan *Grid Search Cross-Validation* secara langsung pada data sensor IoT *real-time*, melampaui kedua referensi tersebut.

Keunggulan SVM kernel RBF dibandingkan Logika Fuzzy Sugeno terletak pada sifatnya yang *data-driven* model belajar pola klasifikasi secara otomatis dari data tanpa memerlukan penentuan aturan manual. Hal ini membuat model lebih adaptif terhadap variasi data di lapangan. Sementara itu, penggunaan *Grid Search Cross-Validation* memastikan parameter C=10 dan gamma=10 dipilih secara sistematis dan ilmiah, bukan berdasarkan trial-and-error.

Dari sisi keandalan sensor, deviasi di bawah 2% terhadap laboratorium DKLH membuktikan bahwa sensor IoT berbiaya rendah yang digunakan mampu memberikan pengukuran yang cukup akurat untuk aplikasi monitoring kualitas air skala rumah tangga. Integrasi kompensasi suhu dalam perhitungan TDS berkontribusi signifikan terhadap akurasi pembacaan sensor TDS.

Kontribusi utama penelitian ini adalah integrasi tiga komponen yang belum pernah dikombinasikan secara bersamaan dalam penelitian sebelumnya:

a. Klasifikasi SVM otomatis dengan optimasi *Grid Search Cross-Validation* pada data IoT real-time
b. Dashboard web interaktif berbasis Flask dengan visualisasi multi-format
c. Telegram Bot dengan fitur laporan *screening* harian otomatis dan tombol Refresh tanpa pesan baru.

4. Kesimpulan.

Penelitian ini berhasil mengembangkan Waterlytics, sistem monitoring kualitas air sumur bor berbasis IoT yang mengintegrasikan klasifikasi SVM kernel RBF dengan optimasi *Grid Search Cross-Validation*. Sistem mencapai akurasi klasifikasi 93,94% dengan parameter optimal C=10 dan gamma=10 (akurasi CV=95,09%), melampaui target minimal 85% dan lebih tinggi dari metode Fuzzy Logic (92%) maupun SVM tanpa optimasi (86,17%) pada penelitian terdahulu. Validasi sensor menunjukkan deviasi di bawah 2% terhadap nilai referensi laboratorium DKLH Provinsi Bali. Seluruh pengujian *Black Box* (25 skenario) dan *White Box* (19 kasus logika) berhasil. *Dashboard* web Waterlytics berhasil menampilkan data *real-time* secara interaktif, sementara Telegram Bot mengirimkan notifikasi peringatan otomatis dan laporan screening harian pukul 07.00 WITA melalui APScheduler.

Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada *deployment* server ke VPS atau layanan *cloud* untuk akses dari luar jaringan lokal, penambahan sensor pH dan oksigen terlarut sesuai seluruh parameter Permenkes RI No. 2 Tahun 2023, perluasan dataset dari berbagai lokasi untuk meningkatkan generalisasi model, implementasi mekanisme kalibrasi sensor otomatis, komparasi dengan algoritma machine learning lain seperti Random Forest dan Neural Network, serta pengembangan aplikasi mobile Android/iOS.

References

[1] Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan dan Persyaratan Kesehatan Air untuk Keperluan Higiene Sanitasi. Kementerian Kesehatan RI, Jakarta, 2023.

[2] A. R. Singkam, I. L. Lestari, F. Agustin, P. L. Miftahussalimah, A. Y. Maharani, dan R. Lingga, "Perbandingan Kualitas Air Sumur Galian dan Bor Berdasarkan Parameter Kimia dan Parameter Fisika," BIOEDUSAINS: Jurnal Pendidikan Biologi dan Sains, vol. 4, no. 2, pp. 155–165, 2021.

[3] V. Pramaningsih, R. Yuliawati, S. Sukisman, H. Hansen, R. Suhelmi, dan A. Daramusseng, "Indeks Kualitas Air dan Dampak terhadap Kesehatan Masyarakat Sekitar Sungai Karang Mumus, Samarinda," Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia, vol. 22, no. 3, pp. 313–319, 2023. doi: 10.14710/jkli.22.3.313-319.

[4] R. A. Mulia, D. Saputra, M. Fauzan, dan T. Hidayat, "AQUAMONITOR: Sistem Monitoring Kualitas Air Berbasis IoT Menggunakan NodeMCU V3 ESP8266," Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan (JITET), vol. 14, no. 1, 2025. doi: 10.23960/jitet.v14i1.8373.

[5] P. N. Setiawati dan Fitriyani, "Sistem Monitoring Realtime Kualitas Air Berbasis IoT dengan Sensor TDS dan NodeMCU ESP32," JIKA (Jurnal Informatika), vol. 9, no. 3, pp. 347–354, 2025. doi: 10.31000/jika.v9i3.14442.

[6] F. Chuzaini dan Dzulkiflih, "IoT Monitoring Kualitas Air dengan Menggunakan Sensor Suhu, pH, dan Total Dissolved Solids (TDS)," Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI), vol. 11, no. 3, pp. 46–56, 2022.

[7] B. D. Prasetyo, E. Widodo, dan D. Ardiatma, "Sistem Monitoring Kualitas Air Sumur Berbasis IoT dengan Fuzzy Logic dan Interface Berbasis Web," Insect: Jurnal Teknik Informatika, 2025.

[8] F. Putrawansyah, R. Andriyanto, N. P. Sari, dan M. Yusuf, "Penerapan Metode Support Vector Machine Terhadap Klasifikasi Jenis Jambu Biji dengan Image Processing," JIKO (Jurnal Informatika dan Komputer), vol. 8, no. 1, pp. 193–204, 2024. doi: 10.26798/jiko.v8i1.988.

[9] N. Leli, F. Rakhmawati, dan R. Widyasari, "Penerapan Metode Support Vector Machine (SVM) untuk Klasifikasi Uang Kuliah Tunggal di Universitas Islam Negeri Sumatera Utara," Lebesgue: Jurnal Ilmiah

Pendidikan Matematika, Matematika dan Statistika, vol. 4, no. 2, pp. 903–915, 2023. doi: 10.46306/lb.v4i2.354.

[10] Fatmawati dan N. A. K. Rifai, "Klasifikasi Penyakit Diabetes Retinopati Menggunakan Support Vector Machine dengan Algoritma Grid Search Cross-validation," Jurnal Riset Statistika (JRS), vol. 3, no. 1, pp. 79–86, 2023. doi: 10.29313/jrs.v3i1.1945.

[11] T. Sulistyorini, N. Sofi, dan E. Sova, "Pemanfaatan NodeMCU ESP8266 Berbasis Android (Blynk) sebagai Alat Mematikan dan Menghidupkan Lampu," Jurnal Ilmiah Teknik, vol. 1, no. 3, pp. 40–53, 2022. doi: 10.56127/juit.v1i3.334.

[12] M. B. R. Huda dan W. D. Kurniawan, "Analisa Sistem Pengendalian Temperatur Menggunakan Sensor DS18B20 Berbasis Mikrokontroler Arduino," Jurnal Rekayasa Mesin, vol. 7, no. 02, pp. 18–23, 2022. doi: 10.26740/jrm.v7i02.47897.

[13] J. A. Saputra dan Y. A. Susetyo, "Development of Price Distribution Module on Merchandise Application Using Flask Framework at PT XYZ," Jurnal Teknik Informatika (JUTIF), vol. 3, no. 5, pp. 1293–1300, 2022. doi: 10.20884/1.jutif.2022.3.5.351.

[14] A. C. Praniffa, F. A. Nugraha, R. Saputra, dan A. Hidayat, "Pengujian Black Box dan White Box Sistem Informasi Parkir Berbasis Web," Jurnal Testing dan Implementasi Sistem Informasi, vol. 1, no. 1, pp. 1–16, 2023.