

## PENGENDALIAN KUALITAS PUPUK NITROGEN, PHOSPAT, KALIUM (NPK) PELANGI FUSION DI PT PUPUK KALIMANTAN TIMUR MENGGUNAKAN PETA KENDALI MEWMA & MEWMV

Bungan Tcانيا Paulina Grace<sup>1\*</sup>, Puspita Kartikasari<sup>2</sup>, Deby Fakhriyana<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Departemen Statistika FSM Universitas Diponegoro

\*e-mail: [btcania@gmail.com](mailto:btcania@gmail.com)

DOI: 10.14710/j.gauss.16.1.110-120

### Article Info:

Received: 2024-12-07

Accepted: 2025-12-30

Available Online: 2026-05-21

### Keywords:

Control chart; MEWMA; MEWMV, Statistical Process Control (SPC), Multivariate Capability Process

**Abstract:** The NPK Pelangi Fusion fertilizer is one of the main products manufactured by PT Pupuk Kalimantan Timur. NPK fertilizer is a blend of various plant nutrients, primarily Nitrogen, Phospat, and Kalium, aimed at enhancing crop yields. However, deviations from the NPK fertilizer specifications can lead to inconsistent plant growth and low harvest yields. Statistical Process Control (SPC) is a method used to process data and monitor production processes using statistical techniques, with the goal of detecting changes in process performance through the use of control charts. In this study, the Multivariate Exponentially Weighted Moving Variance (MEWMV) control chart is used to monitor the variance of the production process due to its optimal performance in detecting small variance shifts. Additionally, the Multivariate Exponentially Weighted Moving Average (MEWMA) control chart is used to monitor the mean of the NPK Pelangi Fusion production process, as it quickly detects subtle shifts in variance. The analysis results indicate that the optimal weighting for the MEWMV control chart is  $\omega=0.2$  and  $\lambda=0.4$ , resulting in an Average Run Length (ARL) of 370. Similarly, the optimal weighting for the MEWMA control chart is  $\lambda=0.06$ , with an upper control limit of  $H=9.80$  and an ARL of 200. This study concludes that the mean and variance of the multivariate production process have been effectively controlled.

## 1. PENDAHULUAN

PT Pupuk Kalimantan Timur (PT Pupuk Kaltim) adalah perusahaan nomor satu dalam memproduksi pupuk urea di Asia Tenggara dan nomor enam di Asia Pasifik (Mudassar, 2022). PT Pupuk Kaltim memiliki produk utama Pupuk NPK, Pupuk Urea, dan Pupuk Amoniak. Pupuk NPK hasil produksi PT Pupuk Kaltim adalah satu dari pupuk dengan permintaan terbanyak di pasaran. Menurut Laporan Tahunan PT Pupuk Kaltim (2022), total realisasi produksi Pupuk NPK mencapai 251 ribu ton kilogram. Terdapat dua jenis Pupuk NPK produksi PT Pupuk Kaltim yaitu NPK Pelangi Blending dan NPK Pelangi Fusion. Produksi Pupuk NPK Pelangi Fusion pada tahun 2022 mencapai 196.750 ton atau sama dengan 78% dari total realisasi produksi Pupuk NPK, sehingga dapat dikatakan Pupuk NPK Pelangi Fusion adalah salah satu produk unggulan PT Pupuk Kaltim.

Laporan Tahunan 2022 PT Pupuk Kaltim mencantumkan bahwa pengaduan pelanggan 54% ditujukan pada produk NPK. Laporan Tahunan 2021 juga mencantumkan keluhan pelanggan yaitu ada ketidaksesuaian kadar zat hara NPK Pelangi Fusion 13+6-27+4+0,65B. Hal-hal tersebut selain dapat menurunkan kualitas produk, juga dapat membuat konsumen kecewa. Berdasarkan permasalahan tersebut produk Pupuk NPK Pelangi Fusion 13+6+27+4+0,65B perlu dilakukan pengendalian kualitas secara statistika.

*Statistical Process Control* atau pengendalian proses statistika merupakan metode yang digunakan untuk mengolah data-data, mengawasi, dan mengontrol proses produksi dari waktu ke waktu melalui metode statistik untuk mengidentifikasi perubahan dalam

kinerja proses (Woodall & Montgomery, 1999). Satu metode statistik yang bisa dimanfaatkan adalah peta kendali, yang berfungsi untuk mengawasi dan mengontrol proses berada dalam kendali kualitas statistik atau tidak dalam suatu gambaran visual. Tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi masalah dan meningkatkan kualitas (Heizer & Render, 2008).

Digunakan peta kendali *Multivariate Exponentially Weighted Moving Average* (MEWMA) yang berfungsi mengidentifikasi pergeseran rata-rata proses dan *Multivariate Exponentially Weighted Moving Variance* (MEWMV) yang berfungsi mengidentifikasi pergeseran varians proses. Penerapan peta kendali MEWMA dan MEWMV pada pengendalian kualitas Pupuk NPK Pelangi Fusion di PT Pupuk Kaltim akan dilakukan pada dua fase, dimana fase 1 digunakan untuk mencari batas kendali dan pembobot, kemudian pada fase 2 digunakan untuk mengontrol kinerja proses.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Proses produksi pupuk NPK Pelangi Fusion terbagi menjadi beberapa tahap (PT Pupuk Kalimantan Timur, 2021), yaitu:

1. *Hopper*  
Proses mesin mencampurkan bahan utama seperti urea, DAP/RP, KCl, Clay dan filler berupa Mg dan Ca.
2. *Steam and Granulation*  
Pada tahap ini, dilakukan penggabungan bahan baku dengan penambahan uap dan air sebagai dukungan untuk membentuk pupuk.
3. *Dryer*  
Proses pengeringan pupuk NPK dilakukan dalam sebuah pengering dengan menggunakan udara panas sebagai bantuan.
4. *Cooler*  
Pupuk NPK didinginkan menggunakan aliran udara suhu kamar ke perangkat pendingin.
5. *Screen and Crusher*  
Mengidentifikasi dan memilah pupuk NPK yang belum memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan.
6. *Coating*  
Melapisi produk dengan *coating oil*, setelah itu dilakukan pengantongan.

Uji normal multivariat digunakan untuk mengevaluasi apakah data yang diamati berdistribusi normal multivariat. Sebuah rangkaian observasi  $X_1, X_2, \dots, X_p$  berdistribusi normal multivariat apabila vektor rata-rata  $\mu$  dan matriks varian kovarian  $\Sigma$  mempunyai fungsi densitas seperti di bawah,

$$f(X) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}p} |\Sigma|^{-\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (X - \mu)^T \Sigma^{-1} (X - \mu) \right\} \quad (1)$$

Uji normal multivariat bisa dijalankan dengan membangun *q-q plot* dengan cara yang dijelaskan ini (Johnson & Wichern, 2007):

- i. Menghitung vektor rata-rata tiap variabel ( $\bar{X}_j$ ),  $\bar{X}_j = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n x_{ij}$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$
- ii. Menghitung matriks varian-kovarian S
- iii. Menghitung jarak *mahalanobis* dari setiap observasi  $d_i^2 = (x_{ij} - \bar{X}_j)^T S^{-1} (x_{ij} - \bar{X}_j)$
- iv. Menata nilai  $d_i^2$  dari yang terkecil hingga terbesar  $d_1^2 \leq d_2^2 \leq d_3^2 \leq \dots \leq d_n^2$
- v. Mencari nilai  $p_i = \frac{i-0,5}{n}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$
- vi. Mencari nilai  $q_i = \chi_{(p, (\frac{i-0,5}{n})}^2$  dengan menggunakan tabel *chi-square*

vii. Membentuk *scatter plot* menggunakan nilai  $d_i^2$  yang diurutkan dengan  $q_i$ .

Apabila plot pada *scatter plot* membentuk garis linier atau terdapat minimal 50% nilai  $d_i^2 < \chi_p^2(0,5)$  maka dapat diambil kesimpulan data berdistribusi normal multivariat (Johnson & Wichern, 2007). Uji normal multivariat juga dapat dilakukan menggunakan uji koefisien korelasi. Uji koefisien korelasi dapat dilakukan dengan langkah sebagai berikut (Johnson & Wichern, 2007).

$H_0$  : Data berdistribusi normal multivariat ( $d_i^2$  berkorelasi  $q_i$ )

$H_1$  : Data tidak berdistribusi normal multivariat ( $d_i^2$  tidak berkorelasi dengan  $q_i$ )

Statistik Uji:

$$r_q = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i^2 - \bar{d}_i^2)(q_i - \bar{q}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (d_i^2 - \bar{d}_i^2)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q}_i)^2}} \quad (2)$$

dengan,  $d_i^2$  = jarak *mahalanobis* ke- $i$  ;  $q_i$  = nilai *chi-square*  $\chi_{(p, (\frac{i-0,5}{n}))}^2$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$

Kriteria penolakan  $H_0$  jika  $r_q < r_{(\alpha, n)}$  atau nilai *p-value*  $< \alpha$ , dengan  $r_{\alpha, n}$  adalah nilai dari tabel koefisien korelasi  $r_{\alpha, n}$ . Kesimpulan yang didapatkan adalah data tidak berdistribusi normal multivariat atau sebaliknya apabila  $H_0$  diterima.

Salah satu metode untuk mengetahui ada atau tidaknya korelasi pada 3 atau lebih variabel data yaitu dengan menggunakan Uji Bartlett (Morrison, 1990). Korelasi dianggap ada antara variabel-variabel pada rangkaian variabel data jika matriks korelasinya tidak membentuk matriks identitas. Pada Uji Bartlett digunakan hipotesis sebagai berikut.

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

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

Statistik Uji:

$$\chi_{hitung}^2 = - \left\{ n - 1 - \frac{2p + 5}{6} \right\} \ln |\mathbf{R}| \quad (3)$$

dengan:  $n$  = jumlah observasi;  $p$  = jumlah variabel ;  $\mathbf{R}$  = matriks korelasi antar variabel ;  $|\mathbf{R}|$  = determinan matriks korelasi ;  $\mathbf{I}$  = matriks identitas

Kriteria penolakan  $H_0$  ketika nilai  $\chi_{hitung}^2 > \chi_{(\alpha, \frac{1}{2}p(p-1))}^2$  atau *p-value*  $< \alpha$ . Kesimpulan yang didapatkan adalah matriks korelasi tidak membentuk matriks identitas atau dapat dikatakan bahwa antar variabel terdapat korelasi satu sama lain. Matriks korelasi  $\mathbf{R}$  diberikan Johnson dan Wichern (2007) sebagai berikut.

$$r_{X_1, X_2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{X}_1)(x_{i2} - \bar{X}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{X}_1)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{X}_2)^2}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

Pengendalian kualitas statistika dikenal sebagai metode yang berguna untuk memastikan bahwa produk atau jasa memenuhi tingkat kualitas yang diharapkan menggunakan metode statistik. Proses ini melibatkan aktivitas teknis dan manajerial untuk mengukur karakteristik kualitas produk, mengukur perbedaan dengan standar yang telah ditetapkan, dan mengambil langkah-langkah perbaikan jika terdapat perbedaan antara kualitas yang sebenarnya dan standar yang ditetapkan (Montgomery, 2009). Pengelolaan kualitas statistik dilaksanakan melalui pemanfaatan alat bantu yang ada dalam Statistik Pengendalian Proses (SPC), seperti penggunaan peta kendali dan diagram sebab-akibat.

Peta kendali MEWMV berfungsi untuk mengidentifikasi pergeseran variabilitas proses yang kecil, sehingga lebih sensitif serta penggunaan peta kendali ini tidak memerlukan rata-rata proses harus terkontrol. Peta kendali MEWMV dibentuk melalui persamaan berikut (Huwang, et al., 2007).

$$V_t = \omega (x_t - y_t)(x_t - y_t)^T + (1 - \omega) V_{t-1} \quad (5)$$

dengan  $0 < \omega < 1$ ;  $0 < \lambda < 1$ , ;  $V_0 = (x_1 - y_1)(x_1 - y_1)^T$ . Nilai  $y_t$  diestimasi dengan rumus,

$$y_t = \lambda x_t + (1 - \lambda)y_{t-1} \quad (6)$$

dimana  $y_0 = 0$ , dengan  $y_t$  = estimasi rata-rata proses pada waktu ke-t dari MEWMA pada  $x_t$ . Nilai pembobot  $\omega$  dan  $\lambda$  telah diberikan oleh Huwang, *et al.* (2007) berdasarkan nilai p (banyaknya variabel). Untuk membangun  $y_t$  didefinisikan matriks  $X$ ,  $Y$ , dan matriks  $C$  terlebih dahulu.

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_t \end{bmatrix}; Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_t \end{bmatrix} \quad (7)$$

dimana t = jumlah observasi; nilai  $X$  dihitung sebanyak p variabel.

$$C = \begin{bmatrix} (1 - \omega)^{t-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega(1 - \omega)^{t-2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \omega(1 - \omega) & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \omega \end{bmatrix} \quad (8)$$

$C$  merupakan matriks diagonal ukuran  $t \times t$  dengan elemen  $\omega$ ,  $\omega$  = pembobot yang ditentukan. Dengan menyubstitusikan persamaan (10) ke  $x_i - y_i$  didapatkan

$$V_t = \sum_{i=1}^t \omega(1 - \omega)^{t-1} (x_i - y_i)(x_i - y_i)^T + (1 - \omega) V_0 \quad (9)$$

$$y_t = \sum_{i=1}^t \lambda(1 - \lambda)^{t-i} x_i \quad (10)$$

$$x_i - y_i = (1 - \lambda)x_i - \lambda(1 - \lambda)x_{i-1} - \dots - \lambda(1 - \lambda)^{i-1} x_1, i = 1, 2, \dots, t. \quad (11)$$

Melalui persamaan (11) diperoleh matriks berikut.

$$(X - Y) = \begin{bmatrix} (x_1 - y_1)^T \\ (x_2 - y_2)^T \\ \vdots \\ (x_t - y_t)^T \end{bmatrix} = (I_t - M)X \quad (12)$$

dengan  $I_t$  = matriks identitas ukuran  $t \times t$ ;  $M$  = matriks segitiga bawah ukuran  $t \times t$  dengan  $\lambda$  = pembobot.

$$M = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & \dots & 0 \\ \lambda(1 - \lambda) & \lambda & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda(1 - \lambda)^{t-1} & \dots & \lambda(1 - \lambda) & \lambda \end{bmatrix} \quad (13)$$

Persamaan (5) dapat dituliskan juga dengan,

$$V_t = (X - Y)^T C (X - Y) = X^T (I_t - M)^T C (I_t - M) X = X^T Q X \quad (14)$$

dengan  $Q$  = matriks bujur sangkar ukuran  $t \times t$ .

$$Q = (q_{ij}) = (I_t - M)^T C (I_t - M), 1 \leq i, j \leq t \quad (15)$$

Berdasarkan persamaan (14) dan persamaan (15) dapat dicari  $tr(V_t)$

$$tr(V_t) = tr(X^T Q X) = tr(Q X X^T) \quad (16)$$

Oleh karena itu didapatkan persamaan untuk titik observasi untuk setiap t pada peta kendali MEWMA yang dinyatakan dalam,

$$tr(V_t) = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t q_{ij} \left( \sum_{k=1}^p x_{ik} x_{jk} \right) \quad (17)$$

Ketika  $p = 1$ , persamaan (17) akan membentuk peta kendali EWMV. Sementara itu, ketika proses terkendali, diperoleh

$$E[tr(\mathbf{V}_t)] = p \sum_{i=1}^t q_{ii} = p \operatorname{tr}(\mathbf{Q}) \quad (18)$$

Nilai  $E[tr(\mathbf{V}_t)]$  pada persamaan (18) konvergen untuk  $E[tr(\mathbf{V}_t)] = \frac{2p(1-\lambda)^2}{2-\lambda}$  ketika  $t \rightarrow \infty$  dan perhitungan  $\operatorname{Var}[tr(\mathbf{V}_t)]$  dijelaskan sebagai berikut.

$$\operatorname{Var}[tr(\mathbf{V}_t)] = 2p \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t q_{ij}^2 \quad (19)$$

Persamaan di atas membentuk batas kendali untuk setiap  $t$ . Batas peta kendali berdasarkan nilai  $tr(\mathbf{V}_t)$  ditentukan oleh

$$E[tr(\mathbf{V}_t)] \pm L\sqrt{\operatorname{Var}[tr(\mathbf{V}_t)]} \quad (20)$$

$L$  adalah konstanta yang tergantung pada nilai  $p$  (jumlah variabel),  $\omega$  (pembobot) dan  $\lambda$  (pembobot) yang diperoleh melalui metode Monte Carlo yang ditetapkan Huwang, *et al.* (2007) dengan *Average Run Length* (ARL) = 370 yang setara dengan  $\alpha = 0,0027$ .

Menurut Montgomery (2009), peta kendali MEWMA adalah perluasan dari peta kendali EWMA untuk deteksi pergeseran rata-rata dalam proses multivariat. Kelebihannya adalah memiliki sensitivitas yang baik serta dapat digunakan walau data tidak mengikuti distribusi normal. Estimasi rata-rata proses pada waktu ke- $t$  untuk vektor observasi ke- $t$  didefinisikan dengan rumus berikut.

$$\mathbf{y}_t = \lambda \mathbf{x}_t + (1 - \lambda)\mathbf{y}_{t-1} \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

dimana  $\mathbf{Z}_0 = 0$  dengan  $n =$  jumlah observasi ;  $\lambda =$  pembobot,  $0 < \lambda < 1$  ;  $\mathbf{x}_t =$  vektor sampel observasi ke- $t$  berukuran  $p$  (banyak variabel)  $\times 1$ .

Menurut Montgomery (2009), nilai pembobot  $\lambda$  merupakan nilai bobot yang sudah ditetapkan berdasarkan *Average Run Length* (ARL) optimum yang disarankan oleh Lowry, *et al.* (1992) sebesar 200 yang setara dengan  $\alpha=5\%$  menggunakan pendekatan rantai Markov. Sebelum menentukan selang pembobot  $\lambda$  yang digunakan, terlebih dahulu harus mengetahui nilai perubahan rata-rata ( $\delta$ ) dengan persamaan sebagai berikut (Aparisi & Garcia-Diaz, 2004).

$$\delta = \sqrt{(\boldsymbol{\mu}_1 - \boldsymbol{\mu}_0)\boldsymbol{\Sigma}_0^{-1}(\boldsymbol{\mu}_1 - \boldsymbol{\mu}_0)^T} \quad (22)$$

dimana:  $\boldsymbol{\mu}_0 =$  vektor rata-rata proses fase 1 ;  $\boldsymbol{\mu}_1 =$  vektor rata-rata proses fase 2 ;  $\boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} =$  invers matriks varian kovarian fase 1.

Titik-titik yang akan diplotkan dalam peta kendali berasal dari persamaan berikut.

$$T_t^2 = \mathbf{y}_t \left[ \sum_{\mathbf{y}_t} \right]^{-1} \mathbf{y}_t^T \quad (23)$$

dimana

$$\sum_{\mathbf{y}_t} = \frac{\lambda}{2 - \lambda} [1 - (1 - \lambda)^{2t}] \boldsymbol{\Sigma} \quad (24)$$

dengan  $\mathbf{y}_t =$  vektor rata-rata proses MEWMA yang telah diboboti periode ke- $t$  ;  $\boldsymbol{\Sigma} =$  matriks varian kovarian. Dalam peta kendali MEWMA, batas kendali atas (BKA) ditentukan dengan parameter  $H$ . Parameter  $H$  dihitung berdasarkan  $\lambda$  yang ditentukan oleh Prabhu dan Runger (1997) menggunakan pendekatan rantai Markov untuk perhitungan ARL. Batas kendali bawah MEWMA diberikan oleh nilai 0. Proses dianggap terkendali jika titik observasi ( $T_t^2$ ) kurang dari BKA atau  $T_t^2 < H$  (Montgomery, 2009).

Diagram Sebab-Akibat atau yang disebut oleh Heizer dan Render (2008) sebagai Diagram Tulang Ikan merupakan diagram yang memiliki manfaat untuk mengidentifikasi penyebab utama yang menyebabkan perubahan kualitas dan menyebabkan masalah yang sedang diteliti. Selain itu, diagram ini memungkinkan kita untuk melihat lebih detail penyebab lain yang berpengaruh dan menyebabkan dampak pada penyebab utama, yang ditunjukkan oleh panah-panah dengan bentuk tulang ikan di diagram tersebut. Prinsip yang dipakai dalam pembuatan diagram sebab-akibat ini yaitu dengan mengumpulkan saran atau gagasan dari beberapa pihak melalui *brainstorming*. (Gasperz & Fontana, 2011) mengklasifikasikan faktor-faktor menjadi tujuh yaitu manusia, mesin, metode, bahan baku, media, motivasi, dan uang.

### 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data sekunder dari Laboratorium PT Pupuk Kaltim. Data sekunder diperoleh dari hasil pengujian produk Pupuk NPK Pelangi Fusion konsentrasi 13+6+27+4+0,65B dari 1 Oktober hingga 30 November 2022 periode harian. Karakteristik kualitas yang digunakan adalah Nitrogen (N), Fosfat ( $P_2O_5$ ), Kalium ( $K_2O$ ). Langkah analisis dijelaskan sebagai berikut.

1. Analisis deskriptif variabel kualitas Pupuk NPK Pelangi Fusion.
2. Melakukan uji asumsi normalitas multivariat
3. Melakukan uji korelasi antar variabel menggunakan uji Bartlett.
4. Membuat peta kendali MEWMV Fase 1 untuk menetapkan batas kendali MEWMV dan menentukan nilai pembobot  $\lambda$  dan  $\omega$  yang akan digunakan.
5. Membuat peta kendali MEWMV Fase 2 untuk mengontrol variansi proses menggunakan pembobot  $\lambda$  dan  $\omega$  yang paling optimum.
6. Menghitung perubahan rata-rata  $\delta$  untuk menentukan selang  $\lambda$  paling optimal untuk peta kendali MEWMA.
7. Membuat peta kendali MEWMA Fase 1 untuk menentukan nilai pembobot  $\lambda$  yang akan digunakan.
8. Membuat peta kendali MEWMA Fase 2 untuk mengontrol rata-rata proses menggunakan pembobot  $\lambda$  yang paling optimum.

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

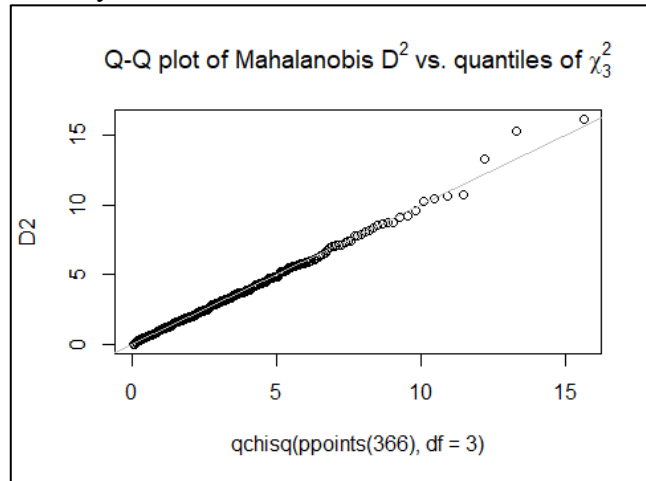
Hasil analisis deskriptif Pupuk NPK Pelangi Fusion untuk variabel Nitrogen (N), Fosfat (P), dan Kalium (K) periode 1 Oktober hingga 30 November 2022 dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Analisis Deskriptif N, P, K

Variabel	N	Mean	StDev	Minimum	Maximum
N	366	0,1282	0,0141	0,0903	0,1861
P	366	0,0654	0,0119	0,0406	0,1432
K	366	0,2627	0,0190	0,1336	0,3094

Uji normalitas multivariat dilakukan pada komponen pupuk NPK Pelangi Fusion, yaitu N, P dan K. Uji normalitas multivariat pada komponen pupuk NPK Pelangi Fusion dapat dilihat pada *q-q plot* yang tersaji pada Gambar 1. Berdasarkan Gambar 1, dapat terlihat bahwa plot mengikuti garis linier. Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa dari 366 data, terdapat 237 data yang bernilai lebih besar dari nilai  $\chi_3^2(0,5) = 2,366$  hal ini menyimpulkan bahwa secara visual karakteristik kualitas pupuk NPK Pelangi Fusion mengikuti distribusi normal multivariat. Uji normalitas multivariat secara formal

menggunakan uji koefisien korelasi diperoleh bahwa nilai korelasi antar jarak mahalanobis ( $d_i^2$ ) dengan nilai kuantil *Chi-square*  $q_i$  sebesar  $r_q = 0,8143$ . Menggunakan taraf signifikansi  $\alpha = 5\%$  maka diperoleh  $r_{0,05,366} = 0,1022$  sehingga  $H_0$  diterima karena nilai  $r_q = 0,8143 > r_{0,05,366} = 0,1022$ . Dengan itu maka dapat disimpulkan bahwa karakteristik kualitas NPK Pelangi Fusion yaitu N, P dan K berdistribusi normal multivariat.



Gambar 1. *q-q plot* Uji Normalitas Multivariat

Sebelum melakukan monitor karakteristik kualitas pada pupuk NPK Pelangi Fusion dengan peta kendali MEWMA dan peta kendali MEWMV, karakteristik kualitas pupuk NPK Pelangi Fusion harus mengikuti asumsi saling berkorelasi. Untuk memeriksa korelasi antar karakteristik kualitas, maka digunakan uji Bartlett. Menggunakan persamaan (3) diperoleh nilai  $\chi_{hitung}^2 = 198,22$ . Dengan taraf signifikansi  $\alpha = 5\%$  dan jumlah variabel  $p = 3$ , diperoleh nilai *Chi-square* tabel  $\chi_{(0,05,3)}^2 = 7,814$ , sehingga  $H_0$  ditolak karena nilai  $\chi_{hitung}^2 = 198,22 > \chi_{(0,05,3)}^2 = 7,814$ . Untuk itu diperoleh kesimpulan bahwa karakteristik kualitas N, P, dan K pada Pupuk NPK Pelangi Fusion saling berkorelasi.

Penggunaan peta kendali MEWMV pada Pupuk NPK Pelangi Fusion berfungsi untuk mengontrol pergeseran variabilitas proses produksi. Pada penerapan peta kendali ini digunakan pembobot  $0 < \omega \leq 0,4$  dan  $0 < \lambda \leq 0,4$ . Menurut Huwang, *et al* (2007), penggunaan pembobot  $\omega$  dan  $\lambda$  dengan nilai  $\leq 0,4$  memiliki kemampuan lebih unggul dalam mengontrol variabilitas proses. Dengan demikian, diaplikasikan pembobot  $\omega$  dan  $\lambda$  dengan nilai  $\leq 0,4$  berdasarkan rekomendasi tersebut. Akan dibentuk peta kendali MEWMV menggunakan persamaan (17). Hasil pembentukan peta kendali MEWMV dengan berbagai kombinasi pembobot secara singkat dijabarkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Peta Kendali MEWMV

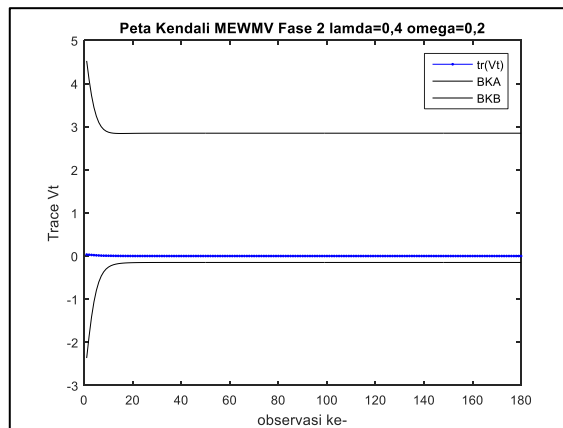
$\lambda$	$\omega$	L	$\max BKA$	$\max \text{tr}(V_t)$	$ \max \text{tr}(V_t) - \max BKA $	Jumlah Titik Keluar Batas Kendali
0,1	0,1	2,7900	7,966	0,083	7,883	175
	0,2	2,7939	7,973	0,083	7,891	179
	0,3	2,7949	7,975	0,083	7,893	178
	0,4	2,7988	7,983	0,083	7,901	0

Tabel 2. Hasil Peta Kendali MEWMV (lanjutan)

$\lambda$	$\omega$	L	$\max BKA$	$\max \text{tr}(V_t)$	$ \max \text{tr}(V_t) - \max BKA $	Jumlah Titik Keluar Batas Kendali
-----------	----------	---	------------	-----------------------	------------------------------------	-----------------------------------

0,2	0,1	3,3105	7,110	0,065	7,045	173
	0,2	3,3086	7,107	0,065	7,042	176
	0,3	3,3164	7,119	0,065	7,054	0
	0,4	3,3213	7,127	0,065	7,062	0
0,3	0,1	3,6484	5,849	0,050	5,799	172
	0,2	3,6523	5,854	0,050	5,804	0
	0,3	3,6002	5,791	0,050	5,741	0
	0,4	3,6699	5,875	0,050	5,825	0
<b>0,4</b>	0,1	3,8984	4,518	0,037	4,481	170
	<b>0,2</b>	<b>3,9063</b>	<b>4,525</b>	<b>0,037</b>	<b>4,488</b>	<b>0</b>
	0,3	3,9121	4,530	0,037	4,493	0
	0,4	3,9219	4,538	0,037	4,502	0

Dilakukan perbandingan kombinasi pembobot menggunakan perhitungan nilai  $|max\ tr(\mathbf{V}_t) - max\ BKA|$  yang diperoleh dari analisis. Peta kendali yang memiliki selisih  $|max\ tr(\mathbf{V}_t) - max\ BKA|$  terkecil akan dianggap sebagai peta kendali yang paling sensitif dalam mengidentifikasi pergeseran variansi proses. Tabel 2 memberikan informasi bahwa selisih terkecil  $|max\ tr(\mathbf{V}_t) - max\ BKA|$  adalah 4,481 yang memiliki pembobot  $\lambda = 0,4$  dan  $\omega = 0,1$ . Namun, perlu dipertimbangkan menggunakan pembobot tersebut, karena jumlah titik keluar batas kendali sebanyak 170 dimana titik yang keluar kendali sangat besar, sehingga dipilih  $|max\ tr(\mathbf{V}_t) - max\ BKA|$  terkecil kedua, yaitu 4,488 yang memiliki pembobot  $\lambda = 0,4$  dan  $\omega = 0,2$ . Penggunaan nilai pembobot ini dianggap optimal dan paling tepat dalam mengidentifikasi pergeseran variabilitas lebih cepat. Selanjutnya dilakukan perhitungan peta kendali MEWMV fase 2 untuk Pupuk NPK Pelangi Fusion menggunakan pembobot  $\lambda = 0,4$  dan  $\omega = 0,2$ . Hasil peta kendali MEWMV fase 2 untuk mengontrol variabilitas proses Pupuk NPK Pelangi Fusion dengan pembobot  $\lambda = 0,4$  dan  $\omega = 0,2$  diberikan oleh Gambar 4.



Gambar 2. Peta Kendali MEWMV Fase 2 Pembobot  $\lambda = 0,4$  dan  $\omega = 0,2$

Gambar di atas menjelaskan bahwa peta kendali MEWMV dengan pembobot  $\lambda = 0,4$  dan  $\omega = 0,2$  untuk mengontrol variansi proses karakteristik kualitas Nitrogen, Phospat, dan Kalium terkendali karena tidak ada titik observasi yang berada di luar batas kendali.

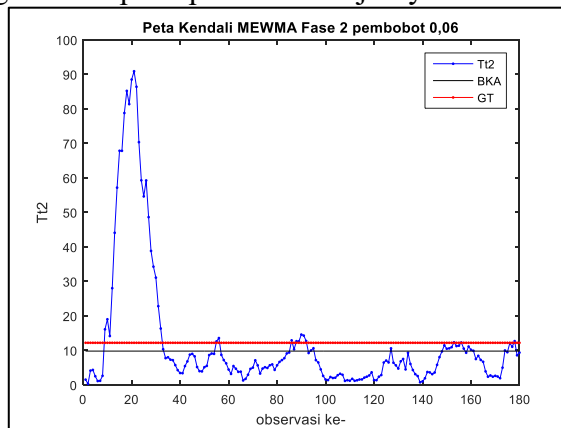
Penerapan peta kendali MEWMA dilakukan dalam dua fase yaitu fase 1 dan fase 2. Menurut Montgomery (2009) fase 1 dilakukan untuk menganalisis secara bersamaan berbagai pembobot dan mencari pembobot ( $\lambda$ ) yang terbaik serta batas kendali yang akan digunakan mengontrol rata-rata proses untuk periode selanjutnya. Sebelum menentukan membangun peta kendali MEWMA, perlu didefinisikan terlebih dahulu nilai perubahan rata-rata ( $\delta$ ) menggunakan persamaan (22). Dari hasil perhitungan, diperoleh nilai

perubahan rata-rata proses sebesar  $\delta = 0,2697$ . Menggunakan tabel pembobot  $\lambda$  optimal dengan  $ARL = 200$  yang disarankan oleh Lowry, *et al.* (1992) diperoleh untuk  $p = 3$  dan  $\delta = 0,2697$  di selang nilai  $\delta = 0,00 - 0,500$  disarankan pembobot  $\lambda = 0,04 - 0,06$  dengan batas kendali atas  $H = 9,80$ . Selanjutnya dilakukan perbandingan pembobot terbaik untuk peta kendali MEWMA menerapkan selang pembobot  $\lambda = 0,04 - 0,06$ . Berikut disajikan secara singkat hasil peta kendali MEWMA yang dibentuk menggunakan persamaan (23).

Tabel 3. Hasil Peta Kendali MEWMA

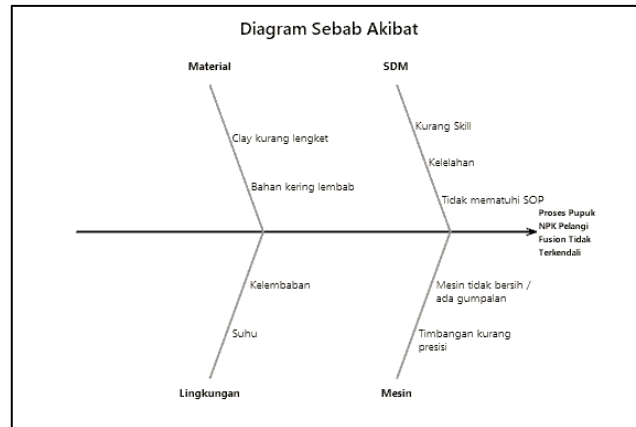
$\lambda$	BKA	Max $T_t^2$	$ Max T_t^2 - BKA $	Jumlah Titik Keluar Batas Kendali
0,04	9,80	21,97	12,17	53
0,05	9,80	29,30	19,5	47
0,06	9,80	38,26	28,46	41

Pemilihan pembobot terbaik dapat dilakukan dengan mencari nilai terkecil dari  $|Max T_t^2 - BKA|$  yang merupakan nilai *error* dan berdasarkan jumlah titik keluar kendali. Diketahui dari tabel bahwa selisih terkecil dari  $|Max T_t^2 - BKA|$  sebesar 12,17, dengan pembobot  $\lambda = 0,04$  dan jumlah titik keluar batas kendali sebanyak 53 titik observasi. Walaupun peta kendali dengan pembobot  $\lambda = 0,04$  memiliki nilai  $|Max T_t^2 - BKA|$  terkecil, namun titik yang keluar dari batas kendali sangat besar. Menurut Saccucci (1990) dalam Lowry, *et al.* (1992) pembobot  $\lambda$  yang sangat kecil sangat sensitif dalam mengidentifikasi pergeseran proses, namun pembobot yang sangat kecil dapat memberikan *false alarm* dalam sebuah proses. Oleh karena itu diambil alternatif pembobot yaitu  $\lambda = 0,06$  karena pembobot ini memiliki jumlah titik kendali yang tidak terlalu banyak. sehingga, dapat disimpulkan bahwa pembobot  $\lambda = 0,06$  adalah nilai pembobot paling optimal untuk mengidentifikasi pergeseran rata-rata proses. Setelah diperoleh pembobot optimal pada pengendalian proses produksi Pupuk NPK Pelangi Fusion fase 1, langkah selanjutnya adalah membentuk peta kendali MEWMA fase 2 untuk mengontrol rata-rata proses Pupuk NPK Pelangi Fusion pada periode selanjutnya.



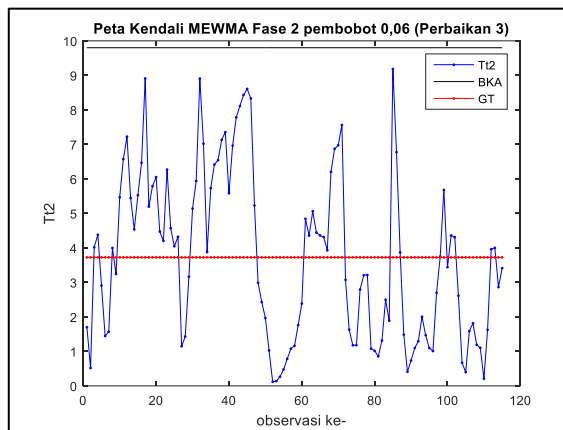
Gambar 3. Peta Kendali MEWMA Fase 2 Pembobot  $\lambda = 0,06$

Dari Gambar 3 dapat dijelaskan bahwa peta kendali MEWMA fase 2 menggunakan  $\lambda = 0,06$  dan BKA = 9,80 yang mengontrol proses produksi variabel kualitas Nitrogen, Phospat, dan Kalium pada Pupuk NPK Pelangi Fusion belum terkendali secara rata-rata. Penyebabnya karena ada 53 observasi keluar dari BKA. Untuk mencapai proses terkendali maka dapat dilakukan identifikasi penyebab proses tidak terkendali. Melalui wawancara dengan staf perusahaan dan staf laboratorium adanya penyebab khusus yaitu faktor material, faktor mesin, dan faktor manusia dan penyebab umum yaitu faktor lingkungan dan secara singkat digambarkan pada diagram sebab-akibat di bawah ini.



Gambar 4. Diagram Sebab Akibat

Setelah mengetahui bahwa terdapat penyebab khusus yang menyebabkan rata-rata proses produksi Pupuk NPK Pelangi Fusion maka dapat dilakukan perbaikan proses dengan membentuk peta kendali MEWMA baru dengan cara menghapus titik observasi berada di luar batas kendali. Perbaikan peta kendali MEWMA dilakukan hingga perbaikan ketiga. Hasil peta kendali MEWMA fase 2 dengan  $\lambda = 0,06$  yang telah diperbaiki disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Peta Kendali MEWMA Fase 2 Pembobot  $\lambda = 0,06$  (Perbaikan 3)

Berdasarkan Gambar 5 peta kendali MEWMA fase 2 dengan  $\lambda = 0,06$  yang memonitor karakteristik kualitas Nitrogen, Phospat, dan Kalum pada proses produksi Pupuk NPK Pelangi Fusion yang telah diperbaiki setelah iterasi ke-3 dalam keadaan terkendali karena tidak terdapat titik observasi yang keluar dari BKA.

## 5. KESIMPULAN

Pada penerapan peta kendali MEWMV fase 1 diperoleh pembobot paling optimal dan sensitif dalam penelitian ini adalah  $\lambda=0,4$  dan  $\omega=0,2$ . Penerapan peta kendali MEWMV fase 2 dalam mengontrol variabilitas proses produksi Pupuk NPK Pelangi Fusion khususnya variabel Nitrogen, Phospat, dan Kalium diperoleh hasil proses terkendali. Penerapan peta kendali MEWMA fase 1 diperoleh nilai perubahan rata-rata  $\delta = 0,2697$ , sehingga diperoleh pembobot yang optimal adalah  $\lambda = 0,06$ . Pada penerapan peta kendali MEWMA fase 2 dalam mengontrol rata-rata proses produksi Pupuk NPK Pelangi Fusion khususnya variabel Nitrogen, Phospat, dan Kalium didapatkan kesimpulan bahwa rata-rata proses secara multivariat terkendali.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aparisi, F. & Garciaz-Diaz, J. C., 2004. Optimization of univariate and multivariate exponentially weighted moving-average control charts using genetic algorithm. *Computers & Operations Research*, Vol. 31, Hal: 1437–1454.
- Gasperz, V. & Fontana, A., 2011. *Lean Six Sigma for Manufacturing and Services*. Bogor: Vinchirsto Publication.
- Heizer, J. & Render, B., 2008. *Operations Management*. Jakarta: Salemba Empat.
- Huwang, L., Yeh, A. B. & Wu, C.-W., 2007. Monitoring Multivariate Process Variability for Individual Observations. *Journal of Quality Technology*, Vol. 39, Hal: 258-278.
- Johnson, R. A. & Wichern, D. W., 2007. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Montgomery, D. C., 2009. *Introduction to Statistical Quality Control, Sixth Edition*. New Jersey: Wiley.
- Morrison, D. F., 1990. *Multivariate Statistical Methods*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Mudassir, R., 2022. *Di Balik Rencana IPO Pupuk Kaltim dan Bidikan Tiga Pabrik Baru*. Tersedia: <https://bisnisindonesia.id/article/di-balik-rencana-ipo-pupuk-kaltim-dan-bidikan-tiga-pabrik-baru> (diakses pada tanggal 29 Maret 2023).
- Prabhu, S. S. & Runger, G. C., 1997. Designing a multivariate EWMA control chart. *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, No. 1, Hal: 8-15.
- PT Pupuk Kalimantan Timur, 2021. *Laporan Tahunan 2021*, Bontang: PT Pupuk Kalimantan Timur.
- PT Pupuk Kalimantan Timur, 2022. *Laporan Tahunan 2022*, Bontang: PT Pupuk Kalimantan Timur.
- Raissi, S., 2009. Multivariate process capability indices on the presence of priority for quality characteristics. *Journal of Industrial Engineering International*, Vol. 5, No. 9, Hal: 27-36.
- Woodall, W. H. & Montgomery, W. H., 1999. Research Issues and Ideas in Statistical Process Control. *Journal of Quality Technology*, Vol. 31, No. 4, Hal: 376-386.