

PERANCANGAN PERBAIKAN KUALITAS AIR MINUM PRODUKSI IPA BABAKAN DI PDAM TIRTA KERTA RAHARJA MENGGUNAKAN PENDEKATAN PETA KENDALI MULTIVARIAT

Muhammad Raihan Fauzie*¹, Bambang Purwanggono¹, Chaterine Alvina Prima Hapsari¹

¹Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

Abstrak

Air merupakan sumber kehidupan yang penting bagi seluruh makhluk hidup. Air digunakan untuk konsumsi dan kebutuhan sehari-hari seperti memasak, mandi, dan mencuci. Kualitas air menjadi faktor utama dalam kesehatan masyarakat. PDAM Tirta Kerta Raharja menilai kualitas air melalui kadar sisa klor sebagai indikator efektivitas disinfeksi. Pemantauan menunjukkan ketidakstabilan kadar sisa klor, dengan 35% sampel tidak memenuhi baku mutu sesuai peraturan pemerintah. Tingginya kadar sisa klor dapat menimbulkan iritasi dan risiko penyakit kronis, sedangkan kadar rendah meningkatkan risiko pertumbuhan mikroorganisme patogen. Penelitian ini menggunakan metode Statistical Process Control (SPC) dengan peta kendali multivariat MEWMA (Multivariate Exponentially Weighted Moving Average) untuk mengendalikan dan meningkatkan kestabilan proses pengolahan air. Hasil menunjukkan metode MEWMA efektif untuk mendeteksi perubahan kecil dan mengidentifikasi variabel penyebab ketidakaturan proses.

Kata kunci: *Kualitas Air; Pengendalian Kualitas; Peta Kendali Multivariat; Statistical Process Control*

Abstract

Water is a vital source of life for all living beings, used for consumption and daily needs such as cooking, bathing, and washing. Water quality is a key factor in public health. PDAM Tirta Kerta Raharja assesses water quality through residual chlorine levels, which serve as indicators of disinfection effectiveness. Monitoring shows instability in residual chlorine levels, with 35% of samples failing to meet quality standards set by government regulations. High residual chlorine levels may cause irritation and increase the risk of chronic diseases, while low levels increase the risk of pathogenic microorganism growth. This study employs Statistical Process Control (SPC) using the Multivariate Exponentially Weighted Moving Average (MEWMA) control chart to control and improve the stability of the water treatment process. The results demonstrate that the MEWMA method effectively detects small changes and identifies variables causing process irregularities, thereby enhancing the quality and stability of the treated water.

Keywords: *Water Quality; Quality Control; Multivariate Control Chart; Statistical Process Control*

1. Pendahuluan

Air memiliki peran yang sangat krusial bagi seluruh makhluk hidup karena membantu manusia dan makhluk hidup yang lainnya tetap hidup. Selain untuk diminum, orang membutuhkan air yang bersih untuk kehidupan sehari-hari seperti memasak, mandi dan mencuci. Selain kuantitas, kualitas air juga menjadi perhatian utama untuk memastikan ketersediaan air yang bersih dan aman. Jumlah air yang melimpah tetapi terkontaminasi berpotensi menimbulkan penyakit

bagi masyarakat. Oleh karena itu, masyarakat membutuhkan kualitas air yang terjamin untuk mewujudkan kehidupan yang aman dan sehat. Air minum sendiri adalah air yang aman untuk diminum. Air tersebut bisa berupa air yang sudah dimurnikan atau pun yang belum dimurnikan, asalkan air tersebut memenuhi ketentuan kesehatan serta bisa diminum.

Seiring dengan bertambahnya penduduk, kebutuhan akan ketersediaan air minum juga semakin meningkat. Oleh sebab itu, ketersediaan air yang bersih dan aman merupakan kebutuhan mendasar untuk mewujudkan kehidupan masyarakat yang sehat dan kondusif. Kebutuhan akan asupan air mencakup pertimbangan sifat-sifat fisik, kimia dan biologi air, untuk memastikan bahwa konsumsinya tidak menimbulkan

*Penulis Korespondensi.
E-mail: zie@students.undip.ac.id

efek negatif (Renngiwur dkk., 2016). Persyaratan tersebut diatur dalam PERMENKES RI No. 23 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Pemerintah Nomor 66 Tentang Kesehatan Lingkungan. Peraturan tersebut meliputi 19 parameter wajib dan tambahan parameter lainnya yang menyesuaikan kondisi geohidrologi wilayah.

Sisa klor memiliki peran krusial dalam kualitas pengolahan air. Sebab, sisa klor tidak hanya menunjukkan efektivitas proses disinfeksi, tetapi juga berfungsi sebagai indikator keberhasilan sistem pengolahan air. Sisa klor merupakan senyawa aktif yang dapat merusak dinding sel, membran dan enzim mikroorganisme seperti *Escherichia coli* dan *coliform* sehingga menyebabkan kematian dan inaktivasi mikroba (Snead dkk., 1980). Oleh karena itu, sisa klor merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap kualitas air berdasarkan 19 parameter yang diatur dalam baku mutu air minum.

PDAM Tirta Kerta Raharja merupakan perusahaan milik pemerintah Kabupaten Tangerang. Perusahaan daerah ini memiliki visi yaitu menjadi perusahaan air minum yang unggul di Indonesia. Berdasarkan visi tersebut perusahaan memiliki tanggung jawab untuk terus menjaga kualitas produknya serta memenuhi kebutuhan konsumen. Pemenuhan kebutuhan konsumen tersebut meliputi pemenuhan persyaratan. Sehingga air memegang peranan krusial yang perlu diperhatikan baik dari aspek kuantitas dan kualitasnya wajib mendapat perhatian serius.

PDAM Tirta Kerta Raharja sebagai perusahaan yang bertanggung jawab dalam penyediaan air bersih, menghadapi masalah serius terkait dengan tingginya kadar sisa klor di Instalasi Pengolahan Air Babakan. Klor digunakan dalam proses disinfeksi untuk membunuh patogen dan mikroorganisme berbahaya yang terdapat dalam air. Meskipun klor efektif dalam memberikan perlindungan terhadap penyakit yang ditularkan melalui air, kadar sisa klor yang melebihi ambang batas dapat menimbulkan masalah, baik bagi kesehatan manusia maupun lingkungan. Tabel 1. merupakan presentasi hasil pengecekan sisa klor pada IPA Babakan periode Agustus 2023 - Mei 2024.

Tabel 1. Persentase Sisa Klor Periode Agustus 2023 – Mei 2024

Parameter	Total Sampel	Memenuhi Persyaratan	Persyaratan
Sisa Klor (mg/L)	300	65%	0,2 – 0,5 mg/L

Sumber: PDAM Tirta Kerta Raharja

Berdasarkan data pemantauan selama 300 hari, ditemukan adanya ketidakstabilan yang signifikan dalam kadar sisa klorin. Dari total 300 sampel, 105 sampel tidak memenuhi baku mutu. Kondisi ini menunjukkan bahwa terdapat masalah pada kualitas air yang tidak sesuai dengan aturan pemerintah. Rendahnya nilai tersebut

merupakan indikasi kuat adanya ketidakstabilan dalam proses. Fluktuasi ini membawa implikasi serius bagi kesehatan masyarakat. Namun demikian, setelah teridentifikasinya kondisi sampel yang tidak memenuhi baku mutu, pihak pengelola belum melakukan upaya perbaikan atau tindakan lebih lanjut. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa permasalahan terkait kualitas air masih terus berlangsung dan berpotensi menimbulkan dampak negatif yang lebih besar masyarakat.

Kadar sisa klor yang tinggi dapat menyebabkan iritasi pada kulit, mata, saluran pernapasan, bahkan dapat mengakibatkan efek jangka panjang pada kesehatan manusia, termasuk peningkatan risiko kanker dan gangguan reproduksi (Sadiq & Rodriguez, 2004). Selain itu, kadar sisa klor yang rendah dapat meningkatkan risiko pertumbuhan mikroorganisme seperti *Escherichia coli* dan bakteri *coliform* yang dapat menyebabkan penyakit bawaan air, seperti diare dan infeksi saluran pencernaan (Sadiq & Rodriguez, 2004).

Sisa klor erat kaitannya dengan kekeruhan dan pH. Kekeruhan merupakan parameter penting dalam air minum karena bakteri, virus, dan parasit dapat menempel pada partikel tersuspensi. Selain itu, partikel yang terkandung di dalam air dapat mengganggu proses disinfeksi dengan cara melindungi kontaminan dari disinfektan (Kallista & Asbanu, 2023). Sedangkan nilai pH mempengaruhi daya kerja klor. Klorinasi menjadi kurang efektif jika pH air terlalu tinggi, ini terjadi karena tingginya pH menyebabkan klor terionisasi menjadi ion hipoklorit, yang mengurangi kemampuan disinfektan klor (Kallista & Asbanu, 2023). Sehingga dapat dikatakan kondisi pH yang netral dapat mendukung proses disinfeksi yang efektif.

Berdasarkan masalah tersebut, IPA Babakan harus merumuskan langkah-langkah guna meningkatkan kinerja dan stabilitas sistem pengolahan airnya. Langkah yang dapat dilakukan untuk melakukan peningkatan kualitas berkelanjutan dapat menggunakan metode SPC (*Statistical Process Control*) (Gejdoš, 2015). Berdasarkan studi tersebut, metode ini cocok digunakan untuk mencapai peningkatan kualitas berkelanjutan dan alat ini dinilai sangat efektif untuk menjamin stabilitas proses. Dengan penggunaan peta kendali (*control charts*), dapat dilakukan pengendalian variasi dalam prosedur agar memenuhi persyaratan. Identifikasi penyebab masalah dilakukan dengan analisis data yang mengindikasikan adanya penyimpangan proses (*out of control*). Setelah penyebab utama diketahui, dilakukan perancangan perbaikan.

Pada penelitian ini, metode yang digunakan yaitu SPC dengan peta kendali multivariat MEWMA (*Multivariate Exponentially Weighted Moving Average*). Penggunaan peta kendali multivariat pada penelitian karena terdapat korelasi pada beberapa variabel, sehingga memungkinkan identifikasi variabel-variabel yang paling berkontribusi terhadap pergeseran proses. Penggunaan

peta kendali MEWMA lebih sensitif dalam mendeteksi pergeseran rata-rata kecil pada proses multivariat dibandingkan peta kendali klasik lain karena MEWMA memberikan bobot eksponensial terhadap data terbaru dan data historis sehingga mampu mendeteksi perubahan lebih awal dan responsif (Arifa dkk., 2019).

Pemberian bobot eksponensial pada data masa lalu pada metode MEWMA dapat mengurangi efek lonjakan nilai tiba-tiba, sehingga menghasilkan sinyal kendali lebih stabil dan mengurangi false alarm (Ayu Maharani dkk., 2018). Kondisi tersebut sangat memudahkan dalam pengambilan keputusan yang lebih akurat pada proses dengan banyak variabel kualitas yang perlu dipantau secara sekaligus. Selain itu, MEWMA secara statistik mampu mendeteksi perubahan mean proses meskipun data tidak berdistribusi normal, sehingga metode ini dinilai robust terhadap asumsi normalitas dan tetap efektif pada data proses industri yang tidak selalu memenuhi syarat tersebut (Arifa dkk., 2019).

Berbeda dengan peta kendali T^2 Hotelling, metode tersebut mengharuskan data memenuhi asumsi normalitas multivariat sehingga kurang fleksibel ketika data proses tidak berdistribusi normal (Arifa dkk., 2019). Selain itu, T^2 Hotelling juga cenderung kurang sensitif dalam mendeteksi pergeseran mean proses yang kecil dan pada proses yang berubah-ubah bisa menghasilkan false alarm lebih tinggi (Arifa dkk., 2019). Dengan mempertimbangkan keunggulan MEWMA yang penggunaannya lebih fleksibel serta sensitif pada data proses produksi yang dinamis, sehingga MEWMA merupakan metode yang sesuai dan efektif untuk pengendalian kualitas multivariat pada penelitian ini.

Pengendalian kualitas air merupakan aspek krusial dalam penyediaan layanan air bersih oleh perusahaan. Permasalahan ketidakteraturan variabilitas parameter kualitas air dalam proses pengolahan menuntut penerapan metode pengendalian yang lebih sensitif dan efektif. Peta kendali MEWMA mampu mendeteksi perubahan kecil dan multivariat pada proses menjadi pendekatan yang relevan untuk diaplikasikan. Penelitian ini diharapkan mampu meningkatkan kestabilan dan mutu kualitas air yang dihasilkan sehingga memenuhi standar kesehatan dan kepuasan pelanggan.

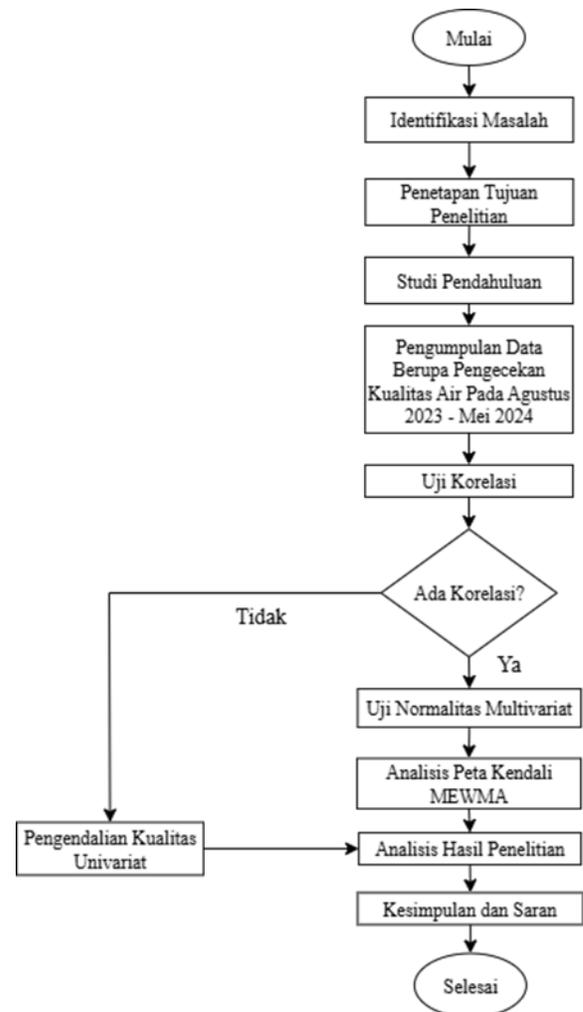
2. Metode Penelitian

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di IPA Babakan milik PDAM Tirta Kerta pada divisi produksi. Penelitian dilakukan dari bulan Juni 2024 hingga selesai

2.2 Alur Penelitian

Alur metodologi penelitian digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Uji Korelasi

Tahap pertama pada pengolahan data, dilakukan uji korelasi menggunakan Bartlett untuk mengetahui seberapa dekat hubungan antar variabel. Saat tidak ditemukan adanya keterkaitan antar variabel dapat dikatakan data bersifat univariat. Karena pada umumnya variabel dalam analisis multivariat diukur dengan cara simultan dan wajib berkorelasi (Rencher, 2002). Dari pengujian tersebut menghasilkan nilai $X^2_{hitung} > X^2_{p(p-1)}$ artinya terdapat keterkaitan antar variabel. Hasil uji korelasi dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2. Merujuk pada tabel tersebut ditemukan adanya korelasi yang signifikan antar semua variabel. Besarnya koefisien korelasi juga memperlihatkan tingkat keterkaitan yang kuat di antara variabel-variabel tersebut. Hal ini juga didukung oleh hasil uji Bartlett yang tercantum pada tabel 2. terlihat bahwa nilai $X^2_{hitung} (14,631) > X^2_{3,0.05}(7,815)$ dan nilai sig

(0,02) < 0,05 sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa terdapat korelasi antar variabel pada kekeruhan, derajat keasaman (pH) dan sisa klor. Berikut merupakan perhitungan untuk uji korelasi multivariat.

$$X^2 = - \left\{ 300 - 1 - \frac{2(3) + 5}{6} \right\} 0,952$$

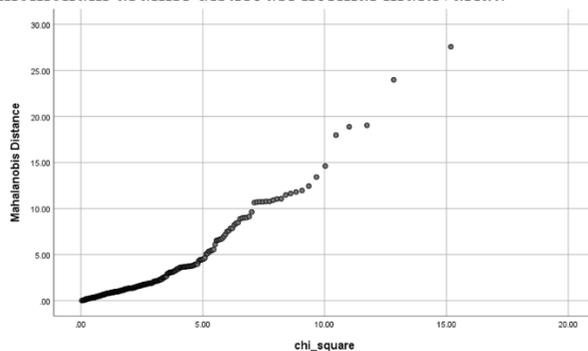
$$X^2 = 14,631$$

Tabel 2. Hasil Uji Korelasi Multivariat

Chi-Square (X^2)	Derajat Kebebasan (Df)	P-value
14,631	3	0,002

3.2 Uji Distribusi Normal Multivariat

Salah satu cara untuk menguji normalitas multivariat adalah dengan memvisualisasikan hubungan antara jarak Mahalanobis dan nilai Chi-square dalam sebuah *scatter plot*. Asumsi normalitas dapat diterima jika plot tersebut menunjukkan pola yang lurus dan setidaknya setengah dari nilai jarak Mahalanobis tidak melampaui nilai Chi-square. Selain itu, uji ini juga mempertimbangkan nilai korelasi antara jarak Mahalanobis terhadap Chi-square. Asumsi normalitas multivariat terpenuhi apabila nilai korelasi lebih dari 0,5. Dalam penelitian ini, pada Gambar 1. dapat diamati bahwa plot cenderung mengikuti pola garis lurus. Sehingga dapat dikatakan data berdistribusi normal multivariat. Tabel 3. menampilkan nilai korelasi jarak Mahalanobis dengan Chi-square sebesar 0,961, yang berarti lebih dari 0,5. Dengan demikian, data tersebut memenuhi asumsi distribusi normal multivariat.



Gambar 2. Scatter Plot Mahalanobis Distance Dengan Chi-Square

Tabel 3. Korelasi Mahalanobis Distance Dengan Chi-square

		Mahalanobis Distance	qi
Mahalanobis Distance	Pearson Correlation	1	.961**
	Sig. (2-tailed)		.000
	N	300	300
Qi	Pearson Correlation	.961**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	300	300

3.3 Perhitungan Peta Kendali MEWMA Fase I

Pada fase I, Langkah awal dalam membangun peta kendali *Multivariate Exponentially Weighted Moving Average* (MEWMA) adalah menentukan Batas Kendali Atas atau *Upper Control Limit* (UCL). UCL berfungsi sebagai ambang batas statistik untuk mendeteksi adanya pergeseran signifikan dalam proses. Dalam penelitian ini, akan dilakukan analisis sensitivitas dengan menggunakan rentang nilai lambda (λ) yang berbeda untuk menemukan peta kendali yang paling sesuai.

Parameter pembobotan lambda (λ) merupakan faktor penentu dalam desain peta kendali MEWMA. Parameter ini secara fundamental mengatur keseimbangan antara sensitivitas dan kecepatan respons peta kendali. Nilai λ yang rendah akan meningkatkan sensitivitas terhadap pergeseran proses yang kecil dengan memberi bobot lebih pada data historis, sementara nilai λ yang tinggi meningkatkan responsivitas terhadap pergeseran besar dengan memprioritaskan data terbaru. Untuk mengevaluasi pengaruh pilihan λ terhadap kinerja peta, penelitian ini akan menghitung sembilan Batas Kendali Atas (UCL) yang berbeda, masing-masing untuk nilai λ pada rentang 0,1 hingga 0,9. Tabel 3. merupakan perbandingan nilai UCL masing-masing pada rentang λ 0,1 hingga 0,9.

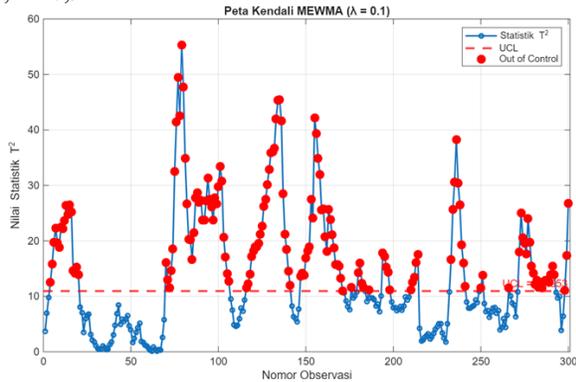
Pada simulasi ini dilakukan dengan nilai ARL₀ sebesar 200. Penggunaan nilai ini dianggap cukup untuk menjaga keseimbangan antara *false alarm* dan kecepatan deteksi pergeseran proses, sehingga tidak terlalu sering memberikan alarm palsu namun tetap peka terhadap pergeseran sesungguhnya (Qiu, 2004). Tabel 4. merupakan rekapitulasi simulasi pada fase I.

Tabel 4. Rekapitulasi Simulasi Fase I

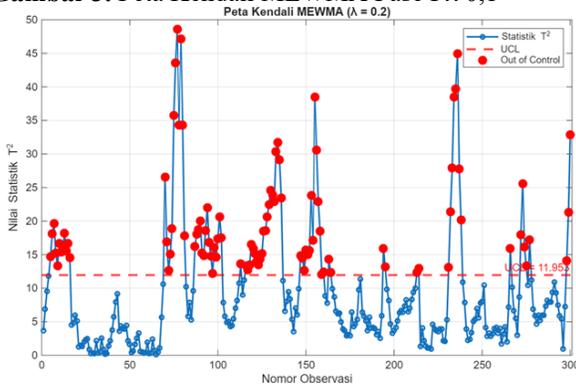
Lambda (λ)	Nilai Batas Kendali Atas (UCL)	T2 Max	T2 Max - UCL	Jumlah Data OOC
0,1	10,953	55,326	44,373	57
0,2	11,953	48,606	36,653	99
0,3	12,353	39,868	27,515	53
0,4	12,597	32,842	20,245	35
0,5	12,705	30,760	18,055	26
0,6	12,778	29,595	16,817	26
0,7	12,797	28,692	15,895	24
0,8	12,812	28,012	15,200	18
0,9	12,843	27,549	14,706	12

Berdasarkan Tabel 4. pada simulasi fase I, dilakukan analisis untuk menentukan parameter Peta Kendali MEWMA yang optimum. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa nilai pembobot lambda (λ) memiliki pengaruh signifikan terhadap jumlah titik pengamatan yang berada di luar batas kendali (OOC), dengan tren yang jelas di mana jumlah titik OOC berkurang seiring meningkatnya nilai λ . Berdasarkan Tabel 4., dipilih nilai lambda sebesar 0,9 yang menghasilkan jumlah titik OOC

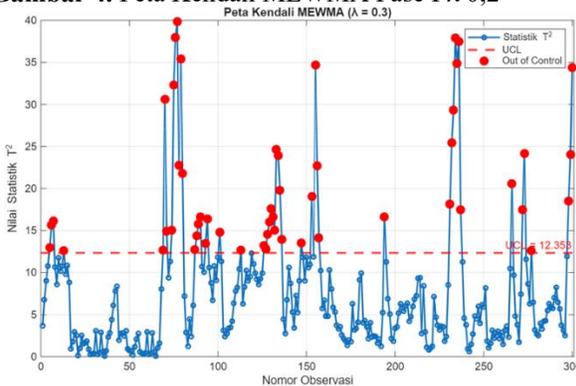
terendah, yaitu 12 titik. Selain itu, Nilai T2 maksimum yang terdeteksi dengan parameter ini adalah 27,549, dengan selisih T2 Max - UCL sebesar 14,706 yang berarti titik terburuk hanya sedikit melampaui batas kendali. Nilai selisih tersebut menunjukkan seberapa besar masalahnya. Gambar 3. – Gambar 11. merupakan grafik dari hasil simulasi fase pertama dengan rentang lambda 0,1 – 0,9.



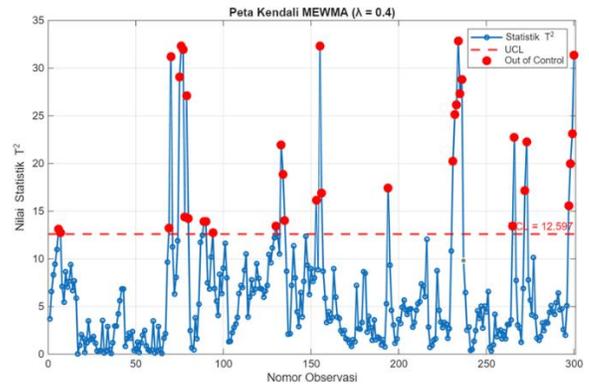
Gambar 3. Peta Kendali MEWMA Fase I λ 0,1



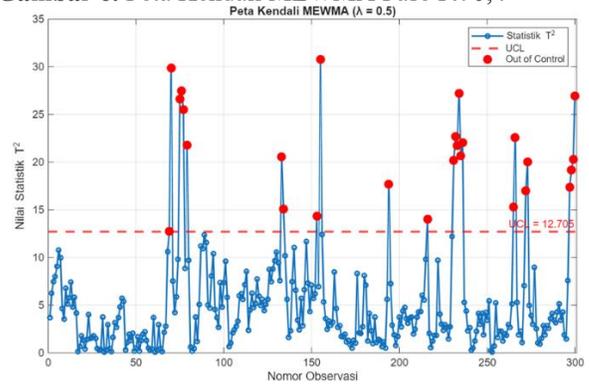
Gambar 4. Peta Kendali MEWMA Fase I λ 0,2



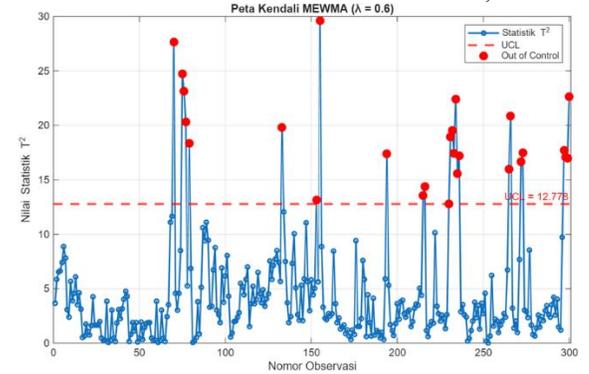
Gambar 5. Peta Kendali MEWMA Fase I λ 0,3



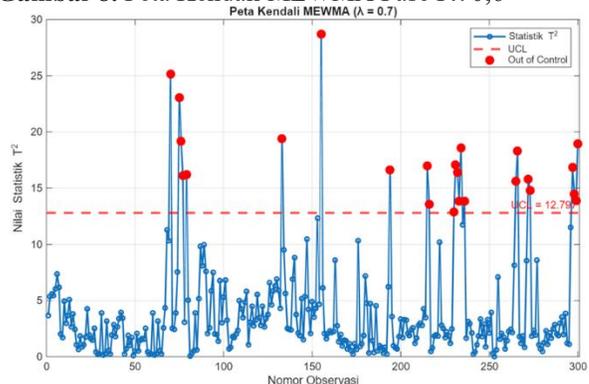
Gambar 6. Peta Kendali MEWMA Fase I λ 0,4



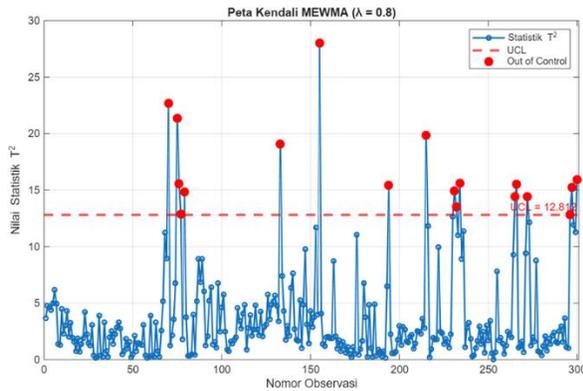
Gambar 7. Peta Kendali MEWMA Fase I λ 0,5



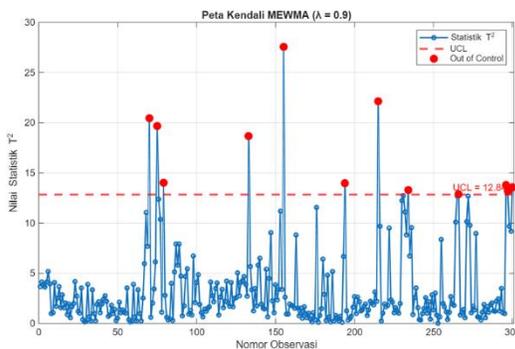
Gambar 8. Peta Kendali MEWMA Fase I λ 0,6



Gambar 9. Peta Kendali MEWMA Fase I λ 0,7



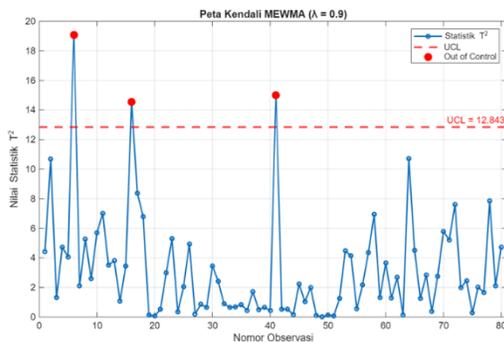
Gambar 10. Peta Kendali MEWMA Fase I λ 0,8



Gambar 11. Peta Kendali MEWMA Fase I λ 0,9

3.4 Monitoring Peta Kendali Fase II

Pada fase II, yaitu fase *monitoring* data untuk mengetahui data berada dalam batas kendali atau tidak dengan menggunakan batas kendali yang didapatkan pada fase I. Berikut merupakan hasil pengontrolan fase II menggunakan pembobot optimal ($\lambda=0,9$) dengan batas kendali atas 12,843 dan batas kendali bawah 0. Hasil monitoring pada Fase II dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Plot Diagram Peta Kendali MEWMA

Pada tahap pengolahan data untuk Fase II, dilakukan implementasi peta kendali *Multivariate Exponentially Weighted Moving Average* (MEWMA) untuk tujuan monitoring. Berdasarkan parameter yang telah ditetapkan dari analisis Fase I yaitu Batas Kendali

Atas (UCL) sebesar 12,843, dilakukan perhitungan statistik T2 MEWMA untuk setiap observasi data baru. Dengan menggunakan pembobot optimal (λ) sebesar 0,9. Setelah nilai T2 untuk setiap titik data dihitung, nilai-nilai ini kemudian dibuat secara berurutan pada grafik peta kendali. Hasil penggambaran pada grafik menunjukkan bahwa ditemukan 3 titik observasi yang nilainya melampaui UCL, yaitu observasi ke-6 ($T_2=19,0691$), observasi ke-16 ($T_2=14,5547$), dan observasi ke-41 ($T_2=14,9988$). Titik-titik *out of control* ini secara statistik mengindikasikan bahwa telah terjadi pergeseran atau ketidakstabilan pada proses selama periode pemantauan dan memerlukan investigasi lebih lanjut menggunakan Dekomposisi MYT.

3.5 Dekomposisi MYT

Setelah diketahui data yang *out of control*, kemudian mencari penyebab sinyal diluar batas kendali dengan dekomposisi MYT. Berdasarkan pengamatan yang diluar batas kendali, ditentukan nilai *unconditional* setiap variabel pada pengamatan tersebut, agar diperoleh kontribusi setiap variabel terhadap pengamatan yang tidak terkendali. Berikut merupakan perhitungan dekomposisi MYT pada pengamatan 6, 16 dan 41.

$$BKA = \frac{(n+1)}{n} F_{(\alpha;1;n-1)} = \frac{(80+1)}{80} F_{(0,05;1;380-1)} = 4,0114$$

Dekomposisi Pengamatan 6

$$T_1^2 = \frac{(x_1 - \bar{x}_1)^2}{S_1^2} = \frac{(0,56 - 0,44)^2}{0,0035} = 4,3502$$

$$T_2^2 = \frac{(x_2 - \bar{x}_2)^2}{S_2^2} = \frac{(6,95 - 6,82)^2}{0,0036} = 4,3564$$

$$T_3^2 = \frac{(x_3 - \bar{x}_3)^2}{S_3^2} = \frac{(0,47 - 0,40)^2}{0,0062} = 0,6943$$

Berikut merupakan rekapitulasi dekomposisi MYT untuk semua data yang diluar batas kendali dalam bentuk tabel.

Tabel 5. Rekapitulasi Dekomposisi MYT

Data diluar batas kendali	Dekomposisi MYT		
	T_1^2 (Kekeruhan)	T_2^2 (pH)	T_3^2 (Sisa klor)
6	4,3502	4,3564	0,6944
16	0,5898	15,3116	0,1905
41	6,7045	0,8563	0,0051

Secara keseluruhan, dari ketiga kejadian *out-of-control* yang dianalisis, terlihat sebuah pola di mana variabel pH dan kekeruhan secara bergantian menjadi sumber utama ketidakstabilan proses, sementara sisa klor secara konsisten tidak memberikan kontribusi yang signifikan. Meskipun kekeruhan menjadi penyebab dominan pada satu kejadian, nilai kontribusi pH pada pengamatan ke-16 yang luar biasa tinggi, sebesar 15,3116 menunjukkan bahwa fluktuasi pada parameter pH memiliki dampak paling ekstrem terhadap kestabilan proses secara keseluruhan. Berdasarkan temuan ini, dapat disimpulkan bahwa variabel pH merupakan penyebab

yang paling berkontribusi pada data yang berada di luar batas kendali. Dengan demikian, variabel pH ditetapkan sebagai prioritas utama untuk dianalisis lebih lanjut dalam tahap perbaikan proses produksi. Dalam rangka perbaikan proses, fokus utama harus diarahkan pada identifikasi akar penyebab variabilitas yang tinggi, yaitu pada parameter pH.

3.6 Analisis Diagram Fishbone

Setelah melakukan dekomposisi statistik menggunakan metode MYT, ditemukan bahwa nilai pH menjadi prioritas utama yang memerlukan perbaikan dalam proses produksi. Untuk mengidentifikasi akar penyebab masalah tersebut secara sistematis, dibuatlah tabel *Root Cause Analysis* (RCA) yang memetakan berbagai kemungkinan penyebab berdasarkan *brainstorming* bersama tim produksi untuk mengidentifikasi seluruh kemungkinan akar penyebab masalah. Tabel RCA disajikan dalam Tabel 6.- 8.

Tabel 6. Tabel RCA kategori manusia dan mesin

Kategori	Potensi Akar Penyebab Masalah	Penjelasan	Diskusi	Akar Masalah?
Man	Kurangnya pelatihan operator	Operator tidak paham prosedur	Pelatihan sudah diberikan	N
	<i>Underdosing</i> dosis koagulan <i>Poly Aluminium Chloride</i> (PAC).	PAC berfungsi sebagai koagulan yang membantu mengendapkan partikel tersuspensi, sekaligus bersifat asam yang dapat menurunkan nilai pH air baku.	Kesalahan input pada SCADA	Y
	Tidak melakukan <i>jar test</i> saat kondisi air baku berubah	<i>Jar test</i> menentukan dosis koagulan optimal. Tanpa penyesuaian dosis saat air baku berubah, proses koagulasi akan gagal	Operator selalu melakukan <i>jar test</i>	N
	Kegagalan pompa dosis koagulan	Jika pompa berhenti, koagulan tidak masuk yang mengakibatkan pH tidak turun	Sistem SCADA menunjukkan laju aliran dari pompa koagulan berjalan stabil dan sesuai dengan <i>set point</i>	N
Machine	Kegagalan mesin rapid mixer	Jika koagulan tidak tercampur sempurna, efisiensi koagulasi akan menurun drastis, menyebabkan kekeruhan tinggi yang dapat mempengaruhi nilai pH	Tidak terdapat laporan masalah atau alarm dari operator yang berjaga	N
	Sensor pH meter tidak akurat	Sensor yang tidak terkalibrasi menyebabkan data pengukuran yang tidak valid	Terdapat alat ukur yang tidak terkalibrasi	Y
	Sistem SCADA error	Sistem yang error dapat mengirimkan sinyal secara terus menerus pada pompa	Tidak terdapat <i>system fault</i>	N

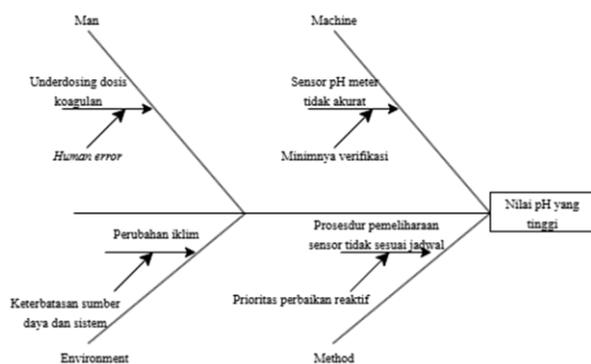
Tabel 7. Tabel RCA kategori metode

Kategori	Potensi Akar Penyebab Masalah	Penjelasan	Diskusi	Akar Masalah?
Method	Prosedur pengukuran pH tidak standar	Prosedur pengukuran yang tidak konsisten menyebabkan data yang tidak valid	Prosedur pengukuran sudah diatur	N
	Prosedur pemeliharaan sensor tidak berjalan sesuai jadwal	Sensor yang kotor seperti tertutup flok atau partikel yang lainnya dapat memperlambat waktu respons dan menyebabkan pembacaan yang salah	Terdapat kondisi sensor yang kotor	Y
	Metode kalibrasi Sensor pH tidak menggunakan buffer yang tepat	Prosedur kalibrasi yang digunakan tidak sesuai standar menyebabkan sensor memberikan pembacaan yang tidak akurat	Kalibrasi dan pengecekan telah tepat dan sesuai standar	N
	Kesalahan dalam pengukuran	Kesalahan saat mengambil sampel dapat mempengaruhi hasil	Pengukuran sudah sesuai SOP	N

Tabel 8. Tabel RCA kategori material dan lingkungan

Kategori	Potensi Akar Penyebab Masalah	Penjelasan	Diskusi	Akar Masalah?
Material	Perubahan jenis bahan kimia disinfektan.	Terjadi penggantian jenis disinfektan tanpa penyesuaian proses mengganggu stabilitas pH	Tidak, apabila terdapat perubahan maka SOP ikut berubah	N
	Kontaminasi pada koagulan (PAC)	PAC yang terkontaminasi akan tidak bekerja efektif sebagai koagulan dan tidak efektif dalam dapat menurunkan kekeruhan dan pH	Proses penyimpanan koagulan sudah sesuai SOP	N
	Kualitas koagulan (PAC) tidak sesuai standar	Kualitas koagulan yang tidak sesuai standar menyebabkan air dengan kekeruhan dan pH yang lebih tinggi ke reservoir.	PAC yang digunakan telah dikirim ke laboratorium untuk dianalisis ulang.	N
	Perubahan <i>supplier</i> bahan kimia tanpa validas	Bahan kimia dari pemasok baru bisa memiliki reaktivitas atau spesifikasi fisik yang berbeda, yang mengganggu proses jika dosis tidak disesuaikan.	Tidak ada pergantian <i>supplier</i> pada bahan kimia seperti gas klor dan PAC	N
Environment	Perubahan iklim	Perubahan iklim akan mengubah kualitas air baku secara drastis dan mendadak yang dipengaruhi dari lebih banyak sedimen yang masuk	Pada saat kondisi iklim yang ekstrim, sistem pengolahan menjadi tidak responsif	Y
	Limbah pada sungai	Pembuangan limbah dalam volume besar, secara langsung menaikkan pH air baku karena terdapat kandungan organik dan padatan tersuspensi yang tinggi	Tidak ada laporan lonjakan polusi yang signifikan	N

Dari diskusi tersebut, penyebab- penyebab yang ditemukan dikelompokkan ke dalam beberapa kategori utama, yaitu manusia (*Man*), mesin (*Machine*), cara kerja (*Method*) dan lingkungan (*Environment*). Dengan menyusun informasi ini dalam bentuk diagram *fishbone*, peneliti lebih mudah melihat hubungan antara penyebab- penyebab tersebut dan menentukan langkah perbaikan yang tepat untuk mengatasi masalah pH yang tinggi. Diagram *fishbone* ditampilkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Diagram Fishbone Nilai pH

Berdasarkan Gambar 13. dapat dilihat bahwa penyebab terjadinya nilai pH yang tinggi terdiri dari 4 faktor, yaitu manusia, material, metode dan lingkungan. Faktor pertama yaitu manusia. Pada faktor manusia menunjukkan bahwa masalah utama yang muncul adalah pemberian dosis koagulan yang kurang dari jumlah yang seharusnya. Namun, setelah dilakukan investigasi lebih lanjut dan mendalam, ditemukan bahwa penyebab dari kekurangan dosis tersebut bukan disebabkan oleh minimnya pengetahuan atau pemahaman dari operator pengolahan air. Sebaliknya, masalah ini lebih banyak disebabkan oleh kesalahan manusia dalam proses penginputan data ke dalam sistem kontrol. Kesalahan input data ini biasanya berupa kekeliruan seperti salah ketik atau *typo* yang terjadi pada saat operator memasukkan informasi penting terkait dosis koagulan. Kesalahan tersebut cenderung lebih sering terjadi ketika operator mengalami kelelahan fisik dan mental serta penurunan tingkat konsentrasi selama menjalankan tugasnya. Kondisi ini dipengaruhi oleh faktor beban kerja yang tinggi dan jadwal kerja yang padat, yang membuat operator rentan melakukan kesalahan karena kurangnya waktu istirahat yang cukup dan tekanan dari tuntutan kerja.

Pada faktor mesin, adalah terkait ketidakakuratan sensor pH meter yang digunakan dalam proses pengolahan air. Ketidakakuratan tersebut disebabkan oleh kurangnya kepatuhan terhadap jadwal kalibrasi yang sudah ditentukan. Dari hasil penelusuran lebih mendalam, ditemukan bahwa jadwal kalibrasi sering terlewat karena sistem pelacakan yang digunakan masih manual dan tidak dilengkapi dengan mekanisme verifikasi yang memadai. Akibatnya, tidak ada kepastian bahwa kalibrasi dilakukan secara tepat waktu sesuai standar prosedur. Selain itu, pelaksanaan kalibrasi sangat bergantung pada inisiatif individu tanpa adanya audit atau pemeriksaan silang secara rutin. Ketergantungan ini menjadi kelemahan utama karena tanpa pengawasan yang memadai, kesalahan atau kelalaian bisa terjadi dan sulit dideteksi lebih awal. Oleh sebab itu, dapat disimpulkan bahwa akar masalah pada faktor mesin berkaitan dengan sistem pengelolaan pemeliharaan yang belum efektif, terutama dalam pengaturan jadwal kalibrasi sensor pH

meter yang seharusnya dilaksanakan secara sistematis dan diawasi ketat.

Faktor selanjutnya yaitu metode. Masalah utama yang ditemukan adalah ketidaksesuaian pelaksanaan prosedur pemeliharaan sensor dengan jadwal yang sudah ditetapkan. Artinya, kegiatan pemeliharaan yang seharusnya dilakukan secara terencana untuk mencegah kerusakan atau gangguan pada sensor sering kali terlambat dilakukan atau bahkan terabaikan. Hasil observasi menunjukkan adanya kecenderungan untuk lebih mengutamakan perbaikan reaktif, yaitu perbaikan yang dilakukan setelah sensor mengalami kerusakan atau gangguan, daripada pemeliharaan preventif yang dilakukan secara berkala dan terjadwal. Perbaikan reaktif ini bersifat mendadak dan kurang terencana, sehingga sering menyebabkan waktu henti yang lebih lama, biaya perbaikan yang lebih tinggi, serta gangguan pada kelancaran proses operasional. Sementara itu, pemeliharaan preventif bertujuan untuk mendeteksi dan mengatasi potensi masalah sebelum menimbulkan kerusakan serius, yang memungkinkan sensor berfungsi lebih stabil dan memperpanjang umur alat. Berdasarkan observasi, pemeliharaan preventif kurang menjadi prioritas, kemungkinan disebabkan oleh keterbatasan waktu, sumber daya, atau kurangnya kesadaran akan pentingnya pemeliharaan rutin. Kondisi ini berdampak negatif, seperti meningkatnya frekuensi kerusakan sensor, menurunnya kualitas data yang dihasilkan, serta tingginya risiko kegagalan sistem.

Poin terakhir yang diidentifikasi adalah faktor lingkungan. Pada kondisi iklim yang ekstrem, operator sering kali menghadapi kesulitan untuk merespon situasi karena mereka harus memilih antara menjaga aliran air tetap lancar atau mempertahankan kualitas air yang semakin menurun. Pilihan ini terjadi karena keterbatasan sumber daya dan peralatan yang tersedia, sehingga tidak memungkinkan untuk mengelola kedua aspek tersebut secara optimal dalam waktu bersamaan. Keterbatasan ini disebabkan oleh sistem pengelolaan dan infrastruktur yang belum dirancang khusus untuk mengantisipasi dampak perubahan iklim yang semakin ekstrim. Selain itu, perencanaan adaptasi terhadap perubahan iklim dalam manajemen operasional juga masih kurang diperhatikan. Hal ini terjadi karena kesadaran dan kebijakan terkait mitigasi serta adaptasi perubahan iklim belum menjadi prioritas utama pada tingkat manajemen maupun operasional. Dengan demikian, permasalahan yang dihadapi tidak hanya berasal dari perubahan iklim itu sendiri, melainkan juga dari kurangnya kesiapan dan perencanaan yang memadai dalam menghadapi perubahan lingkungan yang semakin menantang.

3.7 Usulan Perbaikan

Untuk meningkatkan kualitas produksi air pada IPA Babakan, perlu adanya perbaikan. Dengan melihat analisis sebab akibat yang telah dilakukan dengan

menggunakan diagram *fishbone*, selanjutnya dapat memberikan usulan perbaikan yang pada masing masing variabel paling banyak muncul serta permasalahan yang menjadi penyebab utama permasalahan air produksi IPA Babakan milik PDAM Tirta Kerta Raharja.

Pada faktor manusia, beberapa perbaikan dapat dilakukan untuk meminimalkan kesalahan input data dosis koagulan. Secara prosedural, penerapan sistem verifikasi ganda (*two-person verification*) sangat penting, di mana setiap penginputan data dosis koagulan harus diperiksa dan disetujui oleh personil kedua atau atasan jaga sebelum dimasukkan ke dalam sistem, sehingga dapat mengurangi risiko kesalahan akibat ketidakhatian. Selanjutnya, secara teknis, fitur validasi data otomatis pada sistem kontrol dapat diprogram untuk memberikan peringatan apabila nilai yang dimasukkan berada di luar rentang operasional yang wajar, sehingga berfungsi sebagai pengaman tambahan terhadap kesalahan input. Untuk mengurangi beban kognitif operator, pembuatan *checklist* atau formulir standar juga diperlukan agar proses penginputan dapat dilakukan secara sistematis dan terstruktur. Selain itu, peninjauan jadwal kerja dan alokasi beban kerja secara berkala perlu dilakukan untuk mengidentifikasi jam-jam rawan kelelahan dan menerapkan rotasi tugas, khususnya pada pekerjaan yang memerlukan konsentrasi tinggi, demi menjaga kewaspadaan operator. Penjadwalan kerja yang lebih fleksibel dengan waktu istirahat cukup antar shift juga penting guna memulihkan kondisi fisik dan mental operator. Penggunaan alat bantu seperti *checklist* elektronik atau notifikasi pengingat saat penginputan data juga bermanfaat untuk mengurangi risiko kelalaian. Terakhir, integrasi sistem input otomatis dari sensor atau alat ukur yang langsung terhubung ke sistem kontrol sangat membantu untuk mengurangi ketergantungan pada input manual, sehingga proses penginputan data menjadi lebih akurat tanpa menambah beban kerja operator.

Salah satu aspek penting dalam pengolahan air adalah pengendalian dosis koagulan yang tepat agar pH air tetap stabil selama proses berlangsung. Karena dosis koagulan yang akurat dan konsisten berperan penting dalam menjaga kestabilan pH air selama proses pengolahan. Kesalahan penginputan dosis koagulan dapat menyebabkan perubahan pH yang tidak diinginkan, mengganggu proses kimia dan efektivitas pengendapan partikel. Dengan menerapkan sistem verifikasi, validasi otomatis, penggunaan *checklist*, pengelolaan jadwal kerja yang baik, serta integrasi input otomatis, risiko kesalahan dapat diminimalkan sehingga nilai pH tetap berada dalam rentang optimal. Kondisi pH yang stabil ini memastikan proses flokulasi berjalan efektif dan kualitas air hasil pengolahan sesuai dengan standar yang ditetapkan. Oleh karena itu, perbaikan faktor manusia dalam penginputan data dosis koagulan secara tidak langsung tetapi sangat signifikan berdampak pada keberhasilan pengendalian

nilai pH dan mutu air. Dengan demikian, kualitas pengolahan air dapat terjaga dengan lebih optimal melalui langkah-langkah perbaikan ini.

Pada faktor mesin, beberapa rekomendasi perbaikan dapat dilakukan untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan pemeliharaan. Pertama, perlu diimplementasikan sistem pengingat otomatis untuk jadwal kalibrasi agar tidak terlewat dan kalibrasi dapat dilakukan tepat waktu sesuai dengan standar prosedur. Sistem ini harus dilengkapi dengan mekanisme verifikasi atau konfirmasi guna memastikan setiap kalibrasi sudah dilaksanakan dengan benar. Kedua, pelaksanaan kalibrasi hendaknya tidak hanya bergantung pada inisiatif individu, melainkan juga didukung oleh audit atau pemeriksaan silang secara rutin yang bisa mendeteksi adanya kelalaian lebih awal. Ketiga, pengelolaan jadwal kalibrasi harus disusun secara sistematis dan terdokumentasi dengan baik sehingga menjadi acuan yang jelas bagi tim pemeliharaan. Selain itu, untuk mengurangi ketergantungan pada inisiatif individu, harus ada penunjukan Penanggung Jawab (PIC) Kalibrasi yang bertugas memastikan jadwal kalibrasi dipatuhi dan hasilnya tervalidasi. Untuk mendukung tugas PIC dan mengatasi masalah pelacakan manual, dapat diterapkan kalender digital terpusat dengan pengingat otomatis agar tidak ada jadwal yang terlewat. Sebagai langkah perbaikan langsung atas kurangnya mekanisme verifikasi, *logbook* manual dapat disempurnakan dengan menambahkan kolom verifikasi yang wajib ditandatangani oleh atasan atau PIC, sehingga proses audit dan pemeriksaan silang dapat berjalan secara rutin.

Dalam proses pengolahan air, pengukuran nilai pH yang tepat menjadi salah satu faktor kunci untuk menjamin kualitas air yang dihasilkan. Sensor pH meter yang selalu terkalibrasi dengan benar akan memberikan pengukuran yang akurat dan konsisten. Akurasi sensor pH yang terjaga akan memastikan nilai pH yang terdeteksi mencerminkan kondisi nyata dari air yang diolah. Jika kalibrasi sensor tidak dilakukan tepat waktu atau tidak sesuai prosedur, hasil pengukuran pH dapat menjadi tidak valid, sehingga proses pengaturan kimiawi seperti penambahan koagulan dan bahan kimia lainnya bisa menjadi kurang tepat sasaran. Kondisi ini berdampak langsung pada stabilitas nilai pH yang sangat berpengaruh pada efektivitas proses flokulasi dan kualitas air yang dihasilkan. Oleh karena itu, perbaikan sistem pengelolaan kalibrasi sensor pH meter secara menyeluruh menjadi sangat krusial untuk menjaga kestabilan nilai pH dan menjamin mutu air sesuai standar yang diharapkan. Dengan langkah-langkah ini, diharapkan pengelolaan kalibrasi sensor pH meter menjadi lebih efektif, sehingga dapat mengurangi kesalahan, dan meningkatkan keakuratan pengukuran dalam proses pengolahan air.

Pada faktor metode, terdapat ketidaksesuaian pelaksanaan prosedur pemeliharaan sensor dengan jadwal yang sudah ditetapkan. Beberapa saran perbaikan

yang dapat diterapkan adalah sebagai berikut. Langkah awal yang penting adalah menyusun jadwal pemeliharaan preventif yang jelas, rinci, dan terstruktur, mencakup frekuensi harian, mingguan, bulanan, hingga tahunan sesuai dengan kebutuhan alat. Jadwal ini berguna agar tim pemeliharaan dapat melakukan tindakan secara rutin tanpa melewatkan waktu yang sudah ditentukan. Selanjutnya, integrasi sistem pengingat otomatis atau kalender digital sangat dibutuhkan agar pelaksanaan pemeliharaan dapat dimonitor secara *real time*. Sistem ini sebaiknya menyediakan notifikasi pengingat sebelum jadwal pemeliharaan tiba, sehingga mengurangi kemungkinan keterlambatan dan menghilangkan ketergantungan pada ingatan manusia. Selain itu, pengaktifan mekanisme *monitoring* dan pelaporan berkala menjadi langkah penting berikutnya. Tim pemeliharaan diwajibkan melaporkan pelaksanaan dan kondisi sensor setelah pengecekan, yang berfungsi tidak hanya sebagai dokumentasi, tetapi juga sebagai alat bagi manajemen untuk melakukan pengawasan dan intervensi untuk langkah selanjutnya jika ditemukan adanya ketidaksesuaian. Dengan menerapkan sistem koordinasi dan pengawasan yang terorganisir, pemeliharaan preventif dapat dipastikan berjalan sesuai rencana sehingga dapat menghindari kerusakan mendadak, memperpanjang masa pakai, serta memastikan operasional berjalan lancar dan efisien.

Keakuratan dan keandalan pengukuran nilai pH sangat bergantung pada kondisi sensor pH yang digunakan dalam sistem pengolahan air. Sensor pH yang dipelihara secara tepat waktu dan sesuai prosedur mampu memberikan hasil pengukuran yang akurat dan dapat diandalkan. Jika pemeliharaan sensor dilakukan tidak teratur atau terlambat, sensor bisa mengalami malfungsi atau penurunan sensitivitas yang menyebabkan data pH menjadi tidak valid. Ketidakakuratan pengukuran pH ini dapat berujung pada keputusan operasional yang salah, seperti pemberian dosis koagulan atau bahan kimia lain yang tidak tepat, sehingga pH air tidak berada dalam rentang optimal. Dengan jadwal pemeliharaan yang terstruktur, pengingat otomatis, serta *monitoring* dan pelaporan berkala, kualitas pengukuran pH terjaga dengan baik. Hal ini memastikan proses pengolahan air berlangsung secara efektif dan nilai pH dapat dikontrol dengan stabil, sehingga kualitas air yang dihasilkan memenuhi standar yang diharapkan.

Faktor lingkungan menjadi poin terakhir yang diidentifikasi sebagai penyebab masalah, khususnya pada kondisi iklim ekstrem yang menghambat kemampuan operator dalam menanggapi situasi secara optimal. yang perlu dilakukan adalah menyusun protokol adaptasi khusus yang dirancang untuk menghadapi perubahan iklim ekstrem, sekaligus meningkatkan ketersediaan infrastruktur dan sumber daya cadangan seperti pompa dan alat pengatur aliran air. Selain itu, optimalisasi pemanfaatan sistem *monitoring* digital yang sudah ada,

seperti SCADA, perlu dilakukan dengan memperkuat proses analisis data dan respons otomatis agar peringatan dini yang dihasilkan menjadi lebih cepat. Pelatihan kesiapsiagaan bagi operator dan manajemen juga penting dilakukan agar dapat merespon situasi secara efektif. Langkah-langkah ini dilakukan untuk meningkatkan kesiapan operasional dalam menjaga kelancaran aliran dan kualitas air secara bersamaan, serta meminimalkan risiko gangguan yang muncul akibat perubahan iklim. Pelaksanaan perbaikan ini melibatkan tim manajemen operasional, operator lapangan, serta tim teknis pengembangan dan pemeliharaan infrastruktur. Cara pelaksanaannya meliputi penerapan protokol operasional yang jelas dan standar, penyediaan serta pengujian peralatan cadangan secara rutin, integrasi sistem pengingat dan *monitoring* digital untuk pengawasan *real time*, serta penguatan koordinasi antar tim operasional dan manajemen untuk respons cepat dan tepat. Di samping itu, kebijakan manajemen risiko harus memasukkan faktor perubahan iklim sebagai aspek penting dalam pengelolaan sistem air agar pengelolaan menjadi lebih adaptif dan berkelanjutan.

Salah satu aspek krusial dalam pengelolaan sistem pengolahan air adalah kemampuan untuk menjaga kestabilan nilai pH meskipun menghadapi tekanan dari kondisi lingkungan yang berubah-ubah. Karena kondisi iklim ekstrem dapat menyebabkan fluktuasi kualitas air termasuk perubahan nilai pH yang signifikan. Gangguan pada aliran dan kualitas air akibat tekanan lingkungan bisa menyebabkan nilai pH menjadi tidak stabil, yang pada akhirnya mengganggu proses kimia pengolahan air seperti flokulasi dan koagulasi. Dengan adanya protokol adaptasi, pemanfaatan optimal teknologi *monitoring*, serta kesiapsiagaan operator dan manajemen. Proses pengendalian nilai pH dapat dilakukan dengan lebih tepat dan cepat merespon perubahan yang terjadi. Stabilitas nilai pH yang terjaga akan memastikan efektivitas pengolahan air dan mutu air yang dihasilkan tetap memenuhi standar kualitas yang ditetapkan. Oleh karena itu, perbaikan pada faktor lingkungan melalui langkah-langkah tersebut turut berkontribusi secara signifikan dalam menjaga kestabilan nilai pH dan kualitas pengolahan air secara keseluruhan.

Secara umum, alur proses produksi yang sudah ditetapkan oleh perusahaan sudah sangat baik. Pada dasarnya, hal ini hanya perlu pengecekan secara teliti pada tiap-tiap tahapan proses produksi beserta peralatan yang dipakai. Hal ini mengindikasikan pentingnya *quality control* pada proses produksi suatu perusahaan. Karena dengan adanya *quality control*, produk yang dihasilkan meningkat baik dari segi kualitas maupun kuantitas.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengendalian kualitas proses produksi air minum pada Instalasi Pengolahan Air (IPA) Babakan milik PDAM Tirta Kerta Raharja dengan menggunakan peta kendali multivariat, peta kendali MEWMA. Tahap awal dalam penelitian diawali dengan penentuan nilai *Upper Control Limit* (UCL) dan parameter pembobot λ untuk mengoptimalkan sensitivitas dan respons peta kendali MEWMA pada fase I. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai λ 0,9 merupakan pilihan terbaik karena mampu memberikan keseimbangan optimal antara *false alarm* yang rendah dan kemampuan mendeteksi pergeseran proses secara efektif. Implementasi pada fase II dengan UCL sebesar 12,843 dan λ 0,9 memperlihatkan bahwa proses produksi air umumnya berada dalam kondisi terkendali, meskipun terdapat tiga titik *out of control* yang mengindikasikan ketidakstabilan pada periode pemantauan. Yaitu observasi ke-6 dengan nilai T^2 sebesar 19,0691, observasi ke-16 dengan nilai T^2 sebesar 14,5547, dan observasi ke-41 dengan nilai T^2 sebesar 14,9988. Melalui analisis dekomposisi Mason Young and Tracy (MYT), diketahui bahwa variabel pH dan kekeruhan secara bergantian menjadi penyebab utama ketidakstabilan proses, dengan dominasi kontribusi parameter pH terbesar dengan nilai kontribusi sebesar 15,3116 pada observasi ke 16. Variabel pH kemudian ditetapkan sebagai prioritas utama untuk dianalisis dan diperbaiki lebih lanjut guna mengembalikan kestabilan proses produksi air.
2. Diagram *fishbone* disusun berdasarkan hasil diskusi dan analisis *root cause* yang mengidentifikasi berbagai penyebab utama nilai pH tinggi. Faktor penyebab dikelompokkan menjadi empat kategori utama, yaitu manusia, mesin, metode, dan lingkungan. Pada faktor manusia, masalah utama terletak pada pemberian dosis koagulan yang kurang karena kesalahan input data yang sering terjadi akibat operator kelelahan dan penurunan konsentrasi. Faktor mesin terkait dengan ketidakakuratan sensor pH meter yang disebabkan oleh kurangnya kepatuhan terhadap jadwal kalibrasi yang masih dilakukan secara manual dan tanpa mekanisme verifikasi yang efektif. Sementara itu, pada faktor metode, prosedur pemeliharaan sensor yang tidak dijalankan sesuai jadwal menyebabkan dominasi perbaikan reaktif dibandingkan pemeliharaan preventif, sehingga meningkatkan risiko kerusakan sensor dan penurunan kualitas data. Faktor terakhir adalah lingkungan, di mana kondisi iklim ekstrem memaksa operator untuk memilih antara menjaga aliran air atau kualitas air

karena keterbatasan sumber daya dan peralatan yang belum siap menghadapi perubahan iklim. Kurangnya perencanaan adaptasi terhadap perubahan iklim pada tingkat manajemen semakin memperburuk situasi.

Setelah faktor-faktor penyebab utama diidentifikasi melalui analisis yang telah dilakukan, langkah selanjutnya adalah merumuskan usulan perbaikan yang ditujukan secara langsung pada setiap faktor tersebut. Pada faktor manusia, diterapkan sistem verifikasi ganda penginputan dosis dan fitur validasi data otomatis untuk mengurangi kesalahan input. Penjadwalan kerja yang lebih baik dan penerapan rotasi tugas juga dimaksudkan untuk menjaga konsentrasi operator. Faktor mesin diperbaiki dengan penggunaan sistem pengingat kalibrasi otomatis, audit rutin, dan penunjukan PIC kalibrasi untuk memastikan kepatuhan jadwal. Pada faktor metode, perlu dibuat jadwal pemeliharaan preventif terstruktur yang didukung *monitoring* dan pelaporan berkala agar pemeliharaan berjalan sesuai rencana. Sedangkan pada faktor lingkungan, disarankan penyediaan fasilitas cadangan serta pengembangan protokol khusus menghadapi cuaca ekstrem, ditambah dengan peningkatan koordinasi antar tim agar penanganan dampak perubahan iklim dapat dilakukan secara cepat dan terintegrasi. Dengan penerapan usulan perbaikan ini, diharapkan masalah nilai pH tinggi pada produksi air dapat diminimalisir secara signifikan, sehingga kualitas air yang dihasilkan IPA Babakan dapat lebih terjamin dan proses pengolahan air berjalan lebih optimal dan berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat dalam PDAM Tirta Kerta Raharja, serta pembimbing penelitian yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam menyelesaikan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Ahsan, M., Indarsanto, R. W., Rifki, K. A. F., & Lee, M. H. (2025). Residual-based Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Chart For Statistical Process Control of Water Quality In Surabaya City Utilizing Generative Adversarial Network. *MethodsX*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103504>
- Arifa, A. N., Santoso, R., & Widiharih, T. (2019). Perbandingan Diagram Kontrol MEWMA dan Diagram Kontrol T^2 Hotelling (Studi Kasus : PT Daya Manunggal Kota Salatiga). 8(1), 12–23. <http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/gaussian>

- Ayu Maharani, A., Statistika, D., & Sains dan Matematika, F. (2018). *Penerapan Diagram Kontrol MEWMA dan MEWMV Pada Pengendalian Kualitas Air (Studi Kasus: Kualitas Pengolahan Air II PDAM Tirta Moedal Kota Semarang)*. 7(1), 23–32.
- Fitri, I. A. N., & Dhuriyah, N. (2022). Analisa Pengendalian Kualitas Produk Menggunakan Metode Six Sigma di PT Pertamina Lubricants Production Unit Gresik.
- Garvin, D. A. (1987). *Competing on the Eight Dimensions of Quality Harvard Business Review*.
- Gejdoš, P. (2015). Continuous Quality Improvement by Statistical Process Control. *Procedia Economics and Finance*, 34, 565–572. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(15\)01669-x](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(15)01669-x)
- Herdiani, E. T., & Nasir, R. S. (2025). Improving Statistical Process Control For Water Quality In Catfish Farming With Robust Ewma and Alternative Estimators. *Communications in Mathematical Biology and Neuroscience*, 2025. <https://doi.org/10.28919/cmbn/9229>
- Irwan, D. H. (2015). Pengendalian Kualitas Statistik (Pendekatan Teoritis dan Aplikatif). *Teaching and Teacher Education* (Vol. 12, Nomor 1).
- Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2007). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall ; Pearson Education Limited.
- Juran, J. M. ., & Godfrey, A. Blanton. (1999). *Juran's Quality Handbook* (J. M. Juran, A. B. Godfrey, E. R. Hoogstoel, & G. E. Schilling, Ed.; Fifth Edition). McGraw Hill.
- Kallista, V., & Asbanu, G. C. (2023). Analisis Efektivitas Penggunaan Elektroklorinasi dan Gas Klor Pada Proses Disinfeksi Air Minum (Studi Kasus: PERUMDA Air Minum Tirta Khatulistiwa). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 21, no. 2, pp. 269-278. <https://doi.org/10.14710/jil.21.2.269-278>
- Kemenkes. (2023). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 Tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan*. www.peraturan.go.id.
- Kurniasari, F., & Sugiyanto, K. E. (2020). Dimensi Kualitas Pelayanan Sebagai Upaya Peningkatan Kepuasan Pelanggan (Studi Pada Pelanggan Hotel X Semarang). *Business Management Analysis Journal (BMAJ)* (Vol. 3, Nomor 2).
- Marais, H. L., Zaccaria, V., & Odlare, M. (2022). Comparing statistical process control charts for fault detection in wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 85(4), 1250–1262. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.037>
- Mason, R. L., Tracy, N. D., & Young, J. C. (1995). Decomposition of T2 for multivariate control chart interpretation. *Journal of Quality Technology*, 27(2), 99–108. <https://doi.org/10.1080/00224065.1995.11979573>
- Montgomery, D. C. (2012). *Introduction to Statistical Quality Control*.
- Morrison, D. F. (2005). *Multivariate Statistical Methods. Fourth Edition*.
- Pham. (2008). *Handbook of Engineering Statistics*.
- Qiu, P. (2004). *Some Perspectives On Nonparametric Statistical Process Control*.
- Rencher, A. C. . (2002). *Methods of multivariate analysis*. J. Wiley.
- Renngiwur, J., Lasaiba, I., & Mahulau, A. (2016). Analisis Kualitas Air Yang Di Konsumsi Warga Desa Batu Merah Kota Ambon. *Jurnal Biology Science & Education*, 101.
- Russel, R. S., & Taylor, B. W. (2010). *Operations Management. Dalam 2010*.
- Sadiq, R., & Rodriguez, M. J. (2004). Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: A review. *Dalam Science of the Total Environment* (Vol. 321, Nomor 1–3, hlm. 21–46). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.05.001>
- Shiyami, F. A., Rohmat, S., & Sopian, A. (2021). Analisis Pengendalian Kualitas Produk Dengan Statistical Process Control. *Jurnal Ilmiah Manajemen*.
- Snead, M. C., Olivieri, V. P., Kawata, K., & Kgus~, C. W. (1980). The Effectiveness Of Chlorine Residuals In Inactivation Of Bacteria And Viruses Introduced By Post-Treatment Contamination. *Water Research* (Vol. 14). Pergamon Press Ltd.
- Voltarelli, M. A., Paixão, C. S. S., de Oliveira, B. R., Angelo, E. P., & da Silva, R. P. (2021). Monitoring Tractor Performance Using Shewhart And Exponentially Weighted Moving Average Charts. *Engenharia Agricola*, 41(1), 62–69. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n1p62-69/2021>