

Pengendalian Kualitas Pengolahan Limbah Air PT. Japfa Comfeed Indonesia Tbk Menggunakan Grafik Kendali Multivariat Berbasis *Time Series*

Ilma Tamarina Arba, Wibawati, Ni Luh Putu Satyaning P. P.
Departemen Statistika, Fakultas Matematika, Komputasi, dan Sains Data,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: wibawati.its@gmail.com

Abstrak—PT Japfa Comfeed Indonesia Tbk merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang agrofood. PT JCI Tbk mengolah limbah air hasil produksinya berdasarkan Peraturan Gubernur Jawa Timur No. 72 Tahun 2013 tentang baku mutu air limbah bagi industri dan/atau kegiatan usaha lainnya. Meskipun telah dilakukan pengolahan limbah yang sesuai namun masih ditemukan pengamatan pengolahan limbah yang melebihi dari baku mutu yang telah ditetapkan. Selama ini PT JCI Tbk hanya melakukan pencacatan dalam memonitor proses pengolahan limbah, sehingga perlu dilakukan pengendalian kualitas pengolahan limbah secara statistik. Penelitian ini menggunakan dua variabel yaitu Total Dissolved Solid (TDS) dan pH. Adanya autokorelasi menyebabkan false alarm pada grafik kendali sehingga pada penelitian ini digunakan grafik kendali multivariat berbasis *time series*. Metode yang digunakan adalah grafik kendali kombinasi MEWMA dimana grafik kendali M_2Z^2 digunakan untuk memonitor variabilitas proses dan peta kendali MZ digunakan untuk memonitor mean proses. Pada analisis *time series* diperoleh model terbaik yang terpilih adalah VAR(1,5,8) sehingga residual dari model tersebut digunakan untuk mengendalikan proses pengolahan limbah air. Pada fase I variabilitas proses dan mean proses telah stabil, dan pada fase II variabilitas proses telah stabil namun mean proses belum stabil. Kapabilitas proses diperoleh nilai MPp 1,405 dan MPpk 0,875 sehingga dapat dikatakan bahwa proses pengolahan limbah memiliki presisi yang baik namun akurasi rendah.

Kata Kunci—Autokorelasi, Grafik Kendali Kombinasi MEWMA, Limbah Air, pH, TDS

I. PENDAHULUAN

PT. Japfa Comfeed Indonesia (JCI) Tbk merupakan salah satu perusahaan besar yang bergerak dibidang *agro-food* dengan hasil produksi berupa pakan ternak untuk ayam ras pedaging. Ayam ras pedaging merupakan salah satu komoditas unggas yang peminatnya tinggi, dengan tingginya permintaan akan ayam menyebabkan meningkatnya permintaan pakan ternak. Tingginya permintaan pakan ternak membuat PT JCI Tbk berusaha agar dapat memenuhi permintaan dengan meningkatkan aktivitas produksi. Semakin tinggi produksi yang dihasilkan juga berdampak pada banyaknya limbah yang dihasilkan. PT JCI Tbk mengolah limbah air hasil produksinya berdasarkan Peraturan Gubernur Jawa Timur No. 72 Tahun 2013 tentang baku mutu air limbah bagi industri dan/atau kegiatan usaha lainnya. Limbah hasil dari proses produksi sebelum dibuang ke saluran harus diolah hingga limbah aman dan tidak merusak lingkungan. Selama ini PT JCI Tbk melakukan pengontrolan terhadap limbah air secara deskriptif untuk

menentukan apakah limbah layak untuk dibuang ke saluran atau diperlukan proses kembali pengolahan limbah ketika nilai pH dan *Total Dissolved Solid* (TDS) melebihi dari baku mutu yang ditentukan. Sehingga pada penelitian ini saya akan menggunakan metode statistika yaitu grafik kendali multivariat untuk pengendalian kualitas limbah air.

Penelitian ini akan menggunakan grafik kendali kombinasi MEWMA dengan pendekatan *time series* karena pemberian larutan kimiawi yang dilakukan memiliki pengaruh antara pengamatan saat ini dengan pengamatan sebelumnya sehingga adanya indikasi autokorelasi pada data kualitas pengolahan limbah yang akan diteliti. Reynolds & Cho [1] dalam penelitiannya yang berjudul “*Multivariate Control Chart for Monitoring The Mean Vector and Covariance Matrix*” menyebutkan bahwa grafik kendali kombinasi MEWMA memiliki hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan grafik kendali MEWMA standart dan grafik kendali T^2 Hotteling berdasarkan *Average Time to Signal* (ATS). Grafik kendali kombinasi MEWMA menggunakan grafik kendali M_2Z^2 untuk memonitor variabilitas proses dan grafik kendali MZ untuk memonitor *mean* proses. Data yang digunakan merupakan data pengolahan limbah air mulai Januari 2017 – Februari 2019. Karakteristik kualitas yang digunakan adalah TDS dan pH.

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana karakteristik data dari karakteristik kualitas limbah air PT JCI, bagaimana model terbaik yang terbentuk dari analisis *time series* dan bagaimana kapabilitas proses pengolahan limbah air PT JCI. Tujuan penelitian ini menjawab dari rumusan masalah. Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahas evaluasi PT Japfa Comfeed Indonesia Tbk Margomulyo dalam peningkatan pengolahan limbah industri.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Model Vector Autoregressive (VAR)

Model *Vector Autoregressive* (VAR) merupakan model hasil pengembangan dari *Autoregressive* (AR) yang dapat diidentifikasi menggunakan plot *Partial Cross-Correlation Matrix Function*. Model VAR digunakan untuk memodelkan dua variabel atau lebih yang memiliki hubungan satu sama lain.

$$\mathbf{Z}_t = \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\Phi}_1 \mathbf{Z}_{t-1} + \dots + \boldsymbol{\Phi}_p \mathbf{Z}_{t-p} + \mathbf{a}_t \quad (1)$$

B. Stasioneritas Data

Stasioneritas dalam data *time series* ditunjukkan apabila rata-rata dan varians berfluktuasi konstan setiap waktu. Jika plot *time series* berfluktuasi di sekitar garis yang sejajar

dengan sumbu waktu (t) maka dikatakan deret stasioner dalam *mean*. Pengujian stasioner terhadap *mean* dapat menggunakan *Augmented Dickey-Fuller (ADF) Test*.

$$\Delta Z_t = \delta Z_{t-1} + \varepsilon \tag{2}$$

Hipotesis :

H₀ : δ = 0 (terdapat akar unit, variabel Z tidak stasioner)

H₁ : δ ≠ 0 (tidak terdapat akar unit, variabel Z stasioner)

Statistik uji :

$$t_{hitung} = \frac{\hat{\delta}}{SE(\hat{\delta})} \tag{3}$$

dengan SE(δ̂) merupakan *standart error* dari nilai taksiran δ daerah penolakan : tolak H₀ jika |t_{hitung}| > t_{tabel}.

Apabila suatu data tidak stasioner terhadap varian maka untuk mengatasi ketidakstasioneran dalam varians dapat dilakukan dengan transformasi data. Secara umum transformasi *Box-Cox* untuk beberapa nilai λ disajikan dalam Tabel 1 [2]

Tabel 1.
Tabel Transformasi *Box-Cox*

Nilai Estimasi	Transformasi
-1,0	1/ Z _t
-0,5	1/√Z _t
0,0	Ln Z _t
0,5	√Z _t
1	Z _t

C. Identifikasi Model VAR

Menentukan model VAR yang terbentuk dari data atau identifikasi model *multivariate time series* salah satunya dapat dilakukan dengan melihat pola dari fungsi *Cross-Correlation Matrix Function* dan *Partial Cross-Correlation Matrix Function*.

1. Cross-Correlation Matrix Function

Pada penerapannya, bentuk matriks dan grafik akan semakin kompleks karena meningkatnya dimensi vektor, sehingga untuk mengatasi hal tersebut dapat digunakan metode koefisien dengan menggunakan tanda (+),(-), dan (.). Tanda (+) mengartikan bahwa nilai $\hat{\rho}_{ij}(k)$ yang lebih besar dari 2 kali estimasi *standard error* yang menunjukkan hubungan korelasi positif, tanda (-) menotasikan nilai $\hat{\rho}_{ij}(k)$ yang lebih kecil -2 kali estimasi *standard error* dan menunjukkan korelasi negatif. Dan tanda (.) menunjukkan $\hat{\rho}_{ij}(k)$ yang terletak diantara ±2 kali estimasi *standard error* sehingga tidak adanya hubungan [3].

2. Partial Cross-Correlation Matrix Function

Partial Autocorrelation Matrix Function dapat digunakan untuk menentukan orde model AR. Menurut Tiao & Box, *partial autocorrelation matrix function* pada lag k yang dapat dinotasikan sebagai $\hat{\rho}(k)$ [3]. Penentuan orde AR pada serangkaian observasi akan disimbolkan dengan tanda (+),(-), dan (.) dengan intepretasi tanda yang sama seperti yang dijelaskan pada *cross correlation matrix function*

D. Estimasi Parameter Model

Estimasi parameter pada model VAR (p) dapat menggunakan metode *Least Square* [4]. Pengujian pada metode ini menggunakan hipotesis sebagai beriku

H₀ : Φ_i = 0 (parameter tidak signifikan)

H₁ : Φ_i ≠ 0 (parameter signifikan), di mana i = 1, 2, ..., p

Statistik uji :

$$t_{hitung} = \frac{\hat{\Phi}_i}{SE(\hat{\Phi}_i)} \tag{4}$$

SE(Φ̂_i) merupakan *standart error* dari taksiran Φ̂_i.

Tolak H₀ apabila |t_{hitung}| > t_{α/2,(n-p)} sehingga diperoleh keputusan parameter signifikan.

E. Pemeriksaan Model

Apabila telah mendapatkan model yang signifikan maka selanjutnya dilakukan pemeriksaan diagnostik untuk mendapatkan model terbaik dan beberapa model yang parameternya signifikan [4].

hipotesis pengujian:

H₀ : R_k = 0 (R₁, R₂, ..., R_p) (residual model VAR (p) *white noise*)

H₁ : R_k ≠ 0 (residual model VAR (p) tidak *white noise*)

Statistik uji :

$$Q_k = n \sum_{i=1}^k tr(\hat{C}'_k \hat{C}_0^{-1} \hat{C}_k \hat{C}_0^{-1}) \tag{5}$$

Residual dikatakan *white noise* apabila nilai Q_k > χ²_{(k²(k-p))}

Pemeriksaan diagnostik selanjutnya adalah pemeriksaan apakah residual data mengikuti distribusi normal multivariat. Metode ini digunakan untuk mengetahui beberapa variabel yang memiliki hubungan apakah mengikuti distribusi normal multivariat atau tidak [5].

H₀ : residual karakteristik kualitas berdistribusi normal multivariat

H₁: residual karakteristik kualitas tidak berdistribusi normal multivariat

Statistik uji :

$$W^* = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_0 \tag{6}$$

tolak H₀ jika W* < c_{α;n,m} sehingga dapat dikatakan bahwa residual karakteristik kualitas tidak berdistribusi normal multivariat.

F. Pemilihan Model Terbaik

Menentukan model terbaik dapat menggunakan nilai minimum dari *Akaike Informarion Criterion (AIC)* [2].

$$AIC(p) = \ln(|\Sigma_p|) + \frac{2pm^2}{n} \tag{7}$$

di mana |Σ_p| merupakan determinan dari matriks varian kovarian residual, m adalah jumlah karakteristik kualitas, dan n merupakan banyaknya observasi.

G. Dependensi Variabel

Uji dependensi untuk data multivariat dapat menggunakan uji *Bartlett Sphericity*, metode ini digunakan untuk mengetahui apakah terdapat korelasi antara tiap variabel dengan variabel yang lain. Untuk menguji dependensi antar residual variabel dapat menggunakan hipotesis dan pengujian sebagai berikut [6].

Hipotesis :

H₀ : R = I (Karakteristik kualitas saling independen)

$H_1 : \mathbf{R} \neq \mathbf{I}$ (Karakteristik kualitas saling dependen)

Daerah kritis: H_0 ditolak jika $u' > \chi^2_{(\alpha; \frac{1}{2}p(p-1))}$

Statistik Uji :

$$u' = - \left\{ n - 1 - \frac{2p + 5}{6} \right\} \ln |\mathbf{R}| \quad (8)$$

Jika gagal tolak H_0 maka karakteristik kualitas saling independen sehingga asumsi dependensi antar variabel tidak terpenuhi.

H. Grafik Kendali M

Grafik kendali M digunakan untuk memonitor variabilitas secara multivariat dengan pengamatan individu yang didasarkan pada *successive difference*. Setelah diperiksa varians dianalisis menggunakan T^2 *Hotteling*.

I. Grafik Kendali T^2 *Hotteling*

Grafik kendali T^2 *Hotteling* adalah Grafik kendali yang digunakan untuk memonitor *mean* proses pada kasus multivariat. Grafik kendali ini mendeteksi pergeseran *mean* proses dengan menggunakan vektor *mean* sampel dan matriks kovarians.

J. Grafik Kendali Multivariate Exponentially Weighthed Moving Average (MEWMA)

Grafik kendali *multivariate exponentially weighted moving average* (MEWMA) digunakan untuk mendeteksi apakah ada perubahan pada nilai *mean* proses. Salah satu keunggulan dari grafik kendali MEWMA adalah grafik kendali ini *robust* terhadap asumsi distribusi normal [7].

$$\mathbf{M}_t = \lambda \mathbf{z}_t + (1 - \lambda) \mathbf{M}_{t-1}$$

\mathbf{z}_t merupakan vektor *mean* sampel dan λ adalah pembobot dengan rentang nilai antara $0 \leq \lambda \leq 1$ dan $\mathbf{M}_0 = \mathbf{0}$. Pengamatan dikatakan keluar dari batas kendali atau *out of control* ketika nilai T_t^2 lebih besar dari batas kendali atas. Didapatkan dari hasil simulasi yang disesuaikan dengan besarnya ARL hingga nilainya konvergen [7].

K. Grafik Kendali Kombinasi MEWMA

Grafik kendali kombinasi MEWMA merupakan pengembangan dari grafik kendali MEWMA. Grafik kendali ini mengendalikan variabilitas proses dan *mean* proses dalam satu grafik kendali. Perbedaan antara grafik kendali MEWMA standart dan grafik kendali MEWMV dengan grafik kendali kombinasi MEWMA dalam memonitor variabilitas proses dan *mean* proses adalah dari titik pengamatannya. Titik mengamatan pada grafik kendali kombinasi MEWMA menggunakan data *standardized*.

Untuk titik pengamatan pada *mean* proses fase I adalah sebagai berikut:

$$M_k^z = c_\infty^{-1} \left(E_{k1}^z, E_{k2}^z, \dots, E_{kp}^z \right) \Sigma_z^{-1} \left(E_{k1}^z, E_{k2}^z, \dots, E_{kp}^z \right)^T \quad (9)$$

sedangkan untuk memonitor *mean* proses pada fase II :

$$M_k^z = c_\infty^{-1} \left(E_{k1}^z, E_{k2}^z, \dots, E_{kp}^z \right) \Sigma_{z0}^{-1} \left(E_{k1}^z, E_{k2}^z, \dots, E_{kp}^z \right)^T \quad (10)$$

Untuk meningkatkan kemampuan memonitor variabilitas proses, bentuk kedua dari statistika MEWMA berdasarkan pada E_{ki}^z disebut grafik kendali M_{2Z}^z untuk memonitor variabilitas proses pada fase I

$$M_{2k}^z = n(2c_\infty)^{-1} \left(E_{k1}^{z^2}, E_{k2}^{z^2}, \dots, E_{kp}^{z^2} \right) \left(\Sigma_z^{(2)} \right)^{-1} \left(E_{k1}^{z^2}, E_{k2}^{z^2}, \dots, E_{kp}^{z^2} \right)^T \quad (11)$$

untuk memonitor variabilitas pada fase II

$$M_{2k}^z = n(2c_\infty)^{-1} \left(E_{k1}^{z^2}, E_{k2}^{z^2}, \dots, E_{kp}^{z^2} \right) \left(\Sigma_{z0}^{(2)} \right)^{-1} \left(E_{k1}^{z^2}, E_{k2}^{z^2}, \dots, E_{kp}^{z^2} \right)^T \quad (12)$$

Matriks varian kovarian yang digunakan dalam fase II merupakan matriks varian kovarian pada fase I yang telah *in control* [8].

L. Menentukan Batas Kendali Kombinasi MEWMA

Penentuan grafik kendali kombinasi MEWMA dilakukan menggunakan pendekatan kriteria *Average Run Length* (ARL). Pendekatan ini melakukan simulasi ARL, dimana ARL merupakan rata-rata jumlah titik yang harus diplotkan hingga mendapatkan titik *out of control* pertama [7]. Untuk mendapatkan nilai ARL_0 dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Membangkitkan data sebanyak 10.000 data dimana parameter yang digunakan menyesuaikan dengan data asli.
2. Mengambil sampel random sebanyak 1000 data dari 10.000 data bangkitan.
3. Menghitung nilai statistik M_k^z dan statistik $M_{2k}^{z^2}$ yang dibandingkan dengan batas kendali atas.
4. Menetapkan batas kendali atas untuk masing-masing grafik kendali M_k^z dan $M_{2k}^{z^2}$
5. Menentukan *Run Length* (RL), jumlah titik pengamatan yang harus diplotkan sampai titik pertama melewati batas kendali atas.
6. Menghitung ARL_0 yaitu rata-rata RL untuk N iterasi.
7. Simulasi berhenti jika diperoleh nilai $ARL_0 = 370$

M. Analisis Kapabilitas Proses

Analisis kapabilitas proses digunakan untuk menaksir kemampuan proses dalam memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan. Suatu proses dikatakan kapabel apabila proses (24) dalam keadaan terkendali, berada dalam batas spesifikasi, dan memiliki nilai akurasi dan presisi yang tinggi. Pada data multivariat untuk memperoleh nilai kapabilitas proses menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} MC_p &= \sum_{i=1}^m W_i C_{pi} \\ MC_{pk} &= \sum_{i=1}^m W_i C_{pki} \end{aligned} \quad (25)$$

di mana W_i merupakan pembobot dengan $\sum_{i=1}^p W_i = 1$ [9].

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari hasil uji pengolahan limbah air PT Japfa Comfeed Indonesia Tbk Unit Margomulyo bagian Health, Safety, and Enviromen (HSE) Departmen HRD Jl. Margomulyo No. 36-38 Surabaya. Data merupakan sampel yang diukur setiap hari Senin hingga Sabtu dengan pengambilan sampel yang dilakukan setiap pagi, data yang digunakan mulai Januari 2018 – Februari 2019. Sampel yang diukur adalah limbah air yang diambil dari tank *clarifier* tahap setelah pemberian larutan HCl dan PAC. Data pada penelitian ini dibagi menjadi dua fase, dimana pada fase I merupakan pengamatan proses pengolahan limbah pada

bulan Januari 2018 – 6 Agustus 2018 dengan total 180 pengamatan dan fase II merupakan pengamatan proses pengolahan limbah mulai 7 Agustus 2018 – 28 Februari 2019.

B. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3, dimana variabel-variabel tersebut merupakan karakteristik kualitas yang digunakan PT JCI untuk mengukur limbah air.

Tabel 2. Variabel Penelitian

Variabel	Keterangan	Satuan	Spesifikasi
Z ₁	Total Dissolved Solid (TDS)	mg/l	Maks 2000 mg/l
Z ₂	pH	-	6-9

C. Langkah Analisis

Langkah analisis data yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Cek autokorelasi menggunakan plot ACF untuk mengetahui apakah terdapat hubungan antar observasi karakteristik kualitas limbah air.
2. Melakukan pemeriksaan stasioneritas dalam *mean* dengan menggunakan ACF dan Augmented *Dickey – Fuller* Tes, pemeriksaan stasioner dalam varian menggunakan jika tidak stasioner dalam varian akan digunakan transformasi *Box-Cox* pada Tabel 2.1
3. Mengidentifikasi model VAR menggunakan *partial autoregression matrices*.
4. Estimasi parameter dari model VAR.
5. Pemeriksaan diagnostik residual *white noise* dan distribusi normal multivariat.
6. Pemilihan model terbaik dengan memilih nilai AIC yang minimum.
7. Melakukan pengujian dependensi residual antar karakteristik kualitas limbah air menggunakan uji *Bartlett Sphericity* untuk mengetahui apakah terdapat hubungan antar variabel kualitas limbah.
8. Melakukan pengendalian kualitas menggunakan metode kombinasi MEWMA, memonitor variabilitas proses menggunakan grafik kendali M_2Z^2 dan *mean* proses menggunakan grafik kendali MZ.
 - a. Menentukan batas kontrol atas yang akan digunakan pada grafik kendali fase I pada masing-masing grafik kendali M_2Z^2 dan MZ dengan alogatima sebagai berikut:
 - b. Membangkitkan data sebanyak 10.000 data yang memiliki parameter yang sama dengan data asli.
 - c. Memonitor variabilitas proses pada fase I dengan batas kontrol dari hasil simulasi menggunakan grafik kendali M_2Z^2 dan *mean* proses menggunakan grafik kendali MZ.
 - d. Apabila ditemukan pengamatan yang *out of control* maka dilakukan identifikasi penyebab pegamatan *out of control*. Apabila penyebab *out of control* diketahui maka pengamatan yang *out of control* tidak dimasukkan dalam perhitungan lalu membuat grafik kendali baru tanpa pengamatan yang *out of control*.
 - e. Apabila pada fase I grafik kendali yang memonitor variabilitas proses dan *mean* proses sudah berada dalam batas signifikan atau terkontrol secara statistik maka dapat dilanjutkan pada pengendalian kualitas fase II.

- f. Parameter *in control* pada fase I yaitu Σ_{Z_0} untuk memonitor mean proses dan $\Sigma_{Z_0}^2$ untuk variabilitas proses digunakan pada fase II untuk mengetahui kestabilan proses pada fase II.
9. Melakukan analisis kapabilitas proses untuk mengetahui apakah proses pengolahan limbah air telah sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan.
 10. Menarik kesimpulan dan saran.

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Data

Karakteristik data dari karakteristik kualitas pengolahan limbah air PT JCI adalah sebagai berikut:

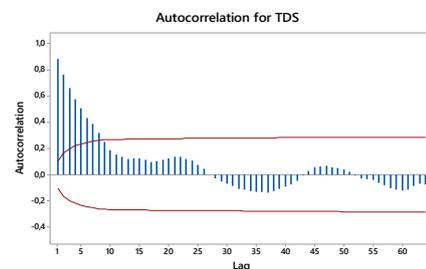
Tabel 3. Karakteristik Kualitas Limbah Air PT JCI

Karakteristik Kualitas	Batas Spesifikasi	Rata-rata	Varian	Min	Max
TDS	Max 2000	1634	73441,6	990	2480
PH	6-9	7,2655	0,1068	6,7	9,2

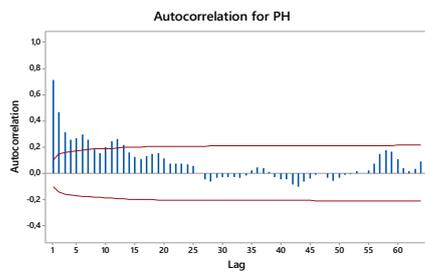
Berdasarkan Tabel 3 menunjukkan bahwa rata-rata zat padat terlarut atau TDS dalam limbah air PT JCI Tbk dengan periode pengolahan limbah Januari 2018 – Februari 2019 berada dalam baku mutu yang ditentukan yaitu dibawah 2000 mg/l. Penyebab kandungan TDS yang tinggi ini adalah adanya endapan yang berlebih pada tangki sedimentasi sehingga menyebabkan zat terlarut pada limbah meningkat. Karakteristik kualitas pH dapat dikatakan bahwa pH dari limbah air yang dihasilkan oleh PT JCI Tbk netral, dengan nilai varian yang kecil yang artinya bahwa data pH pada limbah air bersifat homogen. Penyebab dari pH yang tinggi adalah karena kadar larutan HCl dan PAC dalam tangki lebih sedikit dibandingkan dengan limbah yang masuk sehingga tidak dapat menetralsir limbah yang masuk.

B. Pemeriksaan Autokorelasi

Asumsi pertama dalam pengendalian kualitas menggunakan grafik kendali adalah tidak adanya autokorelasi atau hubungan antar observasi, adanya kasus autokorelasi pada data dapat menyebabkan adanya *false alarm* pada grafik kendali. Pengecekan autokorelasi pada data karakteristik kualitas limbah air dapat dilihat dari plot ACF masing-masing data karakteristik kualitas.



Gambar 1. Plot ACF TDS



Gambar 2. Plot ACF pH

Berdasarkan Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan bahwa beberapa lag ACF TDS dan pH keluar dari batas *confidence interval*, sehingga dapat dikatakan bahwa pada data kedua karakteristik kualitas limbah air terdapat autokorelasi pada data.

C. *Pemodelan Vector Autoregressive*

1. *Stasioneritas Varian*

Asumsi dalam analisis *time series* salah satunya adalah data harus memenuhi stasioner terhadap varian, untuk mengetahui data telah stasioner terhadap varian dapat dilihat dari nilai *rounded value* pada *Box-cox* plot, apabila data belum stasioner terhadap varian maka dilakukan transformasi sesuai dengan Tabel 1.

Tabel 4. Stasioneritas Varian

Karakteristik Kualitas	<i>Rounded Value</i>	Batas Bawah	Batas Atas
TDS	1	0,57	1,69
pH	1	0,46	1,34

Setelah dilakukan transformasi dapat dilihat pada diperoleh hasil bahwa karakteristik kualitas pH telah stasioner dalam varian dengan nilai *rounded value* 1. Sehingga dapat dilakukan analisis lanjutnya yaitu stasioner *mean*.

2. *Stasioneritas Mean*

Stasioner dalam *mean* artinya data bergerak disekitar nilai tengah. Salah satu cara untuk mengetahui data telah stasioner terhadap *mean* atau tidak dapat menggunakan uji ADF, apabila data tidak memenuhi stasioner dalam *mean* maka dilakukan *differencing* pada data. Uji ADF dilakukan setelah data memenuhi asumsi stasioner terhadap varian. Hasil analisis stasioner *mean* adalah sebagai berikut:

Tabel 5. Stasioneritas Mean

Karakteristik Kualitas	<i>p-value</i>
TDS	0,01069
pH	0,01000

Tabel 6. Nilai AIC

Model <i>Time Series</i>	AIC	Model <i>Time Series</i>	AIC
VAR[1]	9,0105	VAR[1,3,5]	8,975
VAR[3]	10,698	VAR[1,3,8]	9,021
VAR[5]	11,106	VAR[1,3,10]	8,991
VAR[8]	11,502	VAR[3,5,8]	10,591
VAR[10]	11,659	VAR[3,5,10]	10,607
VAR[20]	11,728	VAR[5,8,10]	10,994
VAR[1,3]	9,001	VAR[1,5,8]	9,003
VAR[1,5]	8,975	VAR[1,5,10]	8,985
VAR[1,8]	9,031	VAR[1,8,10]	9,016
VAR[1,10]	8,996	VAR[3,8,10]	10,617
VAR[3,5]	10,635	VAR[1,3,5,8]	8,991

VAR[3,8]	10,623	VAR[1,3,5,10]	8,977
VAR[3,10]	10,643	VAR[3,5,8,10]	10,592
VAR[5,8]	11,017	VAR[1,5,8,10]	9,001
VAR[5,10]	11,011	VAR[1,3,8,10]	9,008
VAR[8,10]	11,437	VAR[1,3,5,8,10]	8,995

Pada masing-masing variabel diperoleh nilai *pvalue* lebih kecil dari nilai *alpha*, sehingga diperoleh keputusan tolak H_0 . Kedua variabel telah stasioner terhadap *mean*.

3. *Penentuan Orde VAR*

Menentukan orde VAR dari data *time series* dapat dilihat melalui plot MPACF yang terbentuk. Data yang telah memenuhi asumsi stasioner terhadap varian dan *mean*. Hasil analisis menunjukkan MPACF memiliki beberapa lag terdapat beberapa lag yang signifikan dengan adanya simbol-simbol pada lag ke 1, 3, 5, 8, 10, dan 20.

Penentuan orde VAR dapat dilakukan dengan memilih nilai *Akaike Information Criterion* (AIC) yang minimum pada setiap model yang terbentuk :

Nilai AIC pada masing-masing kombinasi model yang terbentuk dari lag yang signifikan, untuk memperoleh model yang terbaik maka memilih model yang memiliki nilai AIC paling rendah dari semua model yang terbentuk. Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4.4 model yang memiliki nilai AIC paling kecil adalah VAR([1,5])

4. *Estimasi Parameter*

Estimasi parameter dilakukan untuk mengetahui apakah parameter dalam model yang terbentuk adalah signifikan.

Tabel 7. Estimasi Parameter Model VAR([1,5,8])

Karakteristik Kualitas	Parameter	Nilai Estimasi	<i>P-value</i>	Variabel
TDS	AR1_1_1	0,923	0	TDS(t-1)
	AR1_1_2	4,765	0,461	PH(t-1)
	AR5_1_1	0,043	0,264	TDS(t-5)
	AR5_1_2	3,08	0,64	PH(t-5)
	AR8_1_1	-0,015	0,651	TDS(t-8)
	AR8_1_2	7,317	0,263	PH(t-8)
	AR1_2_1	0	0,435	TDS(t-1)
	AR1_2_2	0,717	0	PH(t-1)
pH	AR5_2_1	0	0,16	TDS(t-5)
	AR5_2_2	0,155	0	PH(t-5)
	AR8_2_1	0	0,494	TDS(t-8)
	AR8_2_2	0,019	0,631	PH(t-8)

Tabel 7 menunjukkan bahwa terdapat 3 parameter yang memiliki nilai *p-value* lebih kecil dari *alpha* 0,05 sehingga menghasilkan keputusan tolak H_0 yang artinya terdapat 3 parameter yang signifikan dari 12 parameter yang ada. Menurut Hyndman dan Kostenko pengujian signifikansi dan asumsi dapat diabaikan, sebab yang diutamakan adalah kebaikan model untuk memperoleh ramalan yang tepat [10]. sehingga model yang digunakan adalah VAR([1,5,8]) dan residual dari model akan dikendalikan sebagai gambaran dari proses pengolahan limbah yang sebenarnya.

4. *Pengujian Asumsi Residual*

Pemeriksaan autokorelasi dapat dilakukan dengan pemeriksaan secara visual menggunakan plot ACF. Sehingga plot ACF residual untuk model VAR([1,5,8]) (Gambar 4 dan 5):

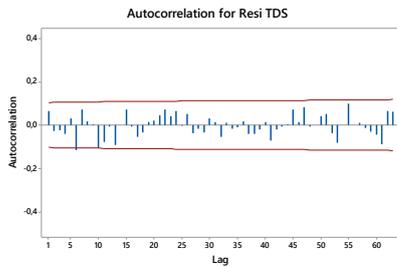
Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan masih terdapat autokorelasi pada beberapa lag, namun residual dari model VAR([1,5,8]) ini merupakan residual yang paling mendekati

dengan asumsi *white noise* sehingga residual dari model ini digunakan untuk pengendalian proses pengolahan limbah air.

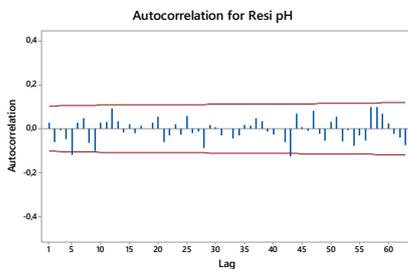
Pada analisis distribusi normal multivariat menunjukkan hasil dari analisis Shapiro-Wilk, setelah dianalisis diperoleh nilai *p-value* sebesar $2,2e-16$ mendekati nilai nol yang lebih kecil dari nilai α 0,05 sehingga residual karakteristik kualitas tidak berdistribusi normal multivariat.

D. Pengendalian Kualitas Limbah Air PT JCI Tbk.

1. Pengendalian Kualitas Limbah Air Menggunakan Grafik Kendali T^2 Hotteling Fase I



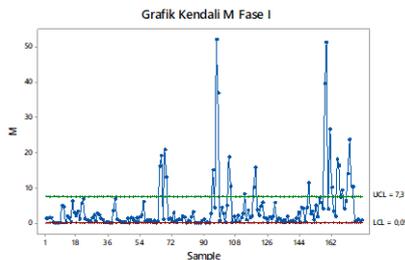
Gambar 3. Plot ACF Residual TDS.



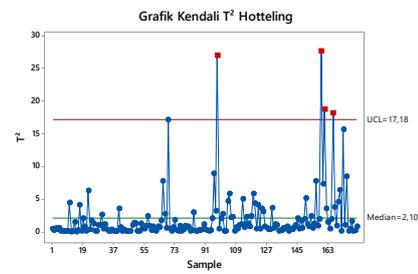
Gambar 4. Plot ACF Residual pH

Analisis ini digunakan untuk memonitor hasil dari proses pengolahan limbah air di PT JCI Tbk secara multivariat. Untuk memonitor variabilitas proses dengan pengamatan individu menggunakan grafik kendali M dan grafik kendali T^2 Hotteling untuk memonitor *mean* proses. Diperoleh grafik kendali M sebagai berikut:

Berdasarkan perhitungan yang dilakukan untuk memperoleh grafik kendali M pada Gambar 5 diperoleh nilai batas kendali atas sebesar 7,37 dan batas kendali bawah 0,05 dapat diketahui bahwa terdapat pengamatan yang keluar dari batas kendali. Sebanyak 24 pengamatan yang keluar dari batas kendali atas dan 15 pengamatan yang keluar dari batas kendali bawah. Sehingga pada fase I variabilitas proses belum stabil.



Gambar 5. Grafik Kendali M Fase I



Gambar 6. Grafik Kendali T^2 Hotteling Fase I.

Grafik kendali T^2 Hotteling yang diperoleh pada Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai median 2,10 dengan batas kendali atas sebesar 17,18 dan batas kendali bawah nol. Pada grafik kendali T^2 Hotteling dapat dilihat bahwa terdapat beberapa pengamatan yang keluar dari batas kendali, sehingga *mean* proses pada proses pengolahan limbah fase I belum stabil. Meskipun grafik kendali ini lebih sensitif dalam menangkap pengamatan yang keluar dari batas kendali namun banyaknya pengamatan yang keluar dari batas kendali pada grafik kendali M maupun T^2 Hotteling dapat disebabkan karena data melanggar dari asumsi grafik kendali tersebut, yaitu data harus berdistribusi normal multivariat.

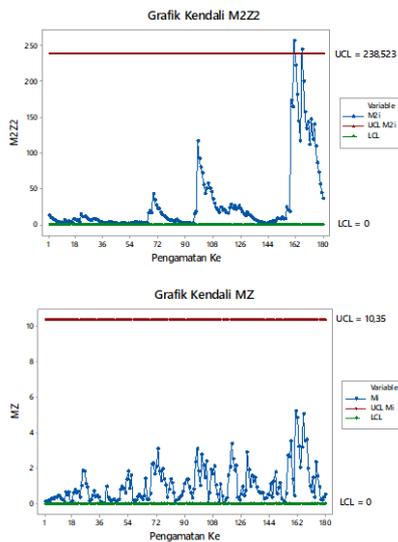
2. Penentuan Batas Kendali Grafik Kendali Kombinasi MEWMA

Penentuan batas kendali kombinasi MEWMA menggunakan pendekatan kriteria *Average Run Length* (ARL). ARL adalah rata-rata jumlah titik yang harus diplotkan hingga didapatkan titik *out of control* pertama. Dimana dilakukan simulasi untuk mendapatkan nilai ARL_0 370. Reynolds and Cho [11] dalam penelitiannya melakukan simulasi *Average Steady State Average Time To Signal* (*Average SSATS*) mengemukakan bahwa bobot optimum yang dapat digunakan adalah 0,11989 dan 0,026. Berdasarkan penelitian Reynolds and Cho (2006) pembobotan 0,11989 memiliki nilai *Average Time To Signal* lebih kecil jika dibandingkan dengan pembobotan 0,026. Sehingga penelitian ini menggunakan bobot optimum 0,11989 untuk memonitor variabilitas proses dan rata-rata proses.

Alogaritma simulasi sesuai dengan Langkah Analisis poin 9c. Setelah melakukan beberapa simulasi dengan bobot 0,11989 simulasi dilakukan hingga masing-masing grafik kendali memperoleh batas kendali dengan ARL_0 370. Nilai batas kendali atas untuk memonitor variabilitas proses atau grafik kendali M_2Z^2 sebesar 238,523 dan batas kendali untuk memonitor *mean* proses atau grafik kendali MZ adalah 10,35.

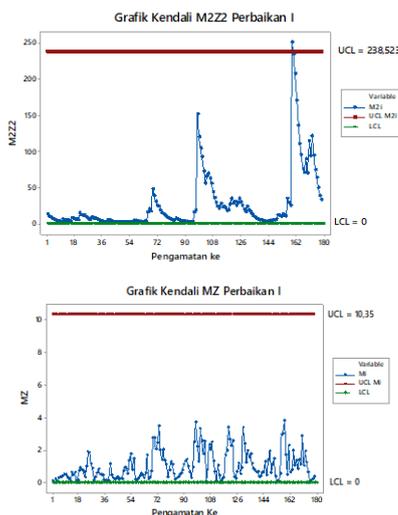
3. Pengendalian Variabilitas Proses dan Mean Proses Pengolahan Limbah Air PT JCI Tbk Fase I

Analisis ini dilakukan untuk memonitor variabilitas proses dan *mean* proses pada pengolahan limbah air di PT JCI Tbk, dimana fase I merupakan data pengolahan limbah air mulai 2 Januari 2018 – 6 Agustus 2018. Hasil analisis monitoring variabilitas dan *mean* proses fase I adalah sebagai berikut:



Gambar 7. Grafik Kendali M_2Z^2 dan MZ Fase I.

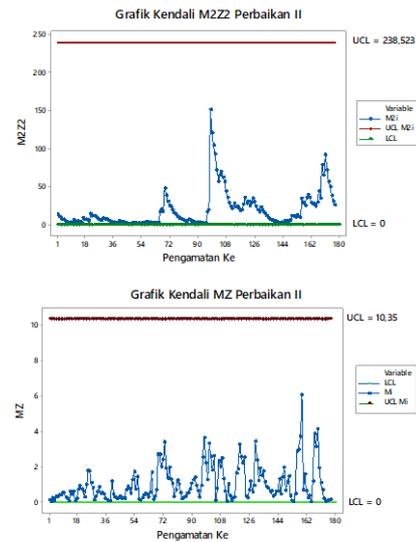
Grafik kendal M_2Z^2 dan MZ pada Gambar 7 dengan batas kendali bawah untuk masing-masing grafik kendali adalah nol dan batas kendali atas untuk masing-masing grafik kendali adalah 238,523 dan 10,35. Pada grafik kendali M_2Z^2 dapat dilihat bahwa terdapat 2 pengamatan yang keluar dari batas kendali, pengamatan yang keluar adalah pengamatan ke-161 dan 166. Sehingga variabilitas proses pengolahan limbah air tanggal 2 Januari – 6 Agustus 2018 belum stabil. Pada grafik kendali MZ dapat dilihat tidak terdapat pengamatan yang keluar dari batas kendali sehingga dapat dikatakan bahwa *mean* proses telah stabil. Penyebab pengamatan keluar dari batas kendali adalah karena adanya tumpukan endapan pada penampungan limbah dari boiler dan kotornya filter karbon aktif, sehingga dilakukan pembersihan pada penampung limbah dan filter karbon. Hasil pengendalian limbah air setelah dilakukan perbaikan sebagai berikut:



Gambar 8. Grafik Kendali M_2Z^2 dan MZ Fase I Perbaikan I.

Setelah dilakukan perbaikan diperoleh grafik kendali yang tertera pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa setelah dilakukan perbaikan masih terdapat pengamatan yang keluar dari batas kendali yaitu pengamatan ke-159 pada grafik kendali M_2Z^2 sehingga variabilitas proses belum stabil. Pada grafik kendali MZ tidak ada pengamatan yang keluar dari batas kendali. Berdasarkan pencacatan yang dilakukan penyebab dari pengamatan keluar dari batas kendali adalah karena filter

pada pasir silika kotor, sehingga grafik kendali baru sebagai berikut:



Gambar 9. Grafik Kendali M_2Z^2 dan MZ Fase I Perbaikan II.

Perbaikan dilakukan kembali dengan mengeluarkan pengamatan yang keluar dari batas kendai. Sehingga diperoleh grafik kendali baru pada Gambar 9 dengan batas kendali atas grafik kendali M_2Z^2 238,523 dan grafik kendali MZ 10,35 tidak terdapat pengamatan yang keluar dari batas kendali. Sehingga dapat dikatakan bahwa proses pengolahan limbah air PT JCI Tbk fase I telah stabil baik variabilitas proses maupun *mean* prosesnya.

Sehingga diperoleh parameter matriks varian-kovarian yang *in control* sebagai berikut

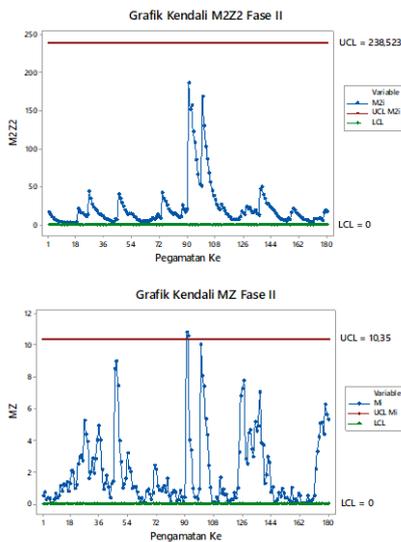
$$\Sigma_{Z_0} = \begin{bmatrix} 1 & -0,07632 \\ -0,07632 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Sigma_{Z_0}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0,005824 \\ 0,005824 & 1 \end{bmatrix}$$

Parameter *in control* matriks Σ_{Z_0} digunakan untuk memonitor *mean* proses pada fase II. Matriks $\Sigma_{Z_0}^2$ menunjukkan parameter *in control* untuk variabilitas proses pada fase II. Setelah diperoleh matriks varian-kovarian yang *in control* pada masing-masing grafik kendali yang digunakan untuk membuat grafik kendali fase II. Pada fase II batas kendali yang digunakan berasal dari batas kendali fase I.

4. Pengendalian Variabilitas Proses dan Mean Proses Pengolahan Limbah Air PT JCI Tbk Fase II

Proses pengolahan limbah air yang digunakan pada fase II mulai tanggal 7 Agustus 2018 – 28 Februari 2019. Fase II dilakukan untuk memonitoring proses variabilitas dan *mean* proses apakah terdapat pergeseran proses. Batas kendali yang digunakan pada fase II adalah batas kendali yang dibentuk dari data fase I. Parameter yang digunakan pada fase II merupakan parameter *in control* pada fase I sehingga diperoleh grafik kendali fase II sebagai berikut:



Gambar 10. Grafik Kendali M_2Z^2 dan MZ Fase II.

Gambar 10 grafik kendali M_2Z^2 pada fase II memiliki batas kendali atas 238,523 dan batas kendali bawah nol menunjukkan bahwa tidak ada pengamatan yang keluar dari batas kendali sehingga dapat dikatakan bahwa variabilitas proses telah stabil. Grafik kendali MZ diketahui bahwa terdapat pengamatan yang keluar dari batas kendali, sehingga dapat dikatakan bahwa *mean* proses pengolahan limbah air pada tanggal 7 Agustus 2018 – 28 Februari 2019 belum stabil.

E. Analisis Kapabilitas Kualitas Proses Pengolahan Limbah Air PT JCI Tbk.

Analisis ini digunakan untuk menaksir kemampuan proses, apakah proses pengolahan limbah air telah memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan atau tidak. Untuk analisis kapabilitas, proses yang digunakan merupakan proses yang sudah *in control* sehingga menggunakan pengamatan pada fase I yang sudah *in control*. Untuk mengetahui kapabilitas proses yang digunakan adalah nilai Cp dan Cpk.

Tabel 8. Kapabilitas Proses Univariat

Karakteristik Kualitas	Cp	Cpk
TDS	5,62	2,33
pH	3,40	2,73

Tabel 8 menunjukkan nilai Pp dan Ppk untuk kapabilitas proses secara univariat, sehingga dilakukan perhitungan kapabilitas proses secara multivariat sebagai berikut:

Tabel 9. Kapabilitas Proses Multivariat

Karakteristik Kualitas	Bobot	MCp	MCpk
TDS	0,5	4,51	2,53
pH	0,5		

Perhitungan kapabilitas secara multivariat ditunjukkan pada Tabel 9 dimana menurut Raissi [9] jumlah pembobot untuk keseluruhan karakteristik bernilai satu. Suatu proses dikatakan kapabel apabila memiliki nilai $Cp \geq 1,33$ [7]. Dalam proses pengolahan limbah di PT JCI Tbk kedua karakteristik kualitas memiliki keutamaan yang sama dalam proses pengolahan limbah air sehingga pembobotan yang diberikan pada dua karakteristik kualitas tersebut sama. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan secara

multivariat proses pengolahan limbah air memiliki nilai aktual yang tinggi sehingga proses pengolahan limbah telah kapabel.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan diatas dapat diperoleh kesimpulan:

1. Pada karakteristik kualitas TDS terdapat pengamatan yang melebihi dari batas spesifikasi, penyebab TDS tinggi karena adanya endapan pada tangki sedimentasi sehingga menyebabkan zat terlarut pada limbah meningkat. Sedangkan pada karakteristik kualitas pH melebihi batas spesifikasi yang ditentukan karena sedikitnya larutan HCl dan PAC dalam tangki pengolahan limbah.
2. Pemeriksaan autokorelasi data menunjukkan bahwa terdapat autokorelasi pada masing-masing variabel. Model *time series* yang terpilih adalah VAR([1,5,8]).
3. Hasil monitor pada fase I yaitu variabilitas proses dan *mean* proses sudah stabil atau terkendali secara statistik setelah diidentifikasi penyebab pengamatan keluar dari batas kontrol. Pada fase II menggunakan matriks varian kovarian *in control* diperoleh hasil bahwa variabilitas proses telah stabil namun *mean* proses belum stabil. Kapabilitas proses diperoleh nilai MCp 4,51 dan MCpk 2,53 yang artinya proses pengolahan limbah air telah kapabel.

B. Saran

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan maka saran yang dapat diberikan kepada PT Japfa Comfeed Indonesia Tbk adalah untuk melakukan pembersihan yang terjadwal pada masing-masing elemen pengolahan limbah. Perusahaan diharapkan melakukan kalibrasi pada alat ukur TDS dan pH secara rutin agar hasil yang diperoleh dapat menggambarkan keadaan yang sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Reynolds and G. Cho, "Multivariate Control Charts for Monitoring the Mean Vector and Covariance Matrix," J. Qual. Technol., vol. 38, no. 3, pp. 230–252, 2006.
- [2] Wei, W. W. S. (2006). Time Series Analysis Univariate and Multivariate Methods, Second Edition. New York (United State of America) : Pearson Education. Inc.
- [3] Tiao, Box. (1981) Coefficient Methods. Dalam Wei, W., W., S. (2006). Time Series Analysis Univariate and Multivariate Methods, Second Edition. New York (United States of America) : Pearson Education, Inc.
- [4] Lutkepohl, H. (2005). New Introduction to Multiple Time Series Analysis. Germany : Springer.
- [5] Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2007) Applied Multivariate Statistical Analysis. New Jersey : Prentice Hall.
- [6] Morrison, D. F. (1990). Multivariate Statistical Methods (3rd ed). New Jersey, USA: McGraw-Hill, Inc.
- [7] Montgomery, D. C. (2013). Statistical Quality Control, Sixth Edition. United States : John Wiley & Sons, Inc
- [8] Reynolds, M.R & Stoumbos, Z.G. (2008). Combinations of Multivariate Shewhart and MEWMA Control Charts for Monitoring the Mean Vector and Covarians Matrix. Journal of Quality Technology, vol.40, pp 381-393
- [9] Raissi, S. (2009). Dalam Multivariate Process Capability Indoces on the Presence of Priority for Quality Characteristics. Jurnal of Industrial Engineering International Vol. 5, No. 9.
- [10] Hyndman, R.J., & Kostenko, A.V. (2008). Forecasting Without Significance Test.

- [11] Reynolds, M.R & Cho, G.H. (2006). Multivariate Control Charts for Monitoring the Mean Vector and Covariance Matrix, *Journal of Quality Technology*, 38(3), 230-252.