

Pengendalian Kualitas Proses Produksi Kaca Sunergy dengan Diagram Kendali *Multivariat Short Runs*

Wilda Melia Udiatami dan Wibawati

Departemen Statistika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: wibawati@statistika.its.ac.id

Abstrak—PT Asahimas Flat Glass Tbk Sidoarjo merupakan salah satu perusahaan manufaktur di Indonesia yang bergerak dalam bidang kaca dan berfokus pada produksi kaca lembaran eksterior. Kaca sunergy menjadi salah satu produk unggulan. Pada proses produksi kaca sunergy, hasil potongan kaca adalah aspek yang sangat diperhatikan, dimana terdapat dua karakteristik kualitas yang diukur yaitu edge distortion dan cutter line. Produk kaca ini memiliki variasi yang tinggi yaitu ketebalan yang berbeda-beda sesuai permintaan konsumen, sehingga setiap jenis ketebalan memiliki volume produksi yang rendah. Kondisi demikian disebut short runs production. Pengendalian kualitas yang dilakukan oleh perusahaan hanya dengan membuat trend grafik untuk mengetahui sesuai atau tidaknya produk dalam range standard. Pada penelitian ini dilakukan pengendalian kualitas proses produksi kaca sunergy dengan menerapkan diagram kendali multivariat short runs untuk monitoring rata-rata proses. Data penelitian dibagi menjadi dua fase, yaitu 20 subgrup fase I dan 20 subgrup fase II. Hasil monitoring me-nunjukkan bahwa rata-rata proses fase I dengan empat pengujian telah terkendali secara statistik. Sedangkan pada fase II, rata-rata proses belum terkendali. Hal ini mengindikasikan terjadinya pergeseran. Selain itu, analisis kapabilitas proses secara multivariat menunjukkan proses produksi belum kapabel.

Kata Kunci—Cutter Line, Diagram Kendali Multivariat Short Runs, Edge Distortion, Kaca Sunergy, Kapabilitas.

I. PENDAHULUAN

PESATNYA perkembangan sektor industri di Indonesia menjadikan sektor industri sebagai kontributor terbesar bagi perekonomian nasional. Salah satunya adalah sektor industri manufaktur kaca. Kaca merupakan salah satu bagian dari bangunan yang biasa digunakan sebagai interior maupun eksterior. Permintaan kaca lembaran dunia tumbuh sekitar 6,6 persen per tahun. Pada 2018, tercatat sebesar 10 miliar meter persegi atau senilai kurang lebih USD102 miliar, yang diperkirakan 50% permintaan dunia ada di wilayah Asia-Pasifik. Hal ini membuat potensi ekspor dapat naik sekitar 30-40%.

PT Asahimas Flat Glass Tbk Sidoarjo merupakan salah satu perusahaan manufaktur di Indonesia yang bergerak dalam bidang kaca dan berfokus pada kaca lembaran eksterior. Kon-tribusi ekspor kaca produksi perusahaan tersebut terhadap kaca produksi nasional yakni sebesar 50%. Kaca sunergy adalah salah satu produk unggulan dari PT Asahimas Flat Glass Tbk Sidoarjo. Proses produksi kaca sunergy memiliki variasi tinggi yaitu kaca sunergy yang diproduksi memiliki ketebalan berbeda-beda sesuai dengan permintaan konsumen. Ketebalan kaca yang berbeda-beda, menyebabkan setiap jenis ketebalan memiliki volume produksi yang rendah atau dengan kata lain memiliki jumlah produk yang sedikit yaitu kurang dari 50. Adapun jenis

ketebalan yang memiliki permintaan terbanyak adalah ketebalan 6 mm. Kondisi demikian disebut kondisi short runs production [1].

Proses produksi kaca sunergy sangat memperhatikan aspek hasil potongan kaca agar kaca dapat terpasang secara pas pada bingkai kaca (jendela maupun dinding), yang diperiksa berdasarkan karakteristik kualitas edge distortion dan cutter line. Pengendalian kualitas yang dilakukan perusahaan hanya dengan membuat trend grafik untuk mengetahui sesuai atau tidaknya produk dalam range standard. Pada penelitian ini, dilakukan pengendalian kualitas dengan menerapkan diagram kendali multivariat short runs terhadap hasil potongan kaca sunergy dengan ketebalan 6 mm sehingga dapat diketahui terkendali atau tidaknya rata-rata proses produksi secara statistik. Metode yang digunakan adalah diagram kendali yang diusulkan oleh Khoo dan Quah untuk monitoring rata-rata proses [1]. Selanjutnya, dilakukan analisis kapabilitas proses untuk mengetahui kapabel tidaknya proses produksi tersebut. Hasil dari penelitian ini, diharapkan dapat memberikan informasi bagi perusahaan dalam upaya menjaga dan meningkatkan kualitas produksi kaca sunergy.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Uji Bartlett

Uji Bartlett dilakukan untuk mengetahui hubungan (korelasi) antar variabel kualitas dalam kasus multivariat. Variabel x_1, x_2, \dots, x_p dikatakan bersifat saling bebas (independen) apabila matriks korelasi antar p variabel membentuk matriks identitas. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

$H_0: \rho = I$ (Antar variabel saling independen)

$H_1: \rho \neq I$ (Antar variabel saling dependen).

Statistik uji:

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

Keterangan:

N = jumlah keseluruhan observasi

p = jumlah variabel atau karakteristik kualitas

R = matriks korelasi antar p variabel

$|R|$ = determinan matriks korelasi.

Keputusan tolak H_0 apabila $\chi_{hitung}^2 > \chi_{(\alpha, p(p-1)/2)}^2$ pada taraf signifikansi α atau P-value $< \alpha$ yang berarti antar variabel kualitas bersifat tidak saling bebas atau terdapat hubungan antar variabel [2].

B. Uji Distribusi Normal Multivariat

Pengujian distribusi normal multivariat dilakukan untuk mengetahui variabel kualitas mengikuti distribusi normal

multivariat atau tidak. Pengujian distribusi normal multivariat pada umumnya digunakan uji Shapiro-Wilk [3]. Hipotesis yang digunakan sebagai berikut:
 H_0 : Data berdistribusi normal multivariat
 H_1 : Data tidak berdistribusi normal multivariat
 Statistik uji:

$$W^* = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p W_j,$$

dengan,

$$W_j = \frac{[\sum_{t=1}^N a_t x_{(t)}]^2}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2} \text{ dan } a' = \frac{M'B^{-1}}{(M'B^{-1}B^{-1}M)^{1/2}}.$$

Keterangan:

- W_j = statistik Shapiro-Wilk dari karakteristik kualitas ke-j
- a_t = elemen ke-t dari vektor a' , dimana $a' = [a_1, \dots, a_N]$
- $x_{(t)}$ = observasi terurut, dimana $x_{(1)} < x_{(2)} < \dots < x_{(N)}$
- M = vektor nilai harapan statistik terurut normal standard
- $M = [M_1, M_2, \dots, M_N]'$
- B = matriks varian-kovarian $N \times N$
- j = karakteristik kualitas ($j = 1, 2, \dots, p$)
- N = jumlah keseluruhan observasi
- p = jumlah karakteristik kualitas.

Keputusan gagal tolak H_0 jika nilai W^* mendekati 1 atau $P\text{-value} > \alpha$ pada tingkat signifikansi α yang artinya data mengikuti distribusi normal multivariat [4].

C. Diagram Kendali Multivariat Short Runs untuk Monitoring Rata-Rata Proses

Urutan observasi multivariat untuk setiap subgrup adalah saling independen dan identik berdistribusi normal multivariat, $N_p(\mu, \Sigma)$ dimana $p (\geq 2)$ adalah jumlah karakteristik kualitas yang dimonitor secara simultan dan $X_{i,k}$ adalah observasi normal multivariat dari subgrup ke-i pada sampel ke-k (dengan $i = 1, 2, \dots, m$ dan $k = 1, 2, \dots, n$), maka $X_{i,k} = (X_{i,1,k}, X_{i,2,k}, \dots, X_{i,p,k})'$ dimana $X_{i,j,k}$ adalah univariat observasi pada karakteristik kualitas ke-j (dengan $j = 1, 2, \dots, p$) untuk vektor $X_{i,k}$. Diasumsikan bahwa semua subgrup memiliki ukuran subgrup yang sama, maka $n_1 = n_2 = \dots = n_m = n$. Estimasi vektor mean untuk subgrup ke-i didefinisikan sebagai $\bar{X}_i = (1/n) \sum_{k=1}^n X_{i,k}$. Kemudian vektor grand mean diestimasi dari i subgrup pertama dengan rumus $\bar{X}_i = (1/i) \sum_{u=1}^i \bar{X}_u$. Selanjutnya estimasi matriks varian-kovarian pada subgrup ke-i dinotasikan sebagai S_i dengan ukuran matriks $p \times p$. Monitoring pergeseran vektor mean μ dibagi menjadi empat kasus yaitu μ dan Σ diketahui (known), μ tidak diketahui (unknown) dan Σ diketahui (known), μ diketahui (known) dan Σ tidak diketahui (unknown), serta μ dan Σ tidak diketahui (unknown) [1].

1) Kasus KK/Known-Known ($\mu = \mu_0, \Sigma = \Sigma_0$, Keduanya Diketahui)

Sebelumnya perlu dilakukan perhitungan nilai statistik T^2 -hotelling atau dinotasikan $T_{a_i}^2$ untuk masing-masing subgrup (dengan $T_{a_i}^2 \sim \chi_p^2$, dimana $i = 1, 2, \dots, m$), berdasarkan rumus pada persamaan (1) berikut:

$$T_{a_i}^2 = n(\bar{X}_i - \mu_0)' \Sigma_0^{-1} (\bar{X}_i - \mu_0), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

Selanjutnya nilai $T_{a_i}^2$ yang diperoleh pada persamaan (1) di-substitusikan ke persamaan (2) yang disebut statistik V_a .

$$V_{a_i} = \Phi^{-1}\{H_p(T_{a_i}^2)\}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Keterangan:

- Φ = Fungsi distribusi kumulatif normal standar.
- Φ^{-1} = Invers dari fungsi distribusi kumulatif normal standar.
- H_p = Fungsi distribusi chi-squared dengan derajat bebas p .

2) Kasus UK/Unknown-Known (μ Tidak Diketahui, $\Sigma = \Sigma_0$ Diketahui)

Sebelumnya perlu dilakukan perhitungan nilai statistik T^2 -hotelling atau dinotasikan $T_{b_i}^2$ untuk masing-masing subgrup (dengan $T_{b_i}^2 \sim \frac{i}{i-1} \chi_p^2$, dimana $i = 2, 3, \dots, m$), berdasarkan rumus pada persamaan (3) sebagai berikut.

$$T_{b_i}^2 = n(\bar{X}_i - \bar{X}_{i-1})' \Sigma_0^{-1} (\bar{X}_i - \bar{X}_{i-1}) \quad (3)$$

Kemudian nilai $T_{b_i}^2$ yang diperoleh pada persamaan (3) di-substitusikan ke persamaan (4) yang disebut statistik V_b .

$$V_{b_i} = \Phi^{-1}\left\{H_p\left[\left(\frac{i-1}{i}\right)T_{b_i}^2\right]\right\} \quad (4)$$

Keterangan:

- Φ = Fungsi distribusi kumulatif normal standar.
- Φ^{-1} = Invers dari fungsi distribusi kumulatif normal standar.
- H_p = Fungsi kumulatif chi-squared dengan derajat bebas p .

3) Kasus KU/Unknown-Known ($\mu = \mu_0$ Diketahui, Σ Tidak Diketahui)

Sebelumnya perlu dilakukan perhitungan nilai statistik T^2 -hotelling atau dinotasikan $T_{c_i}^2$ untuk masing-masing subgrup (dengan $T_{c_i}^2 \sim \frac{np(i-1)}{n(i-1)-p+1} F_{p,n(i-1)-p+1}$, dimana $i = u, u+1, \dots, m$), berdasarkan rumus pada persamaan (5) sebagai berikut.

$$T_{c_i}^2 = n(\bar{X}_i - \mu_0)' S_{0,i-1}^{-1} (\bar{X}_i - \mu_0) \quad (5)$$

dimana estimator pooled unbiased Σ dari $i-1$ subgrup pertama adalah

$$\begin{aligned} S_{0,i-1} &= \frac{1}{n_1 + \dots + n_{i-1}} (n_1 S_1 + n_2 S_2 + \dots + n_{i-1} S_{i-1}) \\ &= \frac{n}{n(i-1)} (S_1 + S_2 + \dots + S_{i-1}); \quad n_1 = n_2 = \dots = n_{i-1} = n \\ &= \frac{1}{i-1} (S_1 + S_2 + \dots + S_{i-1}) \end{aligned}$$

dan estimator unbiased Σ untuk subgrup i adalah

$$S_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_{i,k} - \mu_0)(X_{i,k} - \mu_0)'$$

Selanjutnya nilai $T_{c_i}^2$ yang diperoleh pada persamaan (5) di-substitusikan ke persamaan (6) yang disebut statistik V_c .

$$V_{c_i} = \Phi^{-1}\left\{F_{p,n(i-1)-p+1}\left[\left(\frac{n(i-1)-p+1}{np(i-1)}\right)T_{c_i}^2\right]\right\} \quad (6)$$

dimana

$$u = \left\| \frac{p-1}{n} + 1 \right\|. \quad (7)$$

Keterangan:

- Φ = Fungsi distribusi kumulatif normal standar.
- Φ^{-1} = Invers dari fungsi distribusi kumulatif normal standar.
- $F_{p,n(i-1)-p+1}$ = Fungsi distribusi kumulatif Snedecor-F

dengan derajat bebas $(p, n(i - 1) - p + 1)$.

4) Kasus UU/Unknown-Unknown (μ dan Σ Tidak Diketahui)

Sebelumnya perlu dilakukan perhitungan nilai statistik T^2 -hotelling atau dinotasikan $T_{d_i}^2$ untuk masing-masing subgrup (dengan $T_{d_i}^2 \sim \frac{ip(i-1)}{(i-1)(n-1)-p+1} F_{p,(i-1)(n-1)-p+1}$, dimana $i = y, y+1, \dots, m$), berdasarkan rumus pada persamaan (8) sebagai berikut.

$$T_{d_i}^2 = n(\bar{X}_i - \bar{X}_{i-1})' S_{p,i-1}^{-1} (\bar{X}_i - \bar{X}_{i-1}) \tag{8}$$

dimana estimator pooled unbiased Σ dari $i-1$ subgrup pertama adalah

$$S_{p,i-1} = \frac{1}{n_1 + \dots + n_{i-1} - (i-1)} [(n_1 - 1)S_1 + (n_2 - 1)S_2 + \dots + (n_{i-1} - 1)S_{i-1}]$$

$$= \frac{(n-1)}{(i-1)(n-1)} (S_1 + S_2 + \dots + S_{i-1});$$

$$n_1 = n_2 = \dots = n_{i-1} = n = \frac{1}{i-1} (S_1 + S_2 + \dots + S_{i-1})$$

dan estimator unbiased Σ untuk subgrup i adalah

$$S_i = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_{i,k} - \bar{X}_i)(X_{i,k} - \bar{X}_i)'$$

Kemudian nilai $T_{d_i}^2$ yang diperoleh pada persamaan (8) disubstitusikan ke dalam persamaan (9) yang disebut dengan statistik V_d .

$$V_{d_i} = \Phi^{-1} \left\{ F_{p,(i-1)(n-1)-p+1} \left[\left(\frac{(i-1)(n-1)-p+1}{ip(n-1)} \right) T_{d_i}^2 \right] \right\}, \tag{9}$$

dengan $i = y, y+1, \dots, m$,

dimana,

$$y = \left\lfloor \frac{p-1}{n-1} + 1 \right\rfloor. \tag{10}$$

Keterangan:

- Φ = Fungsi distribusi kumulatif normal standar.
- Φ^{-1} = Invers dari fungsi distribusi kumulatif normal standar.

$F_{p,(i-1)(n-1)-p+1}$ = Fungsi distribusi kumulatif Snedecor-F dengan derajat bebas $(p, (i - 1)(n - 1) - p + 1)$.

Dengan catatan bahwa $\lfloor a \rfloor$ pada persamaan (7) dan (10) dinotasikan integer terkecil yang lebih besar dari a . Statistik V pada persamaan (2), (4), (6) dan (9) merupakan urutan variabel acak berdistribusi $N(0,1)$, mengasumsikan bahwa distribusi proses in-control dengan distribusi normal multivariat.

Selanjutnya urutan statistik V yaitu V_a, V_{a+1}, \dots, V_m , dimana V_m dinotasikan sebagai statistik V (diantaranya V_a, V_b, V_c , atau V_d) diagram kendali pada subgrup m . Untuk mendeteksi pergeseran pada vektor mean μ (rata-rata proses) maka dilakukan tiga pengujian yang didefinisikan sebagai berikut.

1. Uji 1-dari-1 (The 1-of-1 Test): ketika V_m diplot, uji ini memberi sinyal pergeseran (shift) dalam μ jika $V_m > 3\sigma$ ($= 3$).
2. Uji 3-dari-3 (The 3-of-3 Test): ketika V_m diplot, uji ini memberi sinyal pergeseran (shift) dalam μ jika V_m, V_{m-1} , dan V_{m-2} semua melebihi 1σ ($= 1$). Selain itu, uji ini

hanya dapat digunakan ketika tiga statistik V berturut-turut tersedia [5].

3. Uji 4-dari-5 (The 4-of-5 test): ketika V_m diplot, uji ini memberi sinyal pergeseran (shift) dalam μ jika minimal empat dari lima nilai $V_m, V_{m-1}, \dots, V_{m-4}$ melebihi 1σ ($= 1$). Selain itu, uji ini hanya dapat digunakan ketika lima statistik V berturut-turut tersedia [6].

Selain tiga pengujian di atas, terdapat EWMA (exponentially weighted moving average) test yang dihitung dari statistik V secara berurutan. Statistik EWMA (Z_i) didefinisikan sebagai berikut.

$$Z_i = \lambda V_i + (1 - \lambda)Z_{i-1}, \text{ dengan } i = 1, 2, \dots, m, \tag{11}$$

dimana $Z_0 = 0$. Untuk urutan statistik V_i dengan $i = a, a + 1, \dots, m$ dimana $a > 1$, urutan statistik Z_i yang sesuai akan diperoleh dengan menempatkan $Z_{a-1} = 0$. Statistik EWMA akan diplot pada diagram dengan UCL = $L\sqrt{\lambda/(2 - \lambda)}$ [5].

D. Analisis Kapabilitas Proses

Kapabilitas proses merupakan ukuran kinerja kritis yang menunjukkan proses mampu menghasilkan produk sesuai dengan spesifikasi perusahaan [7]. Indeks kapabilitas yang disarankan oleh Automotive Industry Action Group (AIAG) adalah menggunakan indeks C_p dan C_{pk} ketika proses dalam kondisi in control. Menurut hasil penelitian Juhaszova, indeks kapabilitas ini dapat diaplikasikan pada proses produksi short runs [8]. Indeks C_{pk} merupakan perbaikan dari C_p . Berikut merupakan rumus untuk menghitung indeks kapabilitas proses C_p .

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}. \tag{12}$$

Keterangan:

- USL = Batas spesifikasi atas
- LSL = Batas spesifikasi bawah

Untuk mengestimasi σ dapat digunakan standar deviasi sampel s . Sedangkan rumus untuk menghitung indeks kapabilitas proses C_{pk} maka digunakan rumus sebagai berikut.

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl}) = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right). \tag{13}$$

Keterangan:

- C_{pu} = Indeks kapabilitas proses atas
- C_{pl} = Indeks kapabilitas proses bawah

Apabila proses tidak dalam keadaan in control, maka digunakan indeks P_p dan P_{pk} untuk menghitung kapabilitas proses. Indeks P_p dan P_{pk} dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut [9].

$$P_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}, \tag{14}$$

$$P_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right), \tag{15}$$

dimana s merupakan nilai standar deviasi sampel untuk proses tidak terkontrol, yang dihitung dengan rumus sebagai berikut. Adapun perhitungan indeks C_p, C_{pk}, P_p , dan P_{pk} untuk data multivariat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$MC_p = \sum_{j=1}^p e_j C_p(X_j) \tag{16}$$

Tabel 1.
Variabel Penelitian

Variabel	Karakteristik Kualitas	Definisi Operasional	Batas Spesifikasi
X ₁	Edge distortion	Jarak dari bekas arroll yang menyebabkan distorsi sampai bagian kaca distorsi hilang	20 – 60 mm
X ₂	Cutter line	Jarak dari muncul edge terluar kaca sampai potongan netto produk kaca	80 – 150 mm

Tabel 2.
Struktur Data

Subgrup (i)	Karakteristik Kualitas (j)	
	X ₁	X ₂
1	X ₁₁₁	X ₁₂₁
	X ₁₁₂	X ₁₂₂
⋮	⋮	⋮
i	X _{i11}	X _{i21}
	X _{i12}	X _{i22}
⋮	⋮	⋮
m	X _{m11}	X _{m21}
	X _{m12}	X _{m22}
⋮	⋮	⋮

Keterangan:

X_{ijk} = sampel ke-k pada subgrup ke-i dan karakteristik kualitas ke-j.

X₁ = karakteristik kualitas edge distortion.

X₂ = karakteristik kualitas cutter line.

i = 1, 2, ..., m.

j = 1, 2, ..., p.

k = 1, 2, ..., n.

$$MC_{pk} = \sum_{j=1}^p e_j C_{pk}(X_j) \tag{17}$$

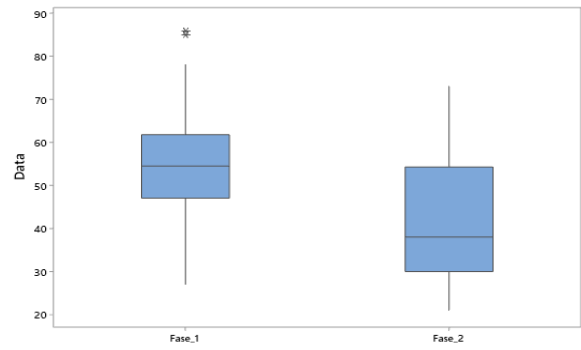
$$MP_p = \sum_{j=1}^p e_j P_p(X_j) \tag{18}$$

$$MP_{pk} = \sum_{j=1}^p e_j P_{pk}(X_j) \tag{19}$$

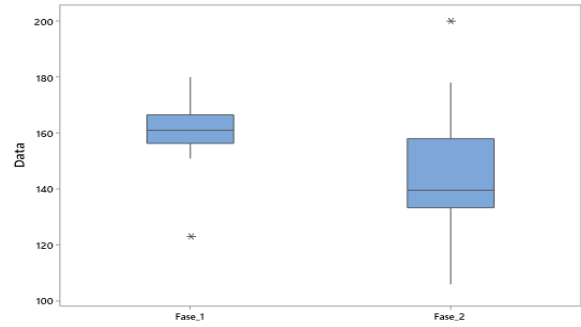
Indeks MC_p, MC_{pk}, MP_p, dan MP_{pk} berturut-turut merupakan indeks bentuk C_p, C_{pk}, P_p, dan P_{pk} dalam keadaan multivariat. e_j merupakan pembobot berdasarkan kepentingan dengan $\sum_{j=1}^p e_j = 1$. Nilai pembobot disesuaikan dengan pembobot dari masing-masing karakteristik kualitas yang ditentukan oleh perusahaan, jika tidak ada maka pembobot dianggap sama [10]. Berdasarkan standar 3-sigma, suatu proses dikatakan kapabel apabila memiliki indeks kapabilitas proses lebih dari 1 [8].

E. Proses Produksi Kaca

Jenis material yang digunakan untuk membuat kaca adalah soda lime silica glass yang dibentuk dengan 3 oksida utama yaitu oksida silica (silica oxyde), oksida soda (soda oxyde), dan oksida kapur (lime oxyde). Material-material tersebut dicampur menjadi adonan yang disebut batch. Pembuatan kaca terdiri dari enam tahap proses produksi, diantaranya proses batch mixing, melting, drawing, annealing and cooling, cutting and packing, dan proses quality control



Gambar 1. Boxplot karakteristik kualitas edge distortion fase I dan II.



Gambar 2. Boxplot karakteristik kualitas cutter line fase I dan II.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Sumber Data

Sumber data yang digunakan adalah data sekunder yang diperoleh dari departemen quality assurance di PT Asahimas Flat Glass Tbk Sidoarjo. Data yang digunakan adalah data pengukuran hasil potongan kaca sunergy dengan ketebalan 6 mm pada periode 2018 – 2020. Jumlah subgrup ada sebanyak 40 subgrup. Data penelitian dibagi menjadi dua fase, fase I terdiri dari 20 subgrup pertama dan fase II terdiri dari 20 subgrup terakhir. Pembagian fase dilakukan karena pada periode 10 April 2019 (subgrup ke-21) terjadi banyak defect (blur atau tanda titik-titik hujan pada kaca). Perusahaan menambah lebar kaca untuk menghilangkan defect tersebut. Sehingga mengakibatkan mulai subgrup ke-21 terjadi peningkatan variasi data. Pengambilan sampel dilakukan setelah proses cutting yaitu dengan mengambil sampel sebanyak 1 sampel per shift, dengan total shift per hari ada sebanyak 3 shift. Sampel tersebut kemudian diukur hasil potongan kaca berdasarkan karakteristik kualitas edge distortion dan cutter line dengan menggunakan alat roll meter.

B. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah edge distortion dan cutter line. Definisi dan batas spesifikasi dari masing-masing karakteristik kualitas dapat dilihat di Tabel 1.

C. Struktur Data

Struktur data yang digunakan dalam penelitian disajikan pada Tabel 2.

D. Langkah Analisis

Langkah-langkah analisis yang dilakukan untuk mencapai tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut.

Tabel 3.
Deskripsi Karakteristik Kualitas Fase I

Karakteristik Kualitas	Rataan	Var	Min	Max	CV	Batas
Edge distortion	55,3	152,6	27	86	22,3	20 – 60
Cutter line	161,4	67,9	123	180	5,1	80 – 150

Tabel 4.
Deskripsi Karakteristik Kualitas Fase II

Karakteristik Kualitas	Rataan	Var	Min	Max	CV	Batas
Edge distortion	42,38	186,75	21	73	32,24	20 – 60
Cutter line	143,48	369,88	106	200	13,40	80 – 150

Tabel 5.
Keputusan The 3-of-3 Test Fase I

Subgrup ke-(i)	Keputusan	Subgrup ke-(i)	Keputusan
1	-	11	In control
2	In control	12	In control
3	In control	13	Out of control
4	In control	14	Out of control
5	In control	15	Out of control
6	In control	16	In control
7	In control	17	In control
8	In control	18	In control
9	In control	19	In control
10	In control	20	In control

1. Mengidentifikasi masalah dan melakukan studi literatur.
2. Mengumpulkan data sekunder.
3. Melakukan analisis statistika deskriptif.
4. Melakukan pengujian Bartlett.
5. Melakukan pengujian distribusi normal multivariat dengan menggunakan uji Shapiro-Wilk.
6. Membagi data subgrup menjadi dua fase.
8. Membuat diagram kendali multivariat short runs untuk monitoring rata-rata proses berdasarkan kondisi ke-empat yaitu kedua parameter tidak diketahui.
9. Melakukan analisis kapabilitas proses.
10. Menarik kesimpulan dan saran.

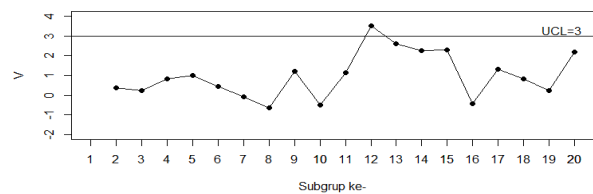
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Deskripsi Karakteristik Kualitas Produk Kaca Sunergy

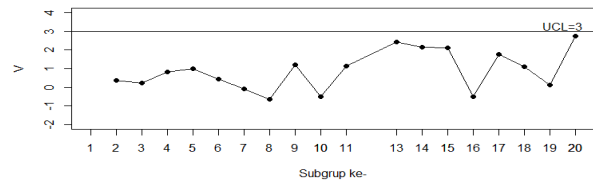
Salah satu cara dalam statistika deskriptif untuk menggambarkan secara grafik suatu data numerik adalah dengan menggunakan boxplot.

Gambar 1 dan Gambar 2 memberikan informasi rata-rata edge distortion dan cutter line pada fase I lebih tinggi dibandingkan pada fase II. Namun, persebaran data (varian) pada fase II lebih besar daripada fase I. Adapun hasil statistika deskriptif pada fase I ditunjukkan pada Tabel 3.

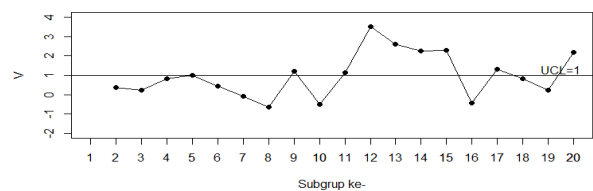
Tabel 3 memberikan informasi bahwa nilai maksimum edge distortion melebihi batas spesifikasi. Selain itu, rata-rata dan nilai maksimum cutter line pada fase I berada di luar batas spesifikasi perusahaan. Tabel 3 juga menunjukkan bahwa edge distortion memiliki nilai koefisien variasi yang lebih besar daripada nilai koefisien variasi dari cutter line. Hal ini mengindikasikan bahwa karakteristik kualitas edge distortion memiliki variasi yang lebih heterogen dibanding karakteristik kualitas cutter line. Statistika deskriptif dari masing-masing karakteristik kualitas pada fase II ditunjukkan pada Tabel 4.



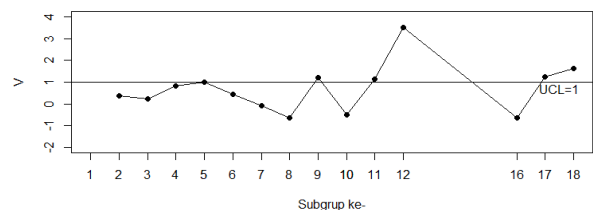
Gambar 3. Diagram kendali dengan the 1-of-1 test fase I.



Gambar 4. Diagram kendali dengan the 1-of-1 test fase I perbaikan pertama.



Gambar 5. Diagram kendali dengan the 3-of-3 test fase I.



Gambar 6. Diagram kendali dengan the 3-of-3 test fase I perbaikan kelima.

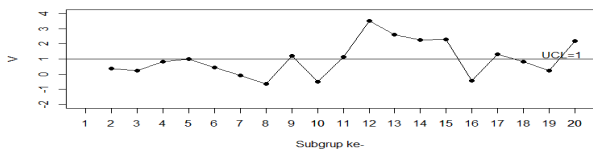
Tabel 4 memberikan informasi nilai maksimum edge distortion dan cutter line melebihi batas spesifikasi. Selain itu, edge distortion memiliki nilai koefisien variasi yang lebih besar daripada nilai koefisien variasi dari cutter line. Hal ini mengindikasikan bahwa karakteristik kualitas edge distortion memiliki variasi yang lebih heterogen dibanding karakteristik kualitas cutter line.

B. Pengujian Dependensi

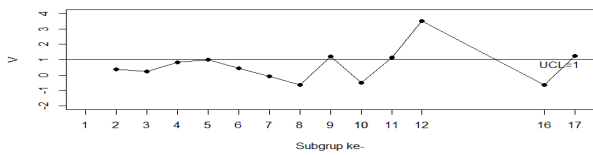
Uji asumsi dependensi dilakukan dengan menggunakan uji Bartlett yang memberikan nilai chi-square hitung (χ^2_{hitung}) sebesar 58,538 yang lebih besar dari nilai chi-square ($\chi^2_{0,05;1}$) yaitu sebesar 3,841. Hal ini menghasilkan keputusan tolak H_0 . Selain nilai chi-square, uji Bartlett juga menghasilkan p-value sebesar 0,000 yang lebih kecil dari taraf signifikansi 0,05 sehingga menunjukkan keputusan tolak H_0 . Hal ini mengartikan karakteristik kualitas edge distortion dan cutter line saling berhubungan atau saling dependen.

C. Pengujian Distribusi Normal Multivariat

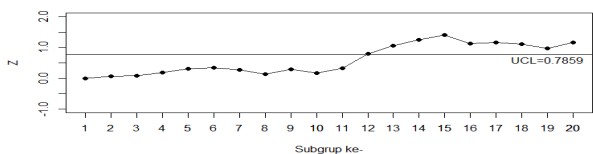
Uji asumsi distribusi normal multivariat dilakukan dengan menggunakan uji Shapiro-Wilk yang menghasilkan nilai W^* sebesar 0,979 yang mendekati nilai 1 pada taraf signifikansi (α) 0,05. Hal ini menunjukkan keputusan gagal tolak H_0 . Selain itu, juga dihasilkan p-value sebesar 0,061 yang menunjukkan p-value lebih besar dari taraf signifikansi 0,05. Hal ini memberikan keputusan gagal tolak H_0 yang berarti bahwa kedua karakteristik kualitas mengikuti distribusi normal multivariat.



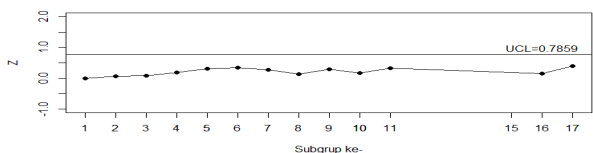
Gambar 11. Diagram kendali dengan the 4-of-5 test fase I.



Gambar 12. Diagram kendali dengan the 4-of-5 test fase I perbaikan ke-6.



Gambar 13. Diagram kendali dengan EWMA test fase I.



Gambar 14. Diagram kendali dengan EWMA test fase I perbaikan ketujuh.

D. Monitoring Rata-Rata Proses Fase I

Pengendalian kualitas untuk monitoring rata-rata proses produksi kaca sunergy fase I dilakukan dengan empat pengujian.

1) Diagram Kendali dengan the 1-of-1 Test Fase I

Diagram kendali multivariat short runs dengan pengujian the 1-of-1 test untuk monitoring rata-rata proses produksi kaca sunergy fase I dapat dilihat pada Gambar 3.

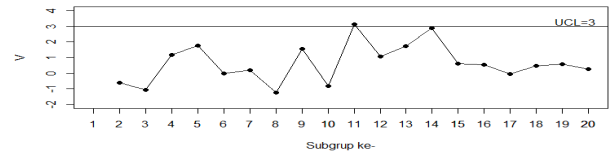
Gambar 3 menunjukkan bahwa menggunakan pengujian the 1-of-1 test, rata-rata proses masih belum terkontrol secara statistik. Perbaikan dilakukan dengan menghilangkan subgrup ke-12. Setelah dilakukan satu kali perbaikan serta mengidentifikasi penyebab out of control, diperoleh hasil diagram kendali seperti Gambar 4.

Hasil perbaikan pertama ditunjukkan dengan Gambar 4 yang memberikan informasi bahwa rata-rata proses produksi kaca sunergy fase I dengan pengujian the 1-of-1 test telah terkontrol secara statistik.

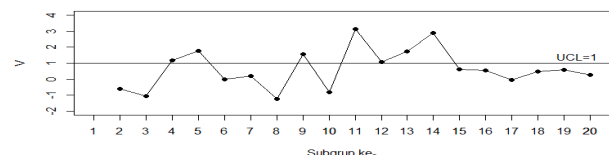
2) Diagram Kendali dengan the 3-of-3 Test Fase I

Diagram kendali multivariat short runs dengan pengujian the 3-of-3 test untuk monitoring rata-rata proses produksi kaca sunergy fase I disajikan pada Gambar 5. Keputusan titik subgrup keluar atau tidak dari batas kendali ditunjukkan dengan Tabel 5.

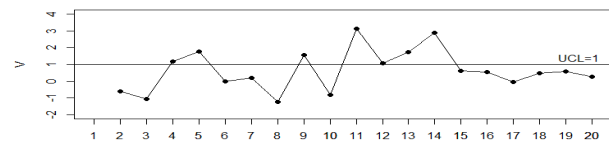
Berdasarkan keputusan pada Tabel 5, rata-rata proses produksi kaca sunergy fase I dengan pengujian the 3-of-3 test masih belum terkontrol secara statistik. Perbaikan dilakukan dengan menghilangkan subgrup yang keluar batas kendali. Setelah dilakukan lima kali perbaikan serta mengidentifikasi penyebab out of control, diperoleh hasil diagram kendali seperti pada Gambar 6. Keputusan titik subgrup pada Gambar 6 dinyatakan keluar atau tidak dari batas kendali ditunjukkan dengan Tabel 6.



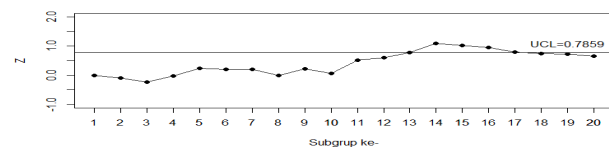
Gambar 7. Diagram kendali dengan the 1-of-1 test fase II.



Gambar 8. Diagram kendali dengan the 3-of-3 test fase II.



Gambar 9. Diagram kendali dengan the 4-of-5 test fase II.



Gambar 10. Diagram kendali dengan EWMA test fase II.

Keputusan yang ditunjukkan Tabel 6 mengartikan bahwa rata-rata proses produksi kaca sunergy fase I dengan pengujian the 3-of-3 test telah terkontrol secara statistik.

3) Diagram Kendali dengan the 4-of-5 test Fase I

Diagram kendali multivariat short runs dengan pengujian the 4-of-5 test untuk monitoring rata-rata proses produksi kaca sunergy fase I disajikan pada Gambar 7.

Keputusan pada Tabel 7 menyatakan titik subgrup tersebut keluar atau tidak dari batas kendali. Tabel 7 menunjukkan rata-rata proses produksi kaca sunergy fase I dengan pengujian the 4-of-5 test masih belum terkontrol secara statistik. Perbaikan dilakukan sebanyak enam dengan menghilangkan subgrup yang keluar batas kendali serta mengidentifikasi penyebab out of control, sehingga diperoleh diagram kendali seperti pada Gambar 8.

Keputusan titik subgrup dinyatakan keluar atau tidak dari batas kendali ditunjukkan pada Tabel 8. Keputusan menghasilkan bahwa rata-rata proses produksi kaca sunergy fase I dengan pengujian the 4-of-5 test telah terkontrol secara statistik.

4) Diagram Kendali dengan EWMA Test Fase I

Pemilihan dilakukan dengan menggunakan beberapa nilai L berdasarkan pada buku Montgomery dan paper Crowder [9], [11]. Nilai pembobot yang dicobakan yaitu $0,05 \leq \lambda \leq 0,9$. Pemilihan diperoleh nilai $L = 2,76$ dan $\lambda = 0,15$, yang menghasilkan jumlah titik out of control terbanyak dan menghasilkan selisih terkecil. Diagram kendali EWMA fase I ditunjukkan pada Gambar 9.

Gambar 9 menunjukkan bahwa terdapat trend naik dan rata-rata proses produksi kaca sunergy fase I dengan pengujian EWMA test masih belum terkontrol secara statistik. Kemudian dilakukan perbaikan sebanyak tujuh kali sehingga diperoleh hasil pada Gambar 10.

Hasil diagram kendali pada Gambar 10 mengartikan rata-

Tabel 10.

Keputusan *The 3-of-3 Test* Fase I Perbaikan Kelima

Subgrup ke- (i)	Keputusan	Subgrup ke- (i)	Keputusan
1	-	9	<i>In control</i>
2	<i>In control</i>	10	<i>In control</i>
3	<i>In control</i>	11	<i>In control</i>
4	<i>In control</i>	12	<i>In control</i>
5	<i>In control</i>	16	<i>In control</i>
6	<i>In control</i>	17	<i>In control</i>
7	<i>In control</i>	18	<i>In control</i>
8	<i>In control</i>		

Tabel 11.

Keputusan *The-4-of-5 Test* Fase I

Subgrup ke- (i)	Keputusan	Subgrup ke- (i)	Keputusan
1	-	11	<i>In control</i>
2	<i>In control</i>	12	<i>In control</i>
3	<i>In control</i>	13	<i>Out of control</i>
4	<i>In control</i>	14	<i>Out of control</i>
5	<i>In control</i>	15	<i>Out of control</i>
6	<i>In control</i>	16	<i>Out of control</i>
7	<i>In control</i>	17	<i>Out of control</i>
8	<i>In control</i>	18	<i>In control</i>
9	<i>In control</i>	19	<i>In control</i>
10	<i>In control</i>	20	<i>In control</i>

Tabel 12.

Keputusan *The 4-of-5 test* Fase I Perbaikan Keenam

Subgrup ke- (i)	Keputusan	Subgrup ke- (i)	Keputusan
1	-	8	<i>In control</i>
2	<i>In control</i>	9	<i>In control</i>
3	<i>In control</i>	10	<i>In control</i>
4	<i>In control</i>	11	<i>In control</i>
5	<i>In control</i>	12	<i>In control</i>
6	<i>In control</i>	16	<i>In control</i>
7	<i>In control</i>	17	<i>In control</i>

rata proses produksi kaca sunergy fase I dengan pengujian EWMA test telah terkendali secara statistik.

E. Monitoring Rata-Rata Proses Fase II

Langkah-langkah dalam membuat diagram kendali rata-rata proses fase II sama seperti pada fase I. Nilai statistik V yang telah diperoleh, selanjutnya diplotkan pada diagram kendali menggunakan empat pengujian sebagai berikut:

1) *Diagram Kendali dengan the 1-of-1 Test* Fase II

Diagram kendali multivariat short runs dengan pengujian the 1-of-1 test untuk monitoring rata-rata proses produksi kaca sunergy fase II ditunjukkan Gambar 11.

Gambar 11 memberikan informasi bahwa rata-rata proses produksi kaca sunergy fase II dengan pengujian the 1-of-1 test belum terkendali secara statistik. Selain itu, mengindikasikan telah terjadi pergeseran rata-rata proses pada fase II. Ber-dasarkan visual, rata-rata proses produksi kaca sunergy pada fase II cenderung lebih kecil daripada fase I.

2) *Diagram Kendali dengan the 3-of-3 Test* Fase II

Diagram kendali multivariat short runs dengan pengujian the 3-of-3 test untuk monitoring rata-rata proses produksi kaca sunergy fase II ditunjukkan pada Gambar 12.

Keputusan titik subgrup keluar atau tidak dari batas kendali ditunjukkan dengan Tabel 9. Keputusan pada Tabel 9 mengartikan rata-rata proses produksi kaca sunergy fase II dengan the 3-of-3 test belum terkontrol secara statistik. Selain itu, mengindikasikan telah terjadi pergeseran rata-rata proses pada fase II. Secara visual, rata-rata proses produksi kaca

Tabel 6.

Keputusan *The 3-of-3 Test* Fase II

Subgrup ke- (i)	Keputusan	Subgrup ke- (i)	Keputusan
1	-	11	<i>In control</i>
2	<i>In control</i>	12	<i>In control</i>
3	<i>In control</i>	13	<i>Out of control</i>
4	<i>In control</i>	14	<i>Out of control</i>
5	<i>In control</i>	15	<i>In control</i>
6	<i>In control</i>	16	<i>In control</i>
7	<i>In control</i>	17	<i>In control</i>
8	<i>In control</i>	18	<i>In control</i>
9	<i>In control</i>	19	<i>In control</i>
10	<i>In control</i>	20	<i>In control</i>

Tabel 7.

Keputusan *The 3-of-3 Test* Fase II

Subgrup ke- (i)	Keputusan	Subgrup ke- (i)	Keputusan
1	-	11	<i>In control</i>
2	<i>In control</i>	12	<i>In control</i>
3	<i>In control</i>	13	<i>Out of control</i>
4	<i>In control</i>	14	<i>Out of control</i>
5	<i>In control</i>	15	<i>Out of control</i>
6	<i>In control</i>	16	<i>In control</i>
7	<i>In control</i>	17	<i>In control</i>
8	<i>In control</i>	18	<i>In control</i>
9	<i>In control</i>	19	<i>In control</i>
10	<i>In control</i>	20	<i>In control</i>

Tabel 8.

Indeks Kapabilitas Proses Secara Univariat

Karakteristik Kualitas	P _p	P _{pk}
Edge distortion	0,49	0,43
Cutter line	0,61	0,11

Tabel 9.

Indeks Kapabilitas Proses Secara Multivariat

Karakteristik Kualitas	Bobot	MP _p	MP _{pk}
Edge distortion	0,50	0,55	0,27
Cutter line	0,50		

sunergy pada fase II cenderung lebih kecil daripada fase I.

3) *Diagram Kendali dengan the 4-of-5 test* Fase II

Diagram kendali multivariat short runs dengan pengujian the 4-of-5 test untuk monitoring rata-rata proses produksi kaca sunergy fase II disajikan pada Gambar 13. Keputusan titik subgrup keluar atau tidak dari batas kendali ditunjukkan dengan Tabel 10. Tabel 10 menunjukkan rata-rata proses produksi kaca sunergy fase II dengan the 4-of-5 test belum terkontrol secara statistik. Selain itu, telah terjadi pergeseran rata-rata proses pada fase II. Apabila dilihat secara visual, rata-rata proses produksi kaca sunergy fase II cenderung lebih kecil daripada fase I.

4) *Diagram Kendali dengan EWMA Test* Fase II

Diagram kendali dengan EWMA test fase II menggunakan batas kendali UCL yang dihasilkan dari pemilihan L dan λ fase I. Hasil diagram kendali EWMA fase II ditunjukkan Gambar 14. Gambar 14 menunjukkan bahwa rata-rata proses produksi kaca sunergy fase II dengan EWMA test belum terkendali secara statistik. Selain itu, terjadi pergeseran rata-rata proses pada fase II. Secara visual rata-rata proses produksi kaca sunergy pada fase II cenderung lebih kecil daripada fase I.

Diagram kendali rata-rata proses fase II yang belum stabil disebabkan oleh faktor manusia dan mesin.

F. Analisis Kapabilitas Proses

Analisis kapabilitas proses dilakukan dengan menggunakan indeks kapabilitas P_p dan P_{pk} . Hasil indeks kapabilitas ditunjukkan pada Tabel 11.

Selanjutnya dilakukan perhitungan indeks kapabilitas secara multivariat dengan menggunakan indeks MP_p dan MP_{pk} sesuai persamaan (25) dan (26). Adapun hasil indeks kapabilitas secara multivariat ditunjukkan dengan Tabel 12.

Tabel 12 menunjukkan nilai indeks kapabilitas proses secara multivariat MP_p dan MP_{pk} bernilai kurang dari 1. Hal ini mengartikan bahwa tingkat presisi dan akurasi kualitas produk kaca sunergy masih rendah. Sehingga dapat dikatakan kinerja proses produksi kaca sunergy belum kapabel.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini yaitu analisis statistika deskriptif menunjukkan pada kedua karakteristik kualitas terdapat pengamatan yang berada di luar batas spesifikasi perusahaan. Karakteristik kualitas edge distortion memiliki variasi yang lebih heterogen dibanding karakteristik kualitas cutter line. Selain itu, data pada fase II memiliki varian yang lebih besar daripada fase I. Sebaliknya rata-rata data pada fase I lebih tinggi daripada fase II. Hasil monitoring rata-rata proses produksi kaca sunergy fase I dengan menggunakan empat pengujian telah terkendali secara statistik setelah melalui beberapa kali perbaikan. Sedangkan, pada fase II dengan masing-masing pengujian belum terkendali secara statistik. Pada fase II terindikasi ada pergeseran rata-rata proses. Rata-rata proses fase II cenderung lebih kecil daripada fase I. Rata-rata proses pada fase II yang belum stabil disebabkan oleh dua faktor, yaitu faktor manusia dan mesin. Adapun analisis kapabilitas proses secara multivariat diperoleh hasil tingkat presisi dan akurasi kualitas produk kaca sunergy masih rendah. Sehingga dapat disimpulkan kinerja proses produksi kaca sunergy belum

kapabel.

Saran yang dapat diberikan bagi perusahaan, untuk meminimalisir ketidakstabilan rata-rata proses, perusahaan dapat memberikan pelatihan kepada operator khususnya terkait pengoperasian mesin. Selain itu, perusahaan dapat melakukan pengecekan berkala dan pengawasan terhadap operasi mesin agar pengoperasian dan setting temperatur tepat dan sesuai. Sedangkan saran bagi penelitian selanjutnya, diharapkan lebih teliti dalam memeriksa kualitas data yang digunakan. Hal ini bertujuan agar hasil analisis yang didapatkan bisa lebih representatif untuk menggambarkan proses produksi dari perusahaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. B. C. Khoo and S. H. Quah, "Proposed short runs multivariate control charts for the process mean," *Qual. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 603–621, 2002.
- [2] M. S. Bartlett, "Tests of significance in factor analysis," *Br. J. Stat. Psychol.*, vol. 3, no. 2, pp. 77–85, 1950.
- [3] N. M. Razali, Y. B. Wah, and others, "Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests," *J. Stat. Model. Anal.*, vol. 2, no. 1, pp. 21–33, 2011.
- [4] J. A. Villasenor Alva and E. G. Estrada, "A generalization of Shapiro-Wilk's test for multivariate normality," *Commun. Stat. Methods*, vol. 38, no. 11, pp. 1870–1883, 2009.
- [5] C. P. Quesenberry, "On properties of Q charts for variables," *J. Qual. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 184–203, 1995.
- [6] L. S. Nelson, "The Shewhart control chart—tests for special causes," *J. Qual. Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 237–239, 1984.
- [7] V. Gaspersz, *Pedoman Implementasi Program Six Sigma Terintegrasi dengan ISO 9001: 2000, MBNQA, dan HACCP*, 1st ed. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 2002.
- [8] D. Juhaszova, "Short run production process capability analysis in machine production," *Int. J. Manag. Econ. Invent.*, vol. 5, no. 4, pp. 2058–2063, 2018.
- [9] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, 6th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [10] S. Raeisi, "Multivariate process capability indices on the presence of priority for quality characteristics," *J. Ind. Eng. Int.*, vol. 5, no. 9, pp. 27–36, 2009.
- [11] S. V. Crowder, "Design of exponentially weighted moving average schemes," *J. Qual. Technol.*, vol. 21, no. 3, pp. 155–162, 1989.