

Penerapan Diagram Kendali *Multivariate Exponentially Weighted Moving Covariance Matrix* (MEWMC) pada Pengendalian Kualitas Proses Produksi Air di PDAM Surya Sembada Kota Surabaya

Yani Trimardiani, Muhammad Sjahid Akbar, dan Wibawati
Departemen Statistika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: m_syahid_a@statistika.its.ac.id

Abstrak—PDAM Surya Sembada Kota Surabaya adalah Badan Usaha Milik Daerah (BUMD) yang mengelola penyediaan air bersih bagi masyarakat Kota Surabaya. Terdapat 3 karakteristik utama kualitas air, yaitu kekeruhan, zat organik dan sisa *chlor* dimana ketiga karakteristik tersebut saling berhubungan. Oleh karena itu, pengendalian proses produksi air dilakukan secara multivariat dengan diagram kendali *Multivariate Exponentially Weighted Moving Covariance Matrix* (MEWMC) untuk pengendalian variabilitas proses. Pada penelitian ini, didapatkan pembobot λ optimum untuk diagram kendali MEWMC yaitu $\lambda = 0,1$. Variabilitas proses produksi air selama musim kemarau telah terkendali secara statistik setelah dilakukan pengendalian ke-13, sedangkan variabilitas proses produksi air selama musim hujan telah terkendali secara statistik pada pengendalian pertama. Penyebab variabilitas proses produksi air yang tidak terkendali secara statistik karena faktor bahan baku, pengukuran, metode, mesin, dan lingkungan.

Kata Kunci—Diagram Kendali, MEWMC, PDAM Surya Sembada, Pengendalian Proses.

I. PENDAHULUAN

PERUSAHAAN Daerah Air Minum (PDAM) Surya Sembada Kota Surabaya adalah Badan Usaha Milik Daerah (BUMD) yang mengelola penyediaan air bersih bagi masyarakat Kota Surabaya. Pengolahan air di PDAM Surya Sembada Kota Surabaya terdiri atas 3 jenis, yaitu pengolahan secara fisik, kimia dan biologi. Pengolahan fisik dengan cara sedimentasi kemudian filtrasi, proses kimia dengan cara aerasi, koagulasi dan proses biologi dengan cara memusnahkan bakteri dengan pembubuhan disinfektan. Selain itu, untuk menjaga kualitas air bersih yang akan didistribusikan ke pelanggan, PDAM Surya Sembada Kota Surabaya melakukan uji kualitas air secara berkala di laboratorium.

Pada awal Juli 2019, pelanggan PDAM mendapatkan air keruh atau menguning. Ada dua hal yang mengakibatkan turunnya kualitas air pada awal Juli 2019. Pertama, banyak pipa bocor karena tergerus alat berat pengerjaan gorong-gorong. Saat terjadi kebocoran, air keruh dari luar pipa terbawa hingga ke pelanggan. Penyebab kedua adalah pencemaran air baku. PDAM mengambil air baku dari anak Sungai Brantas yakni Kali Suroboyo.

PDAM Surya Sembada Kota Surabaya memiliki 6 Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM), diantaranya IPAM Ngagel I, IPAM Ngagel II, IPAM Ngagel III, IPAM Karangpilang I,

IPAM Karangpilang II, dan IPAM Karangpilang III. IPAM Ngagel I merupakan IPAM pertama yang dibangun dan beberapa unit pengolahan di IPAM Ngagel I masih manual. Oleh karena itu, diperlukan adanya pengendalian kualitas untuk proses pengolahan air di IPAM Ngagel I PDAM Surya Sembada Kota Surabaya.

Pengendalian kualitas statistika merupakan penggunaan metode statistik dalam memantau dan mempertahankan kualitas produk dan layanan, sedangkan *Statistical Process Control* (SPC) didefinisikan sebagai penggunaan teknik statistik untuk mengontrol suatu proses atau metode produksi. Salah satu alat yang dapat digunakan untuk melakukan pengendalian kualitas proses yaitu dengan diagram kendali [1]. Pengendalian kualitas air PDAM Surya Sembada Kota Surabaya dilakukan dengan melihat beberapa karakteristik kualitas, diantaranya kekeruhan (*turbidity*), zat organik (KMnO_4), dan sisa *chlor*. Karena ketiga karakteristik kualitas ini saling berhubungan, pengendalian kualitas dilakukan dengan diagram kendali multivariat.

Diagram kendali multivariat yang sensitif terhadap pergeseran rata-rata proses yang kecil yaitu diagram kendali *Multivariate Exponentially Weighted Moving Average* (MEWMA) yang diusulkan oleh Lowry dkk pada tahun 1992. Diagram kendali MEWMA adalah salah satu dari diagram kendali yang terbaik untuk mendeteksi pergeseran vektor rata-rata proses yang kecil, namun pergeseran itu dapat terjadi untuk variabilitas dari karakteristik multivariat yang berkorelasi. Hawkins dan Maboudou-Tchao pada tahun 2008 mengkaji diagram kendali yang digunakan untuk *monitoring* pergeseran variabilitas menggunakan *Multivariate Exponentially Weighted Moving Covariance Matrix* (MEWMC).

Penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan kualitas air di PDAM Surya Sembada Kota Surabaya menggunakan diagram kendali *Maximum Multivariate Cumulative Sum*. Kesimpulan yang didapatkan pada penelitian tersebut yaitu kinerja proses produksi air di IPAM Ngagel I tidak kapabel, dimana variabel *turbidity* (kekeruhan) merupakan variabel yang berkontribusi besar dalam menyebabkan pengamatan *out of control* [2]. Penelitian sebelumnya yang menggunakan diagram kendali MEWMC dilakukan untuk pengendalian kualitas semen di PT Semen “X” menunjukkan bahwa nilai pembobot optimum untuk pengendalian kualitas semen yaitu $\lambda = 0,1$. Penggunaan diagram kendali MEWMC dipilih karena diagram kendali ini

efektif memonitor perubahan dalam matriks kovarians, dimana diagram kendali ini unggul ketika varians atau korelasi mengalami perubahan [3].

Berdasarkan uraian yang telah disampaikan dan beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, dilakukan pengendalian variabilitas proses produksi air di IPAM Ngagel I PDAM Surya Sembada Kota Surabaya dengan diagram kendali MEWMC untuk mendeteksi pergeseran variabilitas proses yang kecil. Apabila terdapat pengamatan yang *out of control*, dideteksi penyebabnya dengan menggunakan diagram sebab-akibat.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Uji Normal Multivariat

Pengujian distribusi normal multivariat dapat dilakukan dengan uji *Shapiro-Wilk*. Pengujian distribusi normal multivariat menggunakan hipotesis sebagai berikut.

Hipotesis:

H_0 : Data berdistribusi normal multivariat

H_1 : Data tidak berdistribusi normal multivariat

Statistik uji normal multivariat untuk uji *Shapiro-Wilk* ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$W^* = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p W_{z_j} \quad (1)$$

Tolak H_0 jika pada taraf signifikansi α , $p\text{-value} < \alpha$ atau $W^* < c_{\alpha,n,p}$, dengan c merupakan nilai kuantil statistik *Saphiro-Wilk* [4].

B. Uji Dependensi

Uji dependensi digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antar variabel dalam kasus multivariat. Jika variabel X_1, X_2, \dots, X_p bersifat saling bebas, maka matriks korelasi antar variabel sama dengan matriks identitas. Untuk menguji kebebasan antar variabel, dapat dilakukan uji *Bartlett* [5]. Uji *Bartlett* dapat dinyatakan dalam hipotesis sebagai berikut.

Hipotesis:

H_0 : $\mathbf{R} = \mathbf{I}$ (tidak terdapat korelasi antar variabel)

H_1 : $\mathbf{R} \neq \mathbf{I}$ (terdapat korelasi antar variabel)

Statistik uji untuk uji *Bartlett* ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$\chi_{hitung}^2 = - \left[n - 1 - \frac{2p+5}{6} \right] \ln |R|. \quad (2)$$

Pada Persamaan (2), n adalah jumlah observasi, sedangkan p adalah jumlah variabel, dan \mathbf{R} adalah matriks korelasi. Jika ditetapkan tingkat signifikansi α , maka H_0 ditolak jika nilai $\chi_{hitung}^2 > \chi_{(\alpha; \frac{1}{2}p(p-1))}^2$ dengan derajat bebas sebesar $\frac{1}{2}p(p-1)$ atau $p\text{-value} < \alpha$. Sehingga dapat disimpulkan bahwa matriks korelasi tidak sama dengan matriks identitas atau terdapat korelasi antar variabel [5].

C. Multivariate Exponentially Weighted Moving Covariance Matrix (MEWMC)

Pengendalian kualitas statistika merupakan penggunaan metode statistik dalam memantau dan mempertahankan kualitas produk dan layanan, sedangkan *Statistical Process Control* (SPC) didefinisikan sebagai penggunaan teknik

statistik untuk mengontrol suatu proses atau metode produksi. Salah satu alat yang dapat digunakan untuk melakukan pengendalian kualitas proses yaitu dengan diagram kendali [1]. Diagram kendali *Multivariate Exponentially Weighted Moving Average* (MEWMA) merupakan salah satu dari diagram kendali yang baik untuk mendeteksi pergeseran vektor rata-rata proses yang kecil. Namun, pergeseran dapat terjadi juga pada variabilitas dari karakteristik kualitas multivariat yang saling berkorelasi. Diagram kendali *Multivariate Exponentially Weighted Moving Covariance Matrix* (MEWMC) digunakan untuk memonitor stabilitas matriks kovarians suatu proses.

Penggunaan MEWMC lebih mudah jika menggunakan vektor data yang telah distandarisasi dibandingkan jika menggunakan data mentah x_i [6]. Statistik uji pada diagram kendali MEWMC dihitung sesuai Persamaan (3).

$$c_i = \text{tr}(\mathbf{S}_i) - \log|\mathbf{S}_i| - p. \quad (3)$$

Keterangan:

c_i : Statistik uji,

p : Jumlah variabel,

\mathbf{S}_i : Matriks MEWMC yang diperoleh dari Persamaan (4).

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_0 &= \mathbf{I}_p \\ \mathbf{S}_i &= (1 - \lambda)\mathbf{S}_{i-1} + \lambda u_i u_i^T, \text{ untuk } i=1,2,\dots,n. \end{aligned} \quad (4)$$

Perhitungan \mathbf{S}_i merupakan proses rekursif, dengan matriks identitas sebagai nilai inisial. Ketika variabilitas proses terkendali, maka $E(\mathbf{S}_i) = \mathbf{I}_p$. λ merupakan pembobot yang bernilai $0 < \lambda \leq 1$ dan \mathbf{u}_i adalah vektor data yang telah ditransformasi sesuai Persamaan (5).

$$u_i = \mathbf{A}(x_i - \boldsymbol{\mu}_0). \quad (5)$$

x_i adalah vektor data ke- i , dengan $i = 1,2,\dots,n$ dan $\boldsymbol{\mu}_0$ merupakan vektor rata-rata proses. Ketika variabilitas proses terkendali, data yang telah ditransformasi berdistribusi normal standar. Matriks \mathbf{A} merupakan matriks segitiga bawah yang dihitung berdasarkan invers matriks Cholesky dari matriks varians kovarians data. Oleh karena itu, dihitung matriks \mathbf{A} yang memenuhi Persamaan (6).

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{A}^T = \mathbf{I}_p. \quad (6)$$

$\boldsymbol{\Sigma}$ merupakan matriks varians kovarians dari data, dan matriks \mathbf{A} didapatkan melalui perhitungan pada Persamaan (7).

$$\mathbf{A} = \mathbf{L}^{-1}, \quad (7)$$

dengan \mathbf{L} merupakan matriks segitiga bawah yang memiliki nilai diagonal yang *real* dan positif. Matriks \mathbf{L} merupakan matriks dekomposisi Cholesky dari matriks varians kovarians dari data sesuai pada Persamaan (8).

$$\boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{L}\mathbf{L}^T. \quad (8)$$

Diagram kendali MEWMC dibentuk dengan plot c_i terhadap i . Pengamatan dikatakan *Out of Control* (OOC) ketika $c_i > h$, dengan batas kendali h dipilih untuk mencapai *In-Control Average Run Length* (ARL_0) yang ditentukan. Batas kendali h didapatkan dengan simulasi Monte Carlo dengan mempertimbangkan jumlah variabel (p), pembobot λ dan ARL_0 yang ditentukan. Simulasi Monte Carlo yang digunakan menggunakan bangkitan data yang berdistribusi normal multivariat. Nilai λ yang kecil digunakan untuk mendeteksi pergeseran proses yang kecil, dan nilai λ yang besar digunakan untuk mendeteksi pergeseran proses yang besar [6].

D. Diagram Sebab Akibat

Diagram sebab-akibat (*cause-and-effect diagram*) yang juga dikenal sebagai diagram Ishikawa atau diagram tulang ikan merupakan suatu alat yang berguna untuk mengidentifikasi penyebab-penyebab yang mungkin dari suatu masalah.

E. PDAM Surya Sembada Kota Surabaya

Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Surya Sembada Kota Surabaya adalah Badan Usaha Milik Daerah (BUMD) yang mengelola penyediaan air bersih bagi masyarakat Kota Surabaya. Sumber bahan baku pembuatan air minum di PDAM Surya Sembada Kota Surabaya berasal dari kali Surabaya. Berikut merupakan tahapan pengolahan air di PDAM Surya Sembada Kota Surabaya.

1) Pra Sedimentasi

Pra sedimentasi adalah proses pengendapan untuk memisahkan benda-benda tersuspensi secara gravitasi seperti pasir kasar, pasir halus, dan lumpur dari air baku.

2) Aerasi

Proses aerasi terjadi di aerator, dengan bentuk bangunan *cascade* (bertingkat), bertujuan untuk memperbanyak intensitas kontak antara air baku (air sungai) dengan oksigen. Hal ini berfungsi untuk meningkatkan *dissolved oxygen* / oksigen terlarut dalam air, pengurangan kandungan bahan organik lainnya, serta untuk menghilangkan bau, warna, dan rasa.

3) Koagulasi dan flokulasi

Koagulasi adalah proses pemberian koagulan ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) atau tawas cair dengan maksud mengurangi gaya tolak menolak antara partikel koloid (*dissolve solid*) atau lumpur sehingga partikel koloid (lumpur) tersebut bisa bergabung menjadi flok-flok kecil. Flokulasi adalah proses pemberian flokulan dengan *polymer* anionik / dukem dengan maksud menggabungkan flok-flok (lumpur) kecil menjadi besar dan stabil sehingga terpisah dengan supernatannya, yang pada akhirnya flok-flok tersebut mengendap di *sludge zone* sedangkan supernatannya (air yang sudah diendapkan lumpurnya) mengalir ke filter.

4) Filtrasi

Filtrasi merupakan proses pemisahan padatan yang tidak dapat dipisahkan pada proses sebelumnya, tetapi melalui proses penyaringan cepat dengan menggunakan media pasir silika dan batu gravel. Terdapat 192 petak filter di IPAM Ngagel I.

5) Desinfeksi

Proses membunuh bakteri yang masih ada di air dengan menggunakan disinfektan gas *chlor*.

6) Reservoir

Reservoir adalah tandon air yang berfungsi sebagai tempat penampungan air bersih yang berasal dari proses desinfeksi, air ini sudah menjadi air yang bersih yang siap digunakan dan harus dimasak terlebih dahulu untuk kemudian dapat dijadikan air minum.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Sumber Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari hasil uji laboratorium kualitas air di IPAM Ngagel I PDAM Surya Sembada Kota Surabaya. Data yang digunakan

Tabel 1.
Variabel penelitian

Variabel	Keterangan	Satuan	Batas Spesifikasi
X_1	Kekeruhan	NTU	Maksimal 5
X_2	Zat organik	mg/l	Maksimal 10
X_3	Sisa <i>Chlor</i>	mg/l	0,2 - 1

terdiri dari 3 variabel utama karakteristik kualitas air yaitu kekeruhan (*turbidity*), zat organik (KMnO_4), dan sisa *chlor*. Pengambilan sampel sebanyak 5 liter dilakukan setiap hari pada pukul 07.30.

Berdasarkan wawancara dan informasi yang diperoleh dari pihak PDAM Surya Sembada Kota Surabaya, ditentukan untuk musim kemarau yaitu pada tanggal 1 April – 30 November 2019, sedangkan musim hujan pada tanggal 1 Desember 2019 – 31 Maret 2020. Pembagian musim kemarau dan musim hujan oleh PDAM Surya Sembada Kota Surabaya berdasarkan adanya perbedaan perlakuan untuk proses pengolahan air pada bulan April 2019 – November 2019 (musim kemarau) dan proses pengolahan air pada bulan Desember 2019 – Maret 2020 (musim hujan). Pada musim hujan, debit air cenderung lebih tinggi, sehingga menimbulkan banyak endapan. Tingkat kekeruhan air baku pada musim hujan bisa mencapai 500-1000 NTU jika dibandingkan dengan tingkat kekeruhan air baku pada musim kemarau yang hanya sekitar 20-50 NTU. Oleh karena itu, terdapat perbedaan dalam kadar penambahan tawas pada tahap awal.

B. Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini merupakan parameter utama yang menjadi penentu kualitas air yang ditunjukkan pada Tabel 1.

C. Langkah Analisis

Langkah analisis yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Merumuskan masalah dan studi literatur.
2. Mengumpulkan data.
3. Melakukan eksplorasi data untuk mengetahui karakteristik pada setiap variabel kualitas air.
4. Melakukan uji asumsi normal multivariat.
5. Melakukan pengujian *Bartlett* untuk mengetahui apakah data variabel kualitas air saling berhubungan.
6. Melakukan analisis dengan diagram kendali MEWMC untuk memonitor variabilitas proses produksi air.
7. Mengidentifikasi penyebab terjadinya *out of control* dengan diagram sebab-akibat.
8. Menarik kesimpulan dan saran.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Kualitas Air Produksi

Sebelum melakukan pengendalian kualitas proses produksi air di IPAM Ngagel I, dilakukan analisis statistika deskriptif untuk masing-masing variabel kualitas air. Karakteristik variabel kualitas air yang disajikan yaitu ukuran pemusatan dan penyebaran data berupa *mean*, varians, nilai minimum, dan nilai maksimum.

Data kualitas air yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data kualitas air PDAM Surya Sembada Kota

Tabel 2.
Deskripsi karakteristik kualitas air produksi

Variabel	Mean	Varians	Min	Maks	Batas
Kekeruhan (NTU)	0,8447	0,0632	0,27	2,80	
Kemarau	0,8758	0,0615	0,32	2,80	< 5
Hujan	0,7831	0,0613	0,27	1,45	
Zat Organik (mg/l)	7,6987	4,7054	2,74	14,70	
Kemarau	7,4345	4,0193	3,18	14,70	< 10
Hujan	8,2225	5,6947	2,74	13,81	
Sisa Chlor (mg/l)	0,6171	0,1175	0,00	1,86	
Kemarau	0,5310	0,1129	0,00	1,86	0,2 - 1
Hujan	0,7879	0,0833	0,14	1,48	

Tabel 3.
Hasil uji distribusi normal multivariat

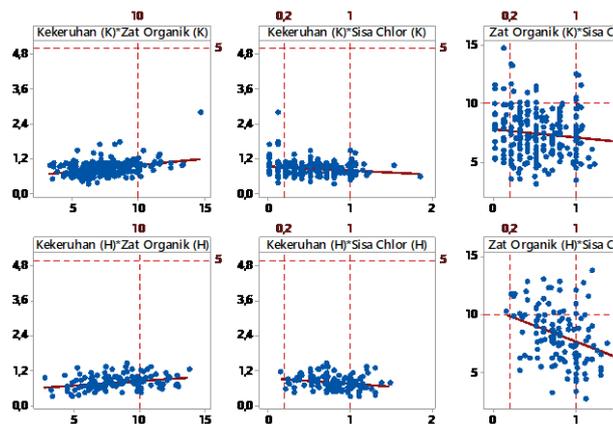
Musim	W*	n	p-value	Keputusan
Kemarau	0,85817	242	3,806 x 10 ⁻¹⁴	Tolak H ₀
Hujan	0,98247	122	0,1144	Gagal tolak H ₀

Tabel 4.
Hasil uji dependensi

Musim	χ ²	df	p-value	Keputusan
Kemarau	38,447	3	0,000	Tolak H ₀
Hujan	26,597	3	0,000	Tolak H ₀

Tabel 5.
Perbandingan diagram kendali MEWMC musim kemarau

λ	h	Jumlah OOC
0,1	0,9304	31
0,2	2,1016	20
0,3	3,3827	11
0,4	4,8401	6
0,5	6,3745	6
0,6	8,1832	5
0,7	10,1488	3
0,8	12,6682	2
0,9	16,0896	2



Gambar 1. Scatterplot antar variable.

Surabaya di IPAM Ngagel I pada 1 April 2019 – 31 Maret 2020. Selama periode tersebut terdapat perbedaan musim yaitu musim kemarau dan musim hujan. Musim kemarau yaitu tanggal 1 April – 30 November 2019 dan musim hujan yaitu tanggal 1 Desember 2019 – 31 Maret 2020. Tabel 2 menunjukkan karakteristik kualitas air produksi IPAM Ngagel I.

Secara keseluruhan variabel, nilai rata-rata kualitas air produksi PDAM Surya Sembada Kota Surabaya di IPAM Ngagel I berada dalam batas spesifikasi yang ditentukan oleh Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 492 Tahun 2010 dan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 736 Tahun 2010. Varians variabel kekeruhan pada musim kemarau dan musim hujan tidak jauh berbeda, sedangkan untuk zat organik pada musim hujan memiliki varians yang lebih besar dibandingkan dengan varians zat organik pada musim kemarau. Selain itu, varians sisa chlor pada musim kemarau lebih tinggi dibandingkan dengan varians sisa chlor pada musim hujan.

Nilai maksimum untuk variabel kekeruhan masih berada dalam batas spesifikasi, namun nilai maksimum variabel zat organik berada di atas batas spesifikasi. Pada musim kemarau, nilai maksimum zat organik tertinggi terjadi pada tanggal 3 November 2019, sedangkan nilai maksimum zat organik tertinggi pada musim hujan terjadi pada tanggal 30 Desember 2019. Tingginya zat organik pada air hasil produksi dipengaruhi oleh adanya pencemar yang ada pada air baku. Pada saat tinggi pencemar, PDAM menambahkan karbon aktif pada unit pengolahan untuk menyerap pencemar dan menambahkan dosis pembubuhan disinfektan pada air produksi.

Gambar 1 menunjukkan bahwa terdapat hubungan positif antara variabel kekeruhan dan zat organik. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi zat organik yang ada

dalam air maka semakin tinggi pula tingkat kekeruhannya, begitu pula sebaliknya. Hal ini sesuai dengan teori yang ada di lapangan. Nilai korelasi antara variabel kekeruhan dan zat organik pada musim kemarau yaitu 0,343 sedangkan nilai korelasi antara variabel kekeruhan dan zat organik pada musim hujan sebesar 0,298.

Variabel kekeruhan dan sisa chlor memiliki hubungan yang negatif dengan nilai korelasi pada data musim kemarau sebesar -0,177 dan nilai korelasi pada data musim hujan sebesar -0,219. Ketika tingkat kekeruhan pada air tinggi, maka kebutuhan chlor sebagai disinfektan juga semakin tinggi, hal ini menyebabkan sisa chlor dalam air produksi semakin rendah. Hubungan antara variabel zat organik dan sisa chlor juga negatif dengan nilai korelasi untuk data musim kemarau sebesar -0,117 dan nilai korelasi pada data musim hujan sebesar -0,325. Berdasarkan teori di lapangan, semakin tinggi zat organik maka sisa chlor dalam air produksi juga semakin rendah.

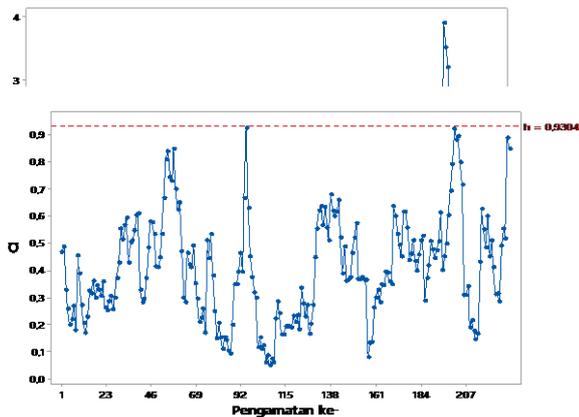
Selain itu, dari Gambar 1 juga didapatkan informasi bahwa masih terdapat beberapa pengamatan yang berada di luar batas spesifikasi untuk variabel zat organik dan variabel sisa chlor. Pada musim kemarau untuk variabel sisa chlor cukup banyak yang berada di bawah batas spesifikasi, sedangkan pada musim hujan untuk variabel sisa chlor hanya terdapat 1 pengamatan yang berada di bawah batas spesifikasi. Pada variabel kekeruhan seluruh pengamatan telah berada dalam batas spesifikasi, baik untuk data kualitas air pada musim kemarau maupun musim hujan.

B. Uji Asumsi

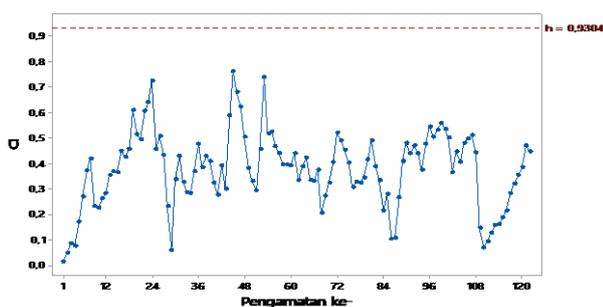
Uji distribusi normal multivariat digunakan untuk mengetahui apakah data kualitas air yang terdiri dari kekeruhan, zat organik, dan sisa chlor merupakan data yang berdistribusi normal multivariat atau tidak. Uji distribusi normal multivariat yang digunakan yaitu uji Shapiro-Wilk sesuai pada Persamaan (1). Tabel 3 menunjukkan hasil uji Shapiro-Wilk untuk data kualitas air.

Tabel 6.
Perbandingan diagram kendali MEWMC musim hujan

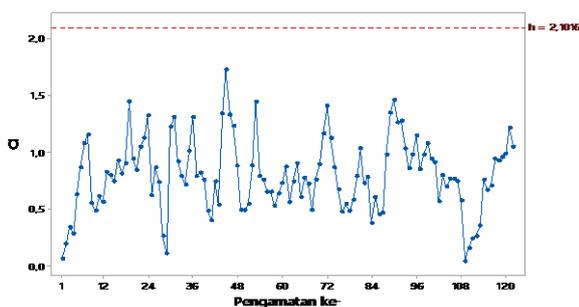
λ	h	$\text{Max}(c_i)$	$ \text{Max}(c_i)-h $	Jumlah OOC
0,1	0,9304	0,7608	0,1696	0
0,2	2,1016	1,7279	0,3737	0
0,3	3,3827	2,7821	0,6006	0
0,4	4,8401	3,8913	0,9488	0
0,5	6,3745	5,1183	1,2562	0
0,6	8,1832	6,7970	1,3862	0
0,7	10,1488	8,7950	1,3538	0
0,8	12,6682	11,3150	1,3532	0
0,9	16,0896	14,9785	1,1111	0



Gambar 5. Diagram kendali MEWMC musim kemarau.



Gambar 6. Diagram kendali MEWMC musim hujan dengan $\lambda = 0,1$.



Gambar 7. Diagram kendali MEWMC musim hujan dengan $\lambda = 0,2$.

Tabel 3 menunjukkan hasil uji *Shapiro-Wilk* dengan taraf signifikansi (α) sebesar 0,05, sehingga dapat diambil keputusan tolak H_0 yaitu data tidak berdistribusi normal multivariat jika $p\text{-value} < \alpha$. Data kualitas air selama musim kemarau tidak berdistribusi normal multivariat karena $p\text{-value} < \alpha$, sedangkan data kualitas air selama musim hujan berdistribusi normal karena $p\text{-value} > \alpha$. Meskipun data kualitas air pada musim kemarau tidak berdistribusi normal multivariat, analisis tetap bisa dilanjutkan karena metode yang digunakan merupakan metode yang *robust* terhadap data yang tidak berdistribusi normal multivariat [1].

Terdapat 3 karakteristik kualitas air yang menurut teori di lapangan saling berhubungan satu sama lain. Untuk mengetahui dependensi antara ketiga karakteristik kualitas air tersebut, perlu dilakukan uji *Bartlett*. Tabel 4 menunjukkan hasil uji *Bartlett* terhadap data kualitas air.

Tabel 4 menunjukkan hasil uji *Bartlett* dengan taraf signifikansi (α) sebesar 0,05, sehingga dapat diambil keputusan tolak H_0 yaitu terdapat korelasi antar variabel jika $p\text{-value} < \alpha$. Uji *Bartlett* untuk data kualitas air pada musim kemarau maupun musim hujan menunjukkan bahwa ketiga karakteristik kualitas air yaitu kekeruhan, zat organik, dan sisa *chlor* saling berkorelasi.

C. Pengendalian Kualitas Proses Produksi Air dengan Diagram Kendali MEWMC

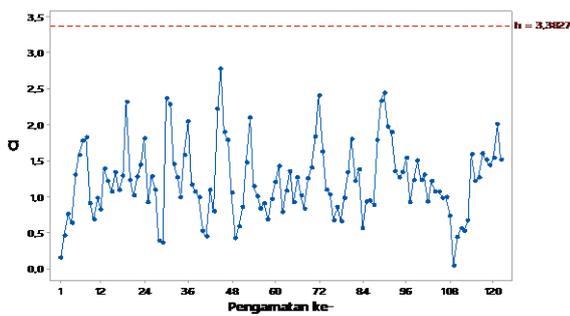
Diagram kendali MEWMC digunakan untuk pengendalian kualitas pada variabilitas proses. Pengendalian kualitas air untuk musim kemarau dan musim hujan dibedakan karena terdapat perlakuan yang berbeda dalam produksi air selama musim kemarau dan musim hujan. Dalam penelitian ini, data kualitas air pada bulan April – November 2019 termasuk ke dalam musim kemarau, sedangkan data kualitas air pada bulan Desember 2019 – Maret 2020 termasuk ke dalam musim hujan. Dalam penelitian ini, digunakan nilai pembobot λ antara 0,1 – 0,9 dengan kenaikan sebesar 0,1.

1) Diagram Kendali MEWMC Musim Kemarau

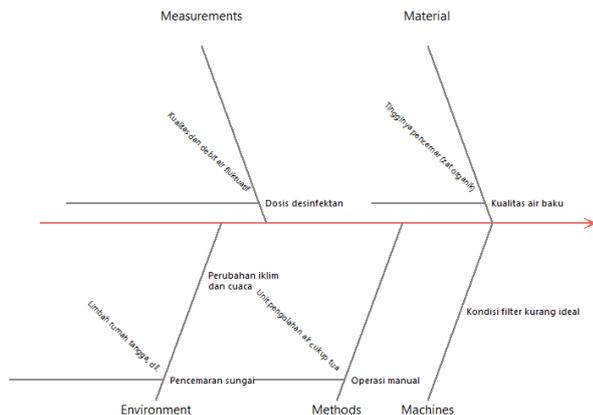
Diagram kendali MEWMC untuk memonitor variabilitas proses produksi air pada musim kemarau dengan pembobot $\lambda = 0,1$ (Gambar 2), $\lambda = 0,2$ (Gambar 3), dan $\lambda = 0,3$ (Gambar 4) menunjukkan bahwa variabilitas proses produksi air di IPAM Ngagel I selama musim kemarau tidak terkendali secara statistik, karena terdapat beberapa pengamatan yang berada di luar batas kendali. Setelah membentuk diagram kendali MEWMC, ditentukan pembobot λ yang optimal. Nilai λ yang kecil digunakan untuk melihat pergeseran proses yang kecil, sedangkan nilai λ yang besar digunakan untuk melihat pergeseran proses yang besar [6]. Menentukan λ optimal dapat dilakukan dengan melihat jumlah pengamatan yang OOC. Diagram kendali MEWMC dengan jumlah pengamatan OOC terbanyak menunjukkan bahwa diagram kendali tersebut lebih sensitif dalam mendeteksi pergeseran variabilitas proses jika dibandingkan dengan diagram kendali MEWMC dengan jumlah pengamatan OOC yang lebih sedikit. Tabel 5 menunjukkan perbandingan masing-masing diagram kendali MEWMC dengan pembobot λ yang berbeda untuk menentukan pembobot yang optimal.

Tabel 5 menunjukkan bahwa diagram kendali MEWMC dengan $\lambda = 0,1$ memiliki jumlah pengamatan OOC terbanyak, sehingga $\lambda = 0,1$ dipilih sebagai pembobot yang optimal karena lebih sensitif dalam mendeteksi pergeseran variabilitas proses yang kecil. Berdasarkan hasil diskusi dengan pihak perusahaan, diketahui bahwa adanya pengamatan yang berada di luar batas kendali disebabkan oleh kondisi filter yang kurang ideal, adanya pencemar dan dosis pembubuhan disinfektan yang kurang pas.

Setelah diketahui penyebab pengamatan yang OOC, maka diagram kendali MEWMC untuk musim kemarau diperbaiki dengan melakukan penghapusan pengamatan yang OOC. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan variabilitas proses produksi yang *in control*. Diagram kendali MEWMC untuk proses produksi air selama musim kemarau yang sudah *in control*



Gambar 8. Diagram kendali MEWMC musim hujan dengan $\lambda = 0,3$.



Gambar 9. Diagram Sebab-Akibat.

dapat dilihat pada Gambar 5. Setelah dilakukan perbaikan diagram kendali MEWMC dengan menghapus 13 pengamatan yang berada di luar batas kendali, didapatkan diagram kendali MEWMC untuk musim kemarau yang sudah *in control*.

2) *Diagram Kendali MEWMC Musim Hujan*

Diagram kendali MEWMC untuk proses produksi air selama musim hujan dengan menggunakan pembobot $\lambda = 0,1$ (Gambar 6), $\lambda = 0,2$ (Gambar 7), dan $\lambda = 0,3$ (Gambar 8) menunjukkan bahwa tidak ada pengamatan yang berada di luar batas kendali. Hal ini menunjukkan bahwa variabilitas proses produksi air di IPAM Ngagel I selama musim hujan telah terkendali secara statistik. Penentuan pembobot optimal untuk diagram kendali MEWMC selama musim hujan dapat menggunakan kriteria selisih terkecil antara nilai maksimum c_i dan batas kendali yang dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 menunjukkan bahwa pembobot λ yang optimal untuk pengendalian variabilitas proses produksi air di IPAM Ngagel I yaitu $\lambda = 0,1$ karena selisih nilai maksimal c_i dan batas kendali yang paling kecil. Selain itu, pembobot λ yang kecil lebih baik digunakan jika ingin mendeteksi pergeseran variabilitas proses yang kecil [6]. Karena tidak terdapat titik pengamatan yang berada di luar batas kendali, maka variabilitas proses produksi air di IPAM Ngagel I selama musim hujan telah terkendali secara statistik.

D. Identifikasi Out of Control

Setelah dilakukan pengendalian variabilitas proses dengan diagram kendali MEWMC, dapat diketahui bahwa variabilitas proses produksi air di IPAM Ngagel I pada musim kemarau tidak terkendali secara statistik. Oleh karena itu, diidentifikasi faktor penyebab permasalahan ini menggunakan diagram sebab-akibat pada Gambar 9.

Faktor yang pertama adalah faktor *material* (bahan baku). Kualitas air produksi dipengaruhi juga oleh kualitas air baku.

Air baku dalam proses produksi air di IPAM Ngagel I berasal dari air sungai. Kondisi sungai yang tercemar dapat menyebabkan tingginya pencemar pada air baku. Hal ini mengakibatkan tingginya kandungan zat organik pada air.

Faktor yang kedua adalah faktor *measurement* (pengukuran). Dosis pembubuhan disinfektan yang kurang tepat, karena proses pengolahan air merupakan proses yang kontinu, dimana kualitas air dan debit air sangat fluktuatif. Faktor yang ketiga adalah faktor *method* (metode). Unit pengolahan air di IPAM Ngagel I ada yang masih menggunakan metode manual, yaitu pada pencucian filter yang harus dilakukan setiap hari.

Faktor selanjutnya adalah faktor *machine* (mesin). Mesin filter yang digunakan di IPAM Ngagel I kurang ideal dan mengalami kendala yang menyebabkan hasil filtrasi air tidak maksimal. Faktor yang terakhir adalah faktor *environment* (lingkungan). Faktor lingkungan ini berhubungan dengan faktor bahan baku. Adanya perubahan iklim dan cuaca, juga pencemaran sungai yang terjadi di Kali Surabaya menyebabkan perubahan kualitas air baku yang digunakan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, didapatkan kesimpulan bahwa variabilitas proses produksi air pada musim kemarau telah terkendali secara statistik setelah dilakukan pengendalian ke-13 menggunakan diagram kendali MEWMC dengan pembobot optimum $\lambda = 0,1$. Sedangkan variabilitas proses produksi air pada musim hujan telah terkendali secara statistik pada pengendalian pertama dengan pembobot optimum $\lambda = 0,1$.

Saran yang dapat diberikan kepada PDAM Surya Sembada Kota Surabaya terutama untuk IPAM Ngagel I yaitu agar dapat mengatasi permasalahan yang menjadi penyebab proses produksi yang tidak terkendali secara statistik, diantaranya kondisi filter yang kurang ideal dan dosis pembubuhan disinfektan yang kurang pas. Diagram kendali MEWMC yang digunakan dalam penelitian ini diharapkan dapat diterapkan sebagai alternatif dalam mengontrol proses produksi oleh perusahaan. Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu cukup menggunakan nilai λ yang kecil dalam pembentukan diagram kendali MEWMC jika tujuan penelitian untuk melihat pergeseran proses yang kecil. Selain itu, dapat menggunakan metode lain yang belum pernah digunakan sehingga dapat menjadi pertimbangan bagi perusahaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, 6th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [2] R. A. I., "Pengendalian Kualitas Air Produksi PDAM Surya Sembada Surabaya Menggunakan Grafik Kendali Multivariate Maximum Cumulative Sum," Laporan Tugas Akhir Departemen Statistika Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2019.
- [3] Q. M., "Pengendalian Kualitas Semen dengan Diagram Kendali Multivariate Exponentially Weighted Moving Covariance Matrix (MEWMC) Based on Regression Adjusted Variables (Studi Kasus PT Semen 'X')," Laporan Tugas Akhir Departemen Statistika Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2020.
- [4] A. V. A. J. and G. E. E., "A generalization of shapiro-wilk's test for multivariate normality," *Commun. Stat. - Theory Methods*, vol. 38, no. 11, pp. 1870-1883, 2009.
- [5] F. M. D., *Multivariate Statistical Methods*, 3rd ed. United States of America: McGraw-Hill, Inc, 1990.

- [6] M. H. D. and M. M.-T. E., "Multivariate exponentially weighted moving covariance matrix," *Technometrics*, vol. 50, no. 2, pp. 155–166, 2008.