

**PENGEMBANGAN SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN
REKOMENDASI DOSIS BAHAN KIMIA DAN
PREDIKSI KUALITAS AIR BERBASIS
METODE FUZZY MAMDANI DAN
WEIGHTED MOVING AVERAGE
PADA PT ADARO TIRTA
BRAYAN**

Muhammad Nur Fadhil^{1*}, Andi Marwan Elhanafi²

Universitas Harapan Medan, Sumatera Utara

e-mail: ¹muhammadnurfadhil96@gmail.com

Abstract: *Determining chemical dosages in drinking water treatment plants in Indonesia is generally still based on operator experience and intuition, which may lead to inconsistencies in treatment quality between shifts. This study developed a web-based Decision Support System module for the operational system of PT Adaro Tirta Brayana, a 500 L/s water treatment plant utilizing raw water from the Deli River. The system integrates a Mamdani Fuzzy Inference System with singleton consequents to recommend PAC, chlorine, and soda ash dosages, and a Weighted Moving Average (WMA) method to predict raw water quality two hours ahead and monthly chemical dosage requirements. The system was implemented using Laravel 11, Livewire, and MariaDB, and evaluated using Mean Absolute Percentage Error (MAPE) on 5,472 operational shift records from April 2025 to June 2026. Systematic testing produced WMA weights of [1, 3, 30] for raw water prediction and [1, 1, 20] for monthly dosage prediction. The evaluation results showed MAPE values of 11.28% for PAC dosage recommendations and 12.86% for chlorine recommendations. WMA prediction produced MAPE values of 1.04% for pH, 8.10% for TDS, and 32.86% for turbidity, while monthly dosage prediction resulted in MAPE values of 8.71% for PAC and 23.4% for chlorine. The integration of both methods provides quantitative guidance for operators and supports more measurable chemical requirement planning.*

Keywords: *Decision Support System; Fuzzy Mamdani; Weighted Moving Average; Water Treatment; Chemical Dosage.*

Abstrak: Penentuan dosis bahan kimia pada instalasi pengolahan air minum di Indonesia umumnya masih bergantung pada pengalaman operator sehingga berpotensi menimbulkan inkonsistensi kualitas pengolahan antar shift. Penelitian ini mengembangkan modul Sistem Pendukung Keputusan berbasis web pada sistem operasional PT Adaro Tirta Brayana, instalasi berkapasitas 500 liter per detik yang mengolah air baku Sungai Deli. Sistem mengintegrasikan metode *Fuzzy Inference System Mamdani* berkonsekuen singleton untuk rekomendasi dosis PAC, klorin, dan soda ash, serta metode *Weighted Moving Average* (WMA) untuk prediksi kualitas air baku dua jam ke depan dan kebutuhan dosis bulanan. Sistem dibangun menggunakan Laravel 11, Livewire, dan MariaDB, lalu dievaluasi menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) terhadap 5.472 data shift operasional periode April 2025 hingga Juni 2026. Pengujian menghasilkan bobot WMA [1, 3, 30] untuk prediksi air baku dan [1, 1, 20] untuk prediksi dosis bulanan. Hasil evaluasi menunjukkan MAPE rekomendasi Fuzzy Mamdani sebesar 11,28% untuk PAC dan 12,86% untuk klorin. Prediksi WMA menghasilkan MAPE pH 1,04%, TDS 8,10%, dan turbiditas 32,86%, sedangkan prediksi dosis bulanan menghasilkan MAPE PAC 8,71% dan klorin 23,4%. Integrasi kedua metode mampu menyediakan acuan kuantitatif bagi operator dan mendukung perencanaan kebutuhan bahan kimia secara lebih terukur.

Kata kunci: Sistem Pendukung Keputusan; Fuzzy Mamdani; *Weighted Moving Average*; Pengolahan Air Bersih; Dosis Bahan Kimia.

PENDAHULUAN

Ketersediaan air bersih tidak lagi hanya berkaitan dengan jumlah air yang tersedia, tetapi juga dengan kualitas air agar aman dikonsumsi. Organisasi pangan dunia memproyeksikan dua pertiga populasi global berada dalam kondisi stres air pada tahun 2025 (Apio et al., 2023), dan kondisi tersebut tercermin dari laporan bahwa hampir empat miliar orang mengalami kelangkaan air parah sedikitnya satu bulan setiap tahun. Di sisi lain, pemanfaatan sistem pendukung keputusan yang telah mengubah banyak sektor industri belum banyak menyentuh sektor pengolahan air bersih di Indonesia, sehingga keputusan operasional yang memengaruhi kualitas air bagi jutaan orang masih ditentukan dengan cara yang sama seperti beberapa dekade lalu.

Kondisi tersebut dialami PT Adaro Tirta Brayan, Instalasi Pengolahan Air (IPA) berkapasitas 500 liter per detik yang mengolah air baku Sungai Deli dan mendistribusikan air melalui jaringan Perumda Tirtanadi Kota Medan. Proses pengolahan melibatkan tiga bahan kimia utama, yaitu *Poly Aluminium Chloride* (PAC) sebagai koagulan, klorin sebagai desinfektan, dan *soda ash* sebagai pengatur pH sesuai baku mutu air minum. Sistem pencatatan produksi berbasis *web* telah tersedia sejak 2025 (McVicker, 2024), namun sistem tersebut baru berfungsi sebagai pencatat data. Penentuan dosis masih dilakukan berdasarkan pengalaman operator, tidak tersedia mekanisme prediksi kondisi air baku, dan perencanaan kebutuhan bahan kimia belum berbasis data historis. Ketergantungan pada pengalaman individu ini menimbulkan risiko inkonsistensi kualitas pengolahan, terutama pada pergantian *shift* atau ketika operator berpengalaman tidak bertugas.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan efektivitas logika *fuzzy*

pada domain pengolahan air. Pengendalian kualitas air minum berbasis *Fuzzy Mamdani* dan *Internet of Things* mampu mengklasifikasikan kelayakan air sekaligus merekomendasikan dosis bahan kimia (Elriyan et al., 2025). Pendekatan serupa digunakan pada sistem kendali nilai klorin air laut berbasis pembacaan *sensor* serta sistem *monitoring* penyediaan kualitas air (Wicaksono et al., 2023). Perumusan fungsi keanggotaan dan *defuzzifikasi* untuk penilaian kualitas air juga telah dibakukan pada penelitian sebelumnya. Kesamaan ketiga penelitian tersebut terletak pada kemampuan *Fuzzy Mamdani* menerjemahkan pengetahuan pakar yang bersifat kompleks dan non-linear menjadi aturan logis yang dapat dieksekusi sistem, sesuai dengan sifat pengolahan air yang tidak selalu dapat dijelaskan melalui persamaan matematis sederhana.

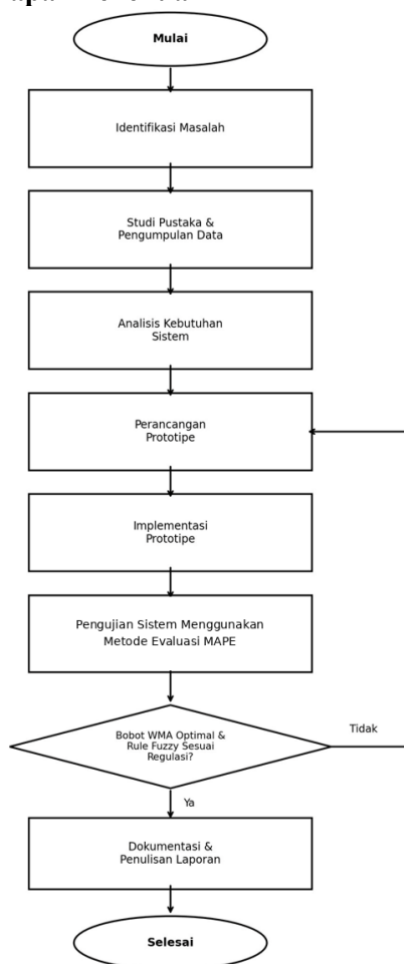
Pada sisi peramalan, metode *Weighted Moving Average* (WMA) memberikan bobot lebih besar pada data terbaru sehingga responsif terhadap perubahan tren. Metode ini terbukti mampu memprediksi data lingkungan seperti curah hujan dengan akurasi yang baik, dan memberikan hasil paling optimal dibandingkan *Simple Moving Average*, *Double Moving Average*, dan *Exponential Moving Average* pada data pemakaian air PDAM (Bellini et al., 2025). Penerapan peramalan deret waktu pada kebutuhan air maupun kekeruhan instalasi pengolahan juga telah dilaporkan memberikan hasil yang layak digunakan sebagai dasar perencanaan operasional (Aprilia et al., 2025).

Meskipun demikian, penelitian terdahulu umumnya menempatkan kedua metode secara terpisah dan diuji pada data dalam rentang waktu yang relatif pendek atau pada lingkungan simulasi. Kebaruan penelitian ini terletak pada tiga hal. Pertama, integrasi *Fuzzy Mamdani* dan WMA dalam satu *platform* operasional

yang benar-benar digunakan pada instalasi produksi, bukan pada lingkungan uji coba. Kedua, penggunaan konsekuen *singleton* yang nilainya diperoleh langsung dari pakar lapangan sebagai besaran koreksi dosis, sehingga aturan *fuzzy* merepresentasikan praktik operasional aktual. Ketiga, evaluasi dilakukan terhadap 5.472 *record shift* selama 15 bulan berturut-turut sehingga mencakup variasi musim dan fluktuasi kualitas air baku.

METODE

Tahapan Penelitian



Gambar 1 Tahapan Penelitian

Data Penelitian

Data primer berupa rekaman *shift* operasional periode 1 April 2025 hingga 30 Juni 2026 sebanyak 5.472 *record* (masing-masing 1.824 *record* untuk Shift

I, II, dan III). Setiap *record* memuat parameter kualitas air baku (turbiditas, pH, dan *Total Dissolved Solid*/TDS), kualitas air sedimentasi, kualitas air reservoir termasuk *free chlorine*, dosis bahan kimia, serta data operasional pompa dan *flowmeter*. Pengambilan sampel dilakukan setiap dua jam sesuai prosedur laboratorium perusahaan. Data pendukung diperoleh melalui wawancara dengan Kepala *Site*, Analis Kimia, dan Operator Senior untuk memvalidasi rentang operasional, batas dosis, serta besaran koreksi dosis yang menjadi dasar penyusunan aturan *fuzzy*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem

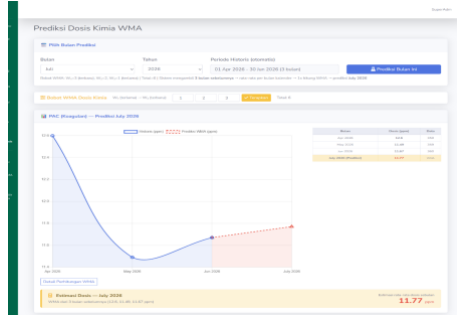
Sistem dikembangkan menggunakan *framework Laravel 11* dengan komponen *Livewire* pada sisi *server* dan basis data *MariaDB*, dijalankan di atas *Virtual Private Server Ubuntu*. Modul *Fuzzy Mamdani* dan WMA air baku diimplementasikan pada halaman *Monitoring Detail* sebagaimana Gambar 2. Halaman tersebut menampilkan prediksi turbiditas, pH, dan TDS untuk dua jam ke depan beserta rekomendasi dosis PAC, klorin, dan *soda ash* yang diperbarui setiap kali data *shift* baru dimasukkan.



Gambar 2 Panel prediksi WMA air baku dan rekomendasi dosis *Fuzzy Mamdani*

Modul prediksi dosis bulanan disajikan pada halaman terpisah sebagaimana Gambar 3. Sistem secara otomatis mengambil rata-rata dosis tiga bulan kalender sebelumnya, menghitung

prediksi menggunakan bobot WMA aktif, dan menampilkan grafik perbandingan data historis terhadap nilai prediksi sebagai dasar perencanaan pengadaan bahan kimia.



Gambar 3 Halaman prediksi kebutuhan dosis bulanan

Penentuan Bobot WMA Air Baku

Lima kandidat kombinasi bobot diuji terhadap seluruh 5.469 baris prediksi selama 15 bulan yang digabungkan menjadi satu populasi. Hasil agregat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 MAPE agregat WMA air baku per nilai bobot w_3 (N = 5.469)

w_3	Turbi ditas	pH	TDS
3 ($\approx[1,2,3]$)	36,89%	1,00%	9,28%
10	33,79%	1,00%	8,38%
30	32,86%	1,04%	8,10%
50–80	32,75%	1,05–1,06%	8,07%
100	32,75%	1,06%	8,06%
1000	32,79%	1,07%	8,06%

Tabel 2 Perbandingan bobot literatur dan bobot terpilih

Bobot	Turbiditas	pH	TDS
[1, 2, 3] (literatur)	36,28%	1,00%	9,08%
[1, 3, 3] (isolasi w_2)	36,89%	1,00%	9,28%
[1, 3, 30] (terpilih)	32,86%	1,04%	8,10%

Menaikkan bobot komponen tengah dari 2 menjadi 3 justru sedikit memperburuk MAPE turbiditas sekitar 0,6 poin persentase, sedangkan penguatan

bobot komponen terbaru dari 3 menjadi 30 menurunkan MAPE turbiditas sebesar 3,42 poin persentase dan MAPE TDS sebesar 0,98 poin persentase. Temuan ini menunjukkan bahwa perbaikan akurasi pada data Sungai Deli bukan disebabkan oleh perubahan rasio antarbobot secara umum, melainkan secara spesifik oleh penguatan bobot pada data *shift* terbaru dalam proporsi yang jauh lebih besar dibandingkan rekomendasi literatur. Proses serupa dilakukan pada WMA dosis bulanan dengan sembilan kandidat bobot, dan kombinasi [1, 1, 20] terpilih sebagai bobot produksi.

Akurasi Rekomendasi Fuzzy Mamdani

Evaluasi rekomendasi dosis terhadap 5.472 *shift* menghasilkan MAPE seperti pada Tabel 3. Antarmuka evaluasi yang terintegrasi dengan data operasional ditunjukkan pada Gambar 3.

Tabel 3 MAPE bulanan rekomendasi Fuzzy Mamdani

Bulan	N	PAC	Klorin	Soda Ash
Apr 2025	360	14,88%	13,79%	–
Mei 2025	372	19,47%	9,13%	–
Jun 2025	360	20,07%	9,21%	–
...	...	...	...	...
Agregat	5.472	11,28%	12,86%	72,4%

Analisis baris per baris mengungkap dua pola sistematis penyebab rendahnya akurasi *soda ash*. Pola pertama, aturan ambang batas biner pada $\text{pH} \geq 6,5$ mengunci rekomendasi pada kondisi *standby* begitu ambang tersentuh, sementara operator justru menurunkan dosis secara bertahap dari 3,4 ppm menjadi 2,69 ppm selama kurang lebih dua hari. Pola kedua, osilasi pH di sekitar ambang menyebabkan rekomendasi berubah drastis antara aktif dan *standby* dalam hitungan jam, sedangkan dosis aktual operator tetap stabil pada kisaran 2,0–2,5 ppm. Kedua

pola tersebut menunjukkan bahwa rendahnya akurasi *soda ash* bukan semata-mata akibat keterbatasan data, melainkan juga akibat karakteristik ambang batas yang kaku serta kalibrasi delta dosis yang belum sepenuhnya merepresentasikan penyesuaian bertahap di lapangan.

Akurasi Prediksi WMA Air Baku

Pengujian prediksi kualitas air baku menggunakan bobot [1, 3, 30] terhadap 5.469 baris data menghasilkan MAPE bulanan sebagaimana Tabel 6, dengan antarmuka evaluasi pada Gambar 5.

Tabel 4 MAPE bulanan WMA air baku bobot [1, 3, 30]

Bulan	Turbiditas	pH	TDS
Apr 2025	61,04%	0,97%	9,47%
Mei 2025	52,07%	1,20%	10,75%
Jun 2025	40,57%	1,16%	7,56%
...	...	...	...
Agregat	32,86%	1,04%	8,10%

Parameter pH dan TDS konsisten berada di bawah 10% pada seluruh bulan, membuktikan stabilitas kedua parameter tersebut bukan kebetulan satu periode melainkan pola yang bertahan sepanjang 15 bulan. Sebaliknya, turbiditas berada pada kategori cukup/wajar dengan variasi antarbulan yang lebar, yaitu 24,07% pada Februari 2026 hingga 61,04% pada April 2025. Kondisi ini mencerminkan karakteristik air baku Sungai Deli yang memiliki rentang kekeruhan 12,6 hingga 1.218 NTU dengan rata-rata lompatan antar *shift* berkisar 27% hingga 64% bergantung bulan. Metode WMA bersifat reaktif karena memprediksi dari tiga data lampau, sehingga lonjakan mendadak akibat hujan deras sulit diikuti. Keterbatasan ini bersifat inheren terhadap data, bukan akibat pemilihan bobot, sebagaimana dibuktikan pada Tabel 3 di mana titik optimal mutlak hanya berselisih 0,11 poin dari bobot terpilih.

Akurasi Prediksi Dosis Bulanan

Pengujian prediksi dosis bulanan menggunakan bobot [1, 1, 20] terhadap 12 bulan target berurutan menghasilkan MAPE sebagaimana Tabel 5.

Tabel 5. MAPE bulanan WMA dosis kimia bobot [1, 1, 20]

Bulan target	PAC	Klorin
Jul 2025	13,61%	18,47%
Ags 2025	1,97%	22,50%
Sep 2025	12,66%	42,25%
...	...	...
Agregat	8,71%	23,40%

Selisih akurasi yang signifikan antara PAC dan klorin dijelaskan oleh perbedaan volatilitas dan skala dosis sebagaimana Tabel 8. Pemakaian klorin berfluktuasi jauh lebih tinggi antarbulan sehingga sulit diikuti metode yang bersifat reaktif terhadap tren historis. Selain itu, karena MAPE dihitung sebagai persentase terhadap nilai aktual, selisih absolut kecil pada dosis klorin menghasilkan persentase kesalahan yang besar: selisih 0,4 ppm pada dosis aktual 0,87 ppm menghasilkan kesalahan 46%, sedangkan selisih absolut yang sama pada PAC dengan dosis aktual 11 ppm hanya menghasilkan kesalahan sekitar 4%.

Tabel 6 Volatilitas dosis PAC dan klorin

Bahan kimia	Rata-rata swing bulanan	Swing terbesar	Rata-rata dosis
PAC	7,7%	24,2%	11,39 ppm
Klorin	20,0%	58,6%	1,70 ppm

Pembahasan

Dibandingkan dengan penelitian pengendalian kualitas air minum berbasis *Fuzzy Mamdani* dan *Internet of Things* yang menggunakan empat parameter masukan secara simultan, penelitian ini memfokuskan satu parameter dominan

per bahan kimia berdasarkan validasi pakar lapangan. Pendekatan tersebut memungkinkan sistem tetap beroperasi pada setiap *shift* tanpa bergantung pada kelengkapan seluruh pembacaan *sensor* sekaligus, yang merupakan kondisi realistik pada instalasi dengan pencatatan manual. Pada sisi peramalan, temuan bahwa WMA memberikan performa yang baik pada data operasional air sejalan dengan penelitian sebelumnya, namun penelitian ini menunjukkan bahwa bobot rekomendasi literatur [1, 2, 3] belum tentu optimal dan perlu disesuaikan terhadap karakteristik volatilitas data lokal.

Temuan operasional yang penting adalah 66,1% *shift* menghasilkan kekeruhan sedimentasi di bawah zona optimal 2,8–3,8 NTU dengan dosis PAC yang relatif konstan sekitar 11 ppm pada seluruh zona kekeruhan. Pola ini mengindikasikan kecenderungan *over-dosing* sistematis yang selama ini tidak terdeteksi karena tidak tersedia acuan kuantitatif.

SIMPULAN

Modul Sistem Pendukung Keputusan berbasis *web* yang mengintegrasikan *Fuzzy Mamdani* dan *Weighted Moving Average* berhasil dikembangkan dan dioperasikan pada sistem produksi PT Adaro Tirta Brayan. Rekomendasi dosis *Fuzzy Mamdani* dengan konsekuensi singleton menghasilkan MAPE agregat 11,28% untuk PAC dan 12,86% untuk klorin pada evaluasi 5.472 *shift* selama 15 bulan, keduanya berada pada kategori akurat/baik. Prediksi kualitas air baku menggunakan bobot [1, 3, 30] menghasilkan MAPE 1,04% untuk pH dan 8,10% untuk TDS pada kategori sangat akurat, serta 32,86% untuk turbiditas pada kategori cukup/wajar akibat fluktuasi ekstrem Sungai Deli. Prediksi kebutuhan dosis bulanan menggunakan bobot [1, 1, 20] menghasilkan MAPE 8,71% untuk PAC

dan 23,4% untuk klorin, sehingga sistem dapat diandalkan untuk perencanaan PAC dan bersifat indikatif untuk klorin. Penentuan bobot melalui pengujian sistematis terbukti penting karena bobot rujukan literatur tidak otomatis optimal pada karakteristik data lokal.

DAFTAR PUSTAKA

- Apio, A. T., Thiam, D. R., & Dinar, A. (2023). Farming Under Drought: An Analysis of the Factors Influencing Farmers' Multiple Adoption of Water Conservation Practices to Mitigate Farm-Level Water Scarcity. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 55(3), 432–470. <https://doi.org/10.1017/aae.2023.23>
- Bellini, F., Barzegar, Y., Barzegar, A., Marrone, S., Verde, L., & Pisani, P. (2025). Sustainable Water Quality Evaluation Based on Cohesive Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference System in Tivoli (Italy). *Sustainability (Switzerland)*, 17(2), 1–25. <https://doi.org/10.3390/su17020579>
- Wicaksono, D. B., Adiputra, D., & Hafidz, I. (2023). Rancang Bangun Sistem Kendali Nilai Klorin Pada Kandungan Air Laut Menggunakan Metode Fuzzy Logic. *Journal of Computer Electronic and Telecommunication*, 4(1). <https://doi.org/10.52435/complete.v4i1.217>
- Elriyan, D. I., Chaidir, A. R., & Anam, K. (2025). Pengendalian Kualitas Air Minum Menggunakan Fuzzy Mamdani Berbasis Internet of Things. *ELECTRICIAN – Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro*, 19, 39–45.
- Mcvicker, E. (2024). Global Perspectives On Water Management: An Overview Of Action Steps From The United Nations To Local Communities. *The Journal of Business Leadership*, 31(1), 112–124