

KAPABILITAS PROSES PRODUKSI KACA SUNERGY MENGGUNAKAN PETA KENDALI MULTIVARIAT SHORT RUNS DI PT ASAHIMAS FLAT GLASS TBK

Veronica Amelya Putri

Program Studi Statistika Bisnis, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia
e-mail : veronicaamelya00@gmail.com*

Nimas Ayu Prabawani

Program Studi Statistika Bisnis, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia
e-mail : nimasayuprabawani@its.ac.id

Sri Mumpuni Retnaningsih

Program Studi Statistika Bisnis, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia
e-mail : mumpuni@statistika.ac.id

Abstrak

Kebutuhan akan efisiensi energi dan aspek estetika pada bangunan modern terus mengalami peningkatan seiring berkembangnya industri manufaktur kaca. Salah satu jenis kaca yang banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah kaca *low-emissivity (low-E)*. PT Asahimas Flat Glass Tbk, sebagai salah satu perusahaan industri kaca terbesar di Indonesia, turut berperan dalam menyediakan solusi tersebut melalui produk unggulannya, yaitu kaca *Sunergy SNFL 6 mm*, yang dirancang khusus untuk bangunan modern. Konsistensi produk agar memenuhi standar kualitas yang ketat menjadi tantangan tersendiri bagi perusahaan sementara perusahaan belum menerapkan pengendalian kualitas yang mampu mendeteksi variasi secara bersamaan dalam waktu periode produksi yang terbatas. Pengendalian kualitas yang dapat dilakukan untuk menganalisis beberapa karakteristik kualitas yang saling dependen adalah *Multivariate Coefficient of Variation (MCV)* dan *Multivariat Short Run*, diagram Ishikawa, dan FMEA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses produksi kapabel secara statistik, tetapi masih terdapat ketidaksesuaian disebabkan oleh ketidaktepatan operator saat *setting* parameter mesin, performa mesin, *spray coating* tidak sesuai, bahan baku yang tidak homogen, dan kelembapan ruangan yang memengaruhi proses produksi. Sedangkan prioritas paling tinggi berasal dari ketidaktepatan metode penyemprotan dan pengendalian temperatur mesin tidak homogen.

Kata Kunci: *Diagram Ishikawa, FMEA, Kaca Sunergy, Kapabilitas proses, Multivariate Coefficient of Variation, Multivariat Short Run, Peta Kendali.*

Abstract

The demand for energy efficiency and aesthetic aspects in modern buildings continues to increase in line with the development of the glass manufacturing industry. One type of glass that is widely used to meet these needs is *low-emissivity (low-E)* glass. PT Asahimas Flat Glass Tbk, as one of the largest glass manufacturing companies in Indonesia, plays a role in providing these solutions through its flagship product, *Sunergy SNFL 6 mm* glass, which is specifically designed for modern buildings. Maintaining product consistency to meet strict quality standards is a challenge for the company, as it has not yet implemented quality control measures capable of detecting variations simultaneously within a limited production period. Quality control methods that can be used to analyse several interdependent quality characteristics include *Multivariate Coefficient of Variation (MCV)* and *Multivariate Short Run*, Ishikawa diagrams, and FMEA. The results of the study show that the production process is statistically capable, but there are still discrepancies caused by operator inaccuracy when setting machine parameters, machine performance, inappropriate spray coating, non-homogeneous raw materials, and room humidity that affects the production process. Meanwhile, the highest priority comes from the inaccuracy of the spraying method and non-homogeneous machine temperature control.

Keywords: *Control Chart, FMEA, Ishikawa Diagram, Multivariate Coefficient of Variation, Multivariat Short Run, Process Capability, Sunergy Glass.*

PENDAHULUAN

Industri kaca merupakan salah satu sektor strategis yang dibutuhkan dalam proses pemba-

ngunan infrastruktur. PT Asahimas Flat Glass merupakan salah satu perusahaan produsen kaca terkemuka di Indonesia yang berdiri pada tahun 1971 sebagai hasil kerja sama antara Perusahaan

Asahi Glass Co., Ltd. Jepang dan PT Rodamas. Perusahaan ini memproduksi berbagai jenis kaca, dimana salah satu produk unggulannya merupakan kaca *Sunergy*. Kaca jenis ini merupakan salah satu produk *coated glass* dengan teknologi pelapisan khusus untuk meningkatkan kinerja energi dan nilai estetika dalam rangka memenuhi kebutuhan akan bangunan yang gedungnya memerlukan kaca *low Emissivity (low-E)* (Berardi & Khaled, 2023).

Karakteristik kualitas dari produk kaca *Sunergy* meliputi parameter penting seperti ketebalan lapisan, tingkat *light transmittance*, dan *emissivity* yang harus dijaga agar sesuai standar yang ditetapkan. Variasi kecil pada ketebalan lapisan dapat memberikan dampak terhadap performa dan hasil akhir produk, sehingga pengendalian kualitas yang ketat menjadi sangat penting. Observasi yang dilakukan selama ini menunjukkan bahwa perusahaan masih menghadapi tantangan dalam menjaga kestabilan proses produksi. Kondisi kualitas produk belum sepenuhnya memenuhi standar yang telah ditetapkan perusahaan, pengendalian kualitas yang dilakukan oleh perusahaan hanya sebatas penyusunan grafik tren untuk setiap karakteristik kualitas, padahal keterkaitan antar karakteristik kualitas dapat memengaruhi hasil akhir produk. Metode yang digunakan ini belum mampu mendeteksi variasi yang terjadi secara bersamaan dari beberapa karakteristik kualitas. Pengendalian kualitas yang mampu mendeteksi variasi secara bersamaan adalah pengendalian kualitas multivariat.

Penelitian terdahulu yang digunakan sebagai sumber referensi penelitian ini di antaranya Wilda Melia Udiatami dan Wibawati (2021); Pengendalian Kualitas Proses Produksi Kaca *Sunergy* dengan Diagram Kendali Multivariat *Short Runs* yang meneliti produk kaca *Sunergy*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 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. Sehingga dalam penelitian ini meneliti tentang karakteristik kualitas kaca *Sunergy* yang lain.

Pengendalian kualitas multivariat merupakan metode pengendalian kualitas yang menggunakan teknik statistik untuk memantau dan mengendalikan berbagai karakteristik kualitas produk secara serentak yang saling berkorelasi. Pengendalian multivariat lebih efektif dalam mendeteksi variasi proses yang kompleks dan perubahan kecil yang mungkin tidak terlihat jika masing-masing variabel dianalisis secara terpisah. Peta kendali multivariat yang dapat memantau dua atau lebih karakteristik kualitas secara simultan. Selain untuk memantau, juga dapat digunakan untuk mendeteksi adanya hubungan antara variabel kualitas (Montgomery & Runger, 2018). Pada kondisi produksi *short run*, yang mana jumlah produksi pada satu jenis produk relatif sedikit, penerapan peta kendali multivariat umum menjadi kurang efektif. Hal tersebut disebabkan karena keterbatasan data historis sehingga parameter proses seperti rata-rata dan kovarians seringkali tidak diketahui secara pasti. Mengatasi keterbatasan tersebut, dikembangkan pendekatan peta kendali multivariat *short runs production*, dengan mengombinasikan peta kendali *Multivariate of Coefficient Variation* untuk memantau variabilitas pada proses dan *Multivariate Short Run* untuk memantau perubahan rata-rata pada proses, dilanjutkan analisis mendalam terhadap faktor-faktor yang menyebabkan ketidaksesuaian produk menggunakan analisis kapabilitas. Faktor-faktor penyebab masalah akan dikelompokkan ke dalam lima kategori utama, yaitu manusia, metode, mesin, material, dan lingkungan menggunakan diagram ishikawa. FMEA (*Failure Mode Effect Analysis*) digunakan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengevaluasi potensi kegagalan dalam suatu produk, proses, atau desain.

Pengendalian kualitas yang dilakukan di PT Asahimas Flat Glass pada proses produksi kaca

Sunergy hanya secara deskriptif yaitu melalui pembentukan grafik tren kualitas. Analisis yang dilakukan perusahaan hingga saat ini belum mencakup analisis kapabilitas proses, padahal analisis tersebut sangat penting karena suatu proses produksi dinyatakan kapabel apabila berada dalam kondisi terkendali secara statistik serta memiliki presisi dan akurasi yang tinggi. Karakteristik kualitas yang diukur pada proses produksi kaca *Sunergy* SNFL 6 mm terdiri dari dua puluh parameter yang saling berkaitan, namun dalam penelitian ini difokuskan pada tiga karakteristik kualitas utama yang dianggap mewakili keseluruhan parameter, yaitu ketebalan, *transmittance* dan *emissivity* dengan batas spesifikasi yang ditetapkan oleh perusahaan masing-masing sebesar $6,00 \pm 0,20$; 68 ± 3 ; dan $0,25 \pm 0,04$. Berdasarkan kondisi tersebut, ingin mengetahui apakah proses produksi kaca *Sunergy* pada periode 2024-2025 berada dalam kondisi kapabel.

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah Objek penelitian dibatasi pada produk kaca *Sunergy* tipe SNFL dengan ketebalan 6 mm, karakteristik kualitas yang ada pada perusahaan terdapat dua puluh karakteristik kualitas, namun dalam penelitian ini hanya digunakan tiga karakteristik kualitas yakni ketebalan, *transmittance*, dan *emissivity*. Ketiga karakteristik kualitas tersebut merupakan parameter paling berpengaruh pada kualitas produksi kaca, khususnya dalam aspek optik, mekanik, dan visual, sehingga berperan penting dalam menjamin konsistensi dan kualitas produk akhir kaca.

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan, didapatkan tujuan yang ingin dicapai yaitu mengetahui kapabilitas proses produksi kaca *Sunergy*, mengetahui faktor-faktor penyebab hasil proses produksi tidak sesuai, dan menentukan prioritas risiko kegagalan dan tindakan perbaikan yang tepat pada proses produksi.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi kepada perusahaan tentang penyebab terjadinya variasi cacat produk, sehingga dapat diketahui langkah perbaikan apa yang sebaiknya dilakukan untuk meningkatkan kualitas produk.

KAJIAN TEORI

PENGUJIAN DEPENDENSI

Uji dependensi adalah teknik statistik yang digunakan untuk menguji apakah terdapat hubungan beberapa variabel. Tujuan dari uji dependensi adalah untuk menentukan apakah hubungan antara variabel signifikan secara statistik atau acak. Uji dependensi dilakukan menggunakan uji *bartlett* yang digunakan untuk memeriksa apakah data memenuhi asumsi kehomogenan ragam. Uji ini harus dilakukan sebelum menganalisis ragam data (Safitri, 2022). Hipotesis pada uji ini adalah sebagai berikut.

Hipotesis:

$$H_0 : R = I$$

$$H_1 : R \neq I$$

atau

$$H_0 : (\text{Tidak terdapat hubungan antar variabel})$$

$$H_1 : (\text{Terdapat hubungan antar variabel})$$

Matriks korelasi sampel R dibentuk dari koefisien korelasi antar pasangan variabel. Statistik uji yang digunakan uji *Bartlett* yang akan dijabarkan pada Persamaan berikut, di mana R adalah matriks korelasi antar variabel, sedangkan p merupakan jumlah karakteristik kualitas. Setiap pasangan karakteristik kualitas k , koefisien korelasi Pearson ditunjukkan pada Persamaan 1.

Statistik uji :

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

Daerah kritis H_0 akan ditolak dengan taraf signifikan α , apabila $\chi^2_{hitung} > \chi^2_{\alpha \left(\frac{p}{2} \times (p-1) \right)}$ dan $P\text{value} < \alpha$.

UJI ASUMSI DISTRIBUSI NORMAL MULTIVARIAT

Uji distribusi normal multivariat merupakan prosedur untuk memeriksa apakah data dengan beberapa variabel memiliki distribusi normal secara bersama-sama, bukan hanya secara terpisah. Pengujian normalitas multivariat dapat dilakukan dengan menggunakan plot antara jarak Mahalanobis kuadrat dan nilai kuantil dari distribusi *chi-square* dengan derajat kebebasan sama dengan jumlah variabel (Johnson & Winchern, 2007). Pengujian normalitas dilakukan berdasarkan jarak Mahalanobis yang dihitung dari rata-rata dan matriks kovarian sampel. Jarak Mahalanobis

tersebut kemudian dibandingkan dengan kuantil distribusi χ^2 melalui QQ-plot dan koefisien korelasi untuk menilai kesesuaian data terhadap distribusi normal multivariat. Asumsi yang diuji adalah bahwa vektor-vektor pengamatan tersebut berasal dari distribusi normal multivariat dengan rata-rata μ dan matriks kovarian Σ . Pemeriksaan asumsi distribusi normal multivariat dilakukan dengan hipotesis sebagai berikut.

Hipotesis:

$$H_0 : X \sim N_p(\mu, \Sigma)$$

$$H_1 : X \not\sim N_p(\mu, \Sigma)$$

atau

$$H_0 : (\text{Data berdistribusi normal multivariat})$$

$$H_1 : (\text{Data tidak berdistribusi normal multivariat})$$

Pemeriksaan dapat dilihat secara visual melalui grafik Q-Q plot dengan mengukur seberapa jauh setiap pengamatan dari pusat distribusi menggunakan jarak Mahalanobis kuadrat. Jarak Mahalanobis observasi ke- i dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$d_i^2 = (X_i - \bar{X})' S^{-1} (X_i - \bar{X}), i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

Nilai d_i^2 yang besar menunjukkan bahwa observasi ke- i berada relatif jauh dari rata-rata sampel, sedangkan nilai yang kecil menunjukkan kedekatan dengan pusat sebaran. Langkah selanjutnya membandingkan sebaran jarak Mahalanobis dengan distribusi χ^2 derajat bebas p . Nilai d_i^2 diurutkan dari yang terkecil hingga terbesar dan dinotasikan sebagai $d_{(1)}^2, \dots, d_{(m)}^2$. Kesesuaian antara jarak Mahalanobis dan distribusi χ^2 dievaluasi menggunakan koefisien korelasi Pearson antara deret $\{q_i\}$ dan $\{d_{(i)}^2\}$. Koefisien korelasi atau statistik uji tersebut dinyatakan pada persamaan berikut.

Statistik Uji :

$$r_Q = \frac{\sum_{i=1}^m (d_i^2 - \bar{d}^2)(q_i - \bar{q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (d_i^2 - \bar{d}^2)^2 (q_i - \bar{q})^2}} \quad (3)$$

Daerah kritis H_0 akan ditolak dengan taraf signifikan α , apabila $r_Q < r_{(\alpha,1)}$ dan $Pvalue < \alpha$. Nilai r_Q yang mendekati satu menunjukkan bahwa

titik-titik QQ-plot sangat dekat dengan garis lurus sehingga data dapat dianggap memenuhi asumsi normalitas multivariat. Sebaliknya, jika r_Q lebih kecil daripada nilai kritis $r_{(\alpha,1)}$ pada taraf signifikansi α , maka hipotesis normalitas multivariat ditolak.

PETA KENDALI MULTIVARIATE COEFFICIENT OF VARIATION

Peta kendali *Multivariate Coefficient of Variation* merupakan salah satu alat untuk pengendali variabilitas proses dimana data pengamatan bersifat multivariat. Peta ini digunakan untuk mengendalikan variabilitas proses pada *multiple* variabel kualitas yang berkorelasi, dengan menormalkan standar deviasi relatif terhadap rata-rata untuk mengatasi skala berbeda antar variabel (Iriawan, 2006).

Peta kendali MCV terdiri dari dua sisi yaitu *upward MCV chart* untuk mendeteksi peningkatan pergeseran MCV) dan *downward MCV chart* untuk mendeteksi penurunan pergeseran MCV. Penelitian ini menggunakan *upward MCV* karena bertujuan memantau peningkatan pergeseran MCV. Sehingga batas kendali atas dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$\begin{aligned} BKA &= F_Y^{-1}(1 - \alpha | n, p, \delta_0) \\ &= \sqrt{\frac{n(n-p)}{n-1p} \left[\frac{1}{F_1^{-1}(\alpha | p, n-p, \delta_0)} \right]} \end{aligned} \quad (4)$$

$F_1^{-1}(\alpha | p, n-p, \delta_0)$ adalah invers *cdf* dari distribusi non-central F dengan derajat bebas $(p, n-p)$ dan parameter non-centrality δ_0 pada area α . Proses *out of control* apabila $\hat{\gamma}_i > BKA$. Selain itu nilai $\delta_0 = \frac{n}{\gamma_{in}^2}$. Nilai γ_{in} dapat diestimasi menggunakan persamaan berikut.

$$\hat{\gamma}_{in} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{\gamma}_i^2} \quad (5)$$

Notasi m merupakan banyaknya subgrup, $\hat{\gamma}_i$ merupakan statistik MCV ke- i ($i = 1, 2, \dots, m$) dimana nilai $\hat{\gamma}_{in}$ juga digunakan untuk menghitung batas garis tengah.

PETA KENDALI MULTIVARIATE SHORT RUN

Peta kendali multivariat merupakan alat pengendalian kualitas statistik yang digunakan untuk memantau beberapa karakteristik kualitas secara bersama-sama. Salah satu peta kendali multivariat yang paling umum digunakan adalah

peta kendali T^2 Hotelling yang biasanya digunakan untuk memantau pergeseran rata-rata proses dengan menggunakan vektor rata-rata dan matriks varian kovarian. Namun pada kondisi produksi *short run*, yang mana jumlah produksi pada satu jenis produk relatif sedikit, penerapan peta kendali multivariat umum menjadi kurang efektif (Khoo, et al., 2005). Hal tersebut disebabkan karena keterbatasan data historis sehingga parameter proses seperti rata-rata dan kovarians seringkali tidak diketahui secara pasti. Mengatasi keterbatasan tersebut, dikembangkan pendekatan peta kendali berbasis statistik V , yakni substitusi T^2 Hotelling agar mengikuti distribusi normal baku sehingga lebih stabil untuk jumlah data yang sedikit. Proses produksi dengan kondisi *short run*, parameter rata-rata proses dan matriks kovariansnya tidak diketahui dan harus diestimasi secara bertahap dari data observasi. Matriks kovarian *pooled* sampai subgrup ke- $i - 1$ diperoleh dengan merata-ratakan seluruh kovarians subgrup S_i yaitu $S_{p,(i-1)}$, selanjutnya perhitungan dari kovarians *pooled* akan digunakan untuk perhitungan T^2 Hotelling yang akan ditunjukkan pada persamaan berikut. Nilai T_{di}^2 yang diperoleh akan disubstitusikan ke dalam persamaan berikut.

$$= \phi^{-1} \left\{ F_{p,(i-1)} \left[\left(\frac{V_i}{ip(n-1)} \right) T_{di}^2 \right] \right\} \quad (6)$$

$$i = y, y + 1, \dots, m \text{ dengan } y = \left\lfloor \frac{p-1}{n-1} + 1 \right\rfloor$$

V_i merupakan statistik peta kendali yang diperoleh dari transformasi T^2 Hotelling, fungsi $F_{p,(i-1)}$ menyatakan fungsi distribusi kumulatif Snedecor-F dengan derajat bebas p dan $(i-1)(n-1) - p + 1$. Fungsi $\phi(\cdot)$ adalah fungsi distribusi kumulatif normal standar, sedangkan $\phi^{-1}(\cdot)$ adalah inversnya yang memetakan peluang ke skor normal. Dengan demikian, V_i memiliki skala normal standar sehingga dapat dibandingkan dengan batas kendali tetap.

Statistik V pada Persamaan 2.18 merupakan variabel acak berdistribusi $N(0,1)$ yang mana mengasumsikan bahwa distribusi proses *in control* dengan distribusi normal multivariat. Untuk mendeteksi pergeseran pada vektor mean rata-rata proses, maka dilakukan 4 pengujian yakni *1-of-1 test*, *3-of-3 test*, *4-of-5 test*, dan EWMA (Khoo & Quah, 2002). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Wilda, didapatkan hasil pengujian yang paling baik adalah menggunakan *1-of-1 test* untuk

digunakan dalam mendeteksi pergeseran rata-rata proses, baik untuk data hubungan antar karakteristik kualitas yang kuat, lemah, maupun tidak memiliki hubungan (Udiatami & Wibawati, 2021). Uji *1-of-1 test* tersebut ketika statistik V diplot, uji ini akan memberi sinyal pergeseran dalam rata-rata proses jika $V_i > 3\sigma$ ($=3$).

INDEKS KAPABILITAS PROSES

Kapabilitas proses adalah suatu rangkaian metode statistik yang digunakan untuk mengukur dan mengevaluasi kemampuan suatu proses dalam menghasilkan produk yang sesuai dengan batas spesifikasi atau persyaratan kualitas yang telah ditetapkan oleh pelanggan. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui seberapa baik proses tersebut mempertahankan konsistensi kualitas dan menghasilkan output yang memenuhi standar, serta untuk mengidentifikasi kebutuhan perbaikan agar proses menjadi lebih efektif dan efisien. Proses dikategorikan kapabel jika variabilitasnya cukup kecil dan rata-rata hasil produksinya berada dalam batas toleransi yang ditentukan (Montgomery & Runger, 2018).

Keterangan :

Jika $C_p > 1$ maka kapabilitas proses sangat baik

Jika $C_p = 1$ maka kapabilitas proses baik

Jika $C_p < 1$ maka kapabilitas proses tidak baik

Analisis dapat dihitung apabila peta kendali berada dalam keadaan terkendali yang akan dijabarkan pada persamaan di bawah. MC_p merupakan indeks kapabilitas secara multivariat, sedangkan C_p merupakan indeks kapabilitas masing-masing variabel, dengan W merupakan bobot masing-masing variabel. C_{pk} adalah indeks kapabilitas proses yang sudah memperhitungkan posisi rata-rata proses terhadap batas spesifikasi.

$$MC_p = \sum_{k=1}^p W_k C_{p,k} \quad (7)$$

Nilai C_p dalam persamaan MC_p diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\hat{C}_p = \frac{BSA - BSB}{6\hat{\sigma}} \quad (8)$$

Indeks C_{pk} untuk memperhitungkan posisi rata-rata proses terhadap spesifikasi karena pada nilai indeks C_p tidak diperhitungkan.

$$C_{pk} = \min(\hat{C}_{pu}, \hat{C}_{pl}) \quad (9)$$

$$\hat{C}_{pl} = \frac{BSA - \hat{\mu}}{3\hat{\sigma}} \quad (10)$$

$$\hat{C}_{pu} = \frac{\hat{\mu} - BSB}{3\hat{\sigma}} \quad (11)$$

Nilai C_{pk} yang lebih kecil dari 1 diartikan bahwa rata-rata proses berada di luar batas kendali.

DIAGRAM ISHIKAWA

Diagram Ishikawa adalah alat bantu visual untuk mengidentifikasi dan mengelompokkan kemungkinan penyebab dari suatu masalah atau cacat, dan sangat berguna untuk pemetaan awal dalam proses perbaikan kualitas. Faktor-faktor penyebab masalah akan dikelompokkan ke dalam lima kategori utama, yaitu manusia, metode, mesin, material, lingkungan, dan pengukuran. Setiap tulang diagram dapat menjelaskan detail penyebab terjadinya produk cacat hingga dilakukan perbaikan lanjutan (Montgomery & Runger, 2018).

FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) merupakan sebuah metode sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengevaluasi potensi kegagalan dalam suatu produk, proses, atau desain. Tujuan utamanya adalah untuk mencegah kegagalan terjadi sebelum menimbulkan dampak negatif yang signifikan. Metode ini mengidentifikasi semua modus kegagalan yang mungkin terjadi pada berbagai bagian sistem serta mekanisme kegagalan, dan strategi untuk mencegah dan memitigasi kegagalan. Hal ini dilakukan melalui prioritas risiko atau biasa dikenal dengan indeks *Risk Priority Number* (RPN) yang merupakan hasil kali antara tingkat keparahan, kejadian, dan deteksi. Dalam analisisnya, dapat dilihat pola risiko dan hasil yang tinggi. Semakin tinggi angka RPN, semakin besar kekhawatirannya (Stamatis, 2019).

$$RPN = S \times O \times D \quad (12)$$

a. Severity (Keparahan)

Merupakan suatu penilaian efek dari seberapa serius dampak mode kegagalan terhadap pelanggan, proses, keselamatan, atau regulasi. Semakin besar nilai S, semakin berat konsekuensi jika kegagalan terjadi. Untuk mendapatkan hasil secara kuantitas diperlukan adanya *rating* untuk masing-masing kategori.

Tabel 1. Tabel *Severity*

Skor	Kategori	Deskripsi
1	Sangat ringan	Deviasi sangat kecil, tidak terlihat dan tidak mempengaruhi fungsi atau performa kaca
2	Ringan	Sedikit menyimpang dari target tetapi masih dalam toleransi; pelanggan umumnya menerima

3	Sedang	Mendekati atau di batas spesifikasi atau performa mulai kurang optimal, potensi complain
4	Berat	Di luar spesifikasi; fungsi penghematan energi atau tampilan kaca terganggu jelas
5	Sangat berat	Kritis; tidak boleh dikirim atau berpotensi risiko keselamatan (misal ketebalan jauh di bawah standar)

b. Occurance (Peluang terjadi)

Merupakan suatu perkiraan subyektif tentang seberapa sering atau seberapa besar kemungkinan mode kegagalan itu muncul. Nilai O tinggi berarti kegagalan diperkirakan sering terjadi.

Tabel 2. Tabel *Occurance*

Skor	Kategori	Deskripsi
1	Sangat jarang	Hampir tidak pernah terjadi dalam data produksi kaca
2	Jarang	Terjadi sesekali, tidak rutin (proporsi sangat kecil)
3	Sedang	Muncul berkala dan terlihat di data cacat
4	Sering	Muncul di banyak <i>batch</i> , menjadi masalah rutin
5	Sangat sering	Menjadi cacat dominan, hampir selalu ada di setiap <i>batch</i>

c. Detection (Kemampuan deteksi)

Merupakan suatu perkiraan subyektif tentang seberapa besar peluang sistem kontrol yang ada mampu mendeteksi kegagalan sebelum mencapai pelanggan atau proses berikutnya. Nilai D tinggi berarti kemampuan deteksi rendah (sulit dideteksi).

Tabel 3. Tabel *Detection*

Skor	Kategori	Deskripsi
1	Sangat mudah	Hampir pasti terdeteksi oleh kontrol proses atau alat ukur sebelum pengiriman
2	Mudah	Umumnya terdeteksi oleh inspeksi rutin (<i>online</i> atau <i>final</i>)
3	Cukup	Sebagian lolos ke tahap selanjutnya
4	Sulit	Sering lolos sampai tahap <i>packing</i> atau pengiriman
5	Sangat sulit	Hampir tidak pernah terdeteksi sebelum sampai ke pelanggan

KACA SUNERGY

Kaca *Sunergy* adalah kaca dengan pantulan rendah yang menawarkan kenyamanan visual dan performa optik yang unggul. Varian seperti *Sunergy Cool* bahkan dirancang dengan *Shading Coefficient* (SC) rendah dan tampilan netral untuk menyesuaikan tren arsitektur modern. Produk ini dikenal karena daya tahan, kontrol panas matahari, serta kemampuan isolasi termal yang tinggi (Pacific, 2024).

Proses produksi kaca *Sunergy* di PT Asahimas Flat Glass terdiri dari enam tahap proses produksi yang akan dijelaskan sebagai berikut.

1. Batch Mixing

Batch mixing merupakan tahap pencampuran adonan yang mana 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*).

2. Melting

Proses peleburan atau *melting* ini merupakan proses yang mengubah bahan campuran *batch* dan *cullet* (serpihan kaca kecil) menjadi leburan kaca hampir seperti *liquid*. Suhu *furnace* yang digunakan untuk peleburan pasir adalah 1700°C dan untuk *cullet* menggunakan suhu 1200°C. suhu dalam proses ini dipertahankan untuk mendapatkan kondisi optimum dengan kualitas yang bagus.

3. Drawing

Proses pembentukan ini terjadi di dalam *metal bath* yang berupa bejana pengembangan berisi leburan timah. Tujuan proses ini untuk mengubah lelehan kaca menjadi lembaran dengan ketebalan dan lebar sesuai kebutuhan. Pada tahap ini proses *coating* disisipkan di dalam suhu tinggi. metode pirolitik (*pyrolytic*) *coating* yang diaplikasikan langsung pada kaca panas di suhu tinggi sekitar 600°C sampai 650°C saat kaca masih dalam bentuk lembaran panas (*ribbon glass*) yang keluar dari *metal bath*.

4. Annealing & Cooling

Proses *annealing* berlangsung di dalam oven khusus yang disebut *lehr*, dengan suhu kaca dikontrol secara bertahap dari sekitar 540°C turun ke 480°C. Di tahap ini, kaca didiamkan dalam suhu tinggi tetapi menurun secara perlahan agar tegangan internal kaca dapat hilang sehingga kaca menjadi lebih kuat dan stabil secara mekanik. Setelah itu, kaca mengalami proses pendinginan bertahap

dengan penurunan suhu yang dikontrol secara perlahan agar distribusi panas merata dan mencegah stres termal yang dapat menyebabkan retak atau cacat. Kedua proses ini dilakukan bertujuan menstabilkan struktur kaca, menghilangkan tegangan internal, dan memastikan produk akhir memiliki kualitas fisik unggul dan bebas cacat mekanik akibat suhu.

5. Cutting

Cutting termasuk dalam tahapan *cold process*, dan bertujuan agar kaca memiliki ukuran dan bentuk sesuai pesanan atau spesifikasi pasar. Sebelum proses ini dilakukan 2 pemantauan, yaitu *monitoring by visual* dan *tools*.

6. Proses Quality Control

Quality Control (QC) pada kaca *Sunergy* di perusahaan ini melibatkan pemeriksaan pada berbagai tahap, dengan tujuan memastikan produk bebas cacat dan sesuai standar kualitas nasional maupun internasional.

METODE

Metode analisis yang digunakan pada penelitian ini adalah analisis kapabilitas proses yang diawali dengan melakukan pengujian dependensi untuk mengetahui keterkaitan antar karakteristik kualitas, yang diikuti dengan pengujian asumsi normal multivariat. Selanjutnya pengendalian proses dilakukan menggunakan multivariat *short runs production* yakni Peta Kendali *Multivariate Coefficient of Variation* (MCV) untuk memantau variasi antar karakteristik kualitas, sedangkan Peta Kendali *Multivariate Short Runs* untuk mengidentifikasi adanya penyimpangan rata-rata proses. Setelah dipastikan bahwa proses berada dalam kondisi terkendali, dilakukan pengukuran kapabilitas proses multivariat untuk menilai kemampuan proses produksi dalam memenuhi spesifikasi yang ditetapkan perusahaan, baik dari aspek presisi yang dihitung berdasarkan nilai MCp, serta akurasi yang dihitung berdasarkan nilai MCpk. Apabila ditemukan potensi penyebab ketidakstabilan kapabilitas proses, dilakukan identifikasi penyebab ketidakstabilan proses produksi menggunakan diagram ishikawa yang selanjutnya akan dilakukan deteksi penyebab ketidakstabilan proses produksi yang paling berpengaruh menggunakan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi kegagalan utama proses produksi sebagai fokus perbaikan.

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari bagian *Quality Control* di PT Asahimas Flat Glass Tbk yaitu variabel ketebalan, *transmittance*, dan *emissivity*. Hubungan antara variabel di atas menunjukkan keterkaitan yang signifikan. Meningkatnya ketebalan kaca menyebabkan penurunan *transmittance* karena bertambahnya hambatan bagi cahaya untuk melewati kaca tersebut. Pada saat yang sama, nilai *emissivity* dapat mengalami sedikit peningkatan karena memiliki kapasitas penyerapan panas yang lebih besar. Data dikumpulkan pada tahun 2024 hingga 2025 karena perusahaan tidak memproduksi kaca *Sunergy* setiap hari, sehingga pengambilan subgrup berdasarkan periode produksi selama 2 tahun sebanyak 28 subgrup. Setiap subgrup memiliki anggota sebanyak 6 sampel yang diambil setiap 4 jam sekali dalam sehari.

HASIL DAN PEMBAHASAN

PENGUJIAN DEPENDENSI

Pengujian dependensi dilakukan pada variabel karakteristik kualitas kaca *Sunergy* yaitu ketebalan, *transmittance*, dan *emissivity* untuk memeriksa apakah karakteristik kualitas saling dependen. Ketiga variabel kualitas tersebut diuji menggunakan Uji Bartlett dengan hipotesis sebagai berikut.

Hipotesis:

$$H_0 : \mathbf{R} = \mathbf{I}$$

$$H_1 : \mathbf{R} \neq \mathbf{I}$$

atau

$$H_0 : (\text{Tidak terdapat hubungan antar variabel})$$

$$H_1 : (\text{Terdapat hubungan antar variabel})$$

Berdasarkan hasil diperoleh statistik uji ($\chi^2 = 27.853$) lebih besar dari nilai $\chi^2_{(0,05;3)}$ berarti H_0 ditolak, sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa antar variabel karakteristik kualitas saling dependensi secara signifikan.

PEMERIKSAAN DISTRIBUSI NORMAL MULTIVARIAT

Plot cenderung mengikuti garis linear, sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa data karakteristik kualitas kaca ketebalan, *transmittance*, dan *emissivity* berdistribusi normal secara visual. Selanjutnya untuk mengetahui semua tiga variabel karakteristik kualitas kaca secara menyeluruh apakah memenuhi distribusi normal multivariat menggunakan hipotesis sebagai berikut.

Hipotesis :

$$H_0 : X \sim N_p(\mu, \Sigma)$$

$$H_1 : X \not\sim N_p(\mu, \Sigma)$$

atau

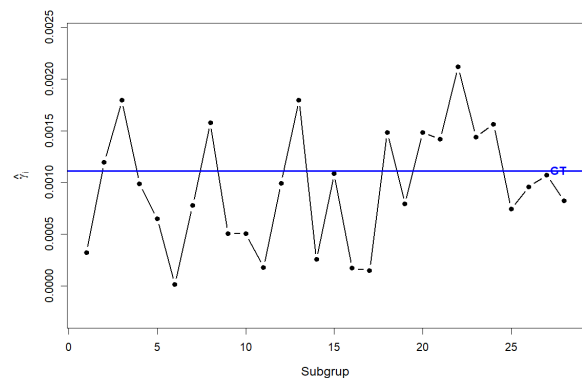
$$H_0 : (\text{Data berdistribusi normal multivariat})$$

$$H_1 : (\text{Data tidak berdistribusi normal multivariat})$$

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan statistik uji ($r_Q = 0,941$) lebih besar dari nilai $r_{Q(0,05;168)}$, sehingga diputuskan H_0 gagal ditolak, yang artinya data karakteristik kualitas kaca ketebalan, *transmittance*, dan *emissivity* berdistribusi normal multivariat.

PETA KENDALI MULTIVARIATE COEFFICIENT OF VARIATION

Peta kendali *Multivariate Coefficient of Variation* (MCV) digunakan untuk memantau kestabilan proses dengan menilai variasi beberapa karakteristik kualitas secara simultan. Pendekatan ini menekankan pada perbandingan antara simpangan baku dan rata-rata masing-masing karakteristik yang perhitungannya disajikan pada Lampiran 4, sehingga perubahan kecil dalam variabilitas yang mungkin tidak terdeteksi oleh peta kendali umum dapat diidentifikasi lebih dini. Hasil dari perhitungan statistik uji MCV diplotkan menjadi peta kendali yang disajikan pada gambar berikut.



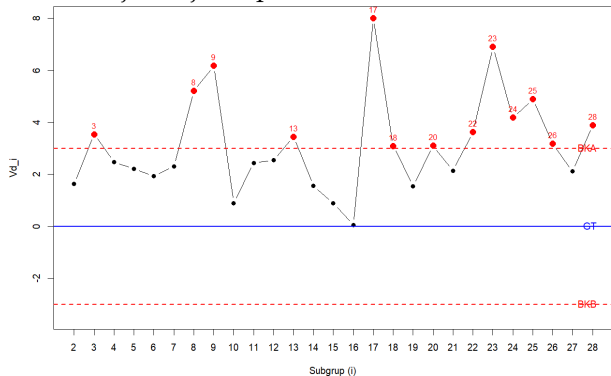
Gambar 1. Peta Kendali *Multivariate Coefficient of Variation*

Berdasarkan Gambar 1 menunjukkan bahwa nilai Batas Kendali Atas (BKA) yang dihitung berdasarkan Persamaan (2.14) sebesar 0,1289 dan nilai Garis Tengah (GT) yang dihitung berdasarkan Persamaan (2.15) sebesar 0,001. Peta kendali menunjukkan bahwa tidak terdapat observasi yang keluar dari batas kendali, sehingga dapat dikatakan proses telah terkendali secara statistik.

PETA KENDALI MULTIVARIAT SHORT RUNS

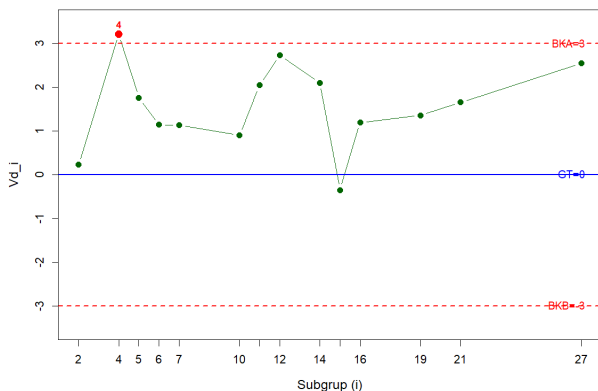
Peta kendali multivariat *short runs* digunakan untuk memantau pergeseran rata-rata proses ketika jumlah subgrup terbatas dan kondisi produksi bersifat jangka pendek. Metode ini mengkombinasikan informasi dari beberapa

karakteristik kualitas ke dalam satu statistik pengendali, sehingga tetap memungkinkan pengawasan proses yang efektif meskipun data yang tersedia relatif sedikit. Hasil dari perhitungan statistik uji disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta Kendali Multivariat *Short Runs*

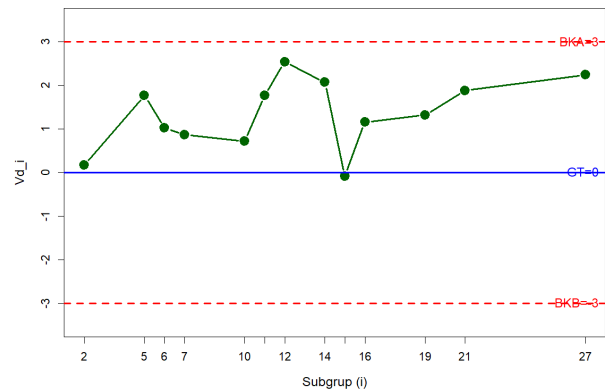
Berdasarkan Gambar 2 menunjukkan bahwa nilai Batas Kendali Atas (BKA) sebesar 3 dan nilai Batas Kendali Bawah (BKB) sebesar 3 terdapat beberapa titik di luar batas kendali atas. Hal ini membuktikan bahwa rata-rata proses belum stabil dan disimpulkan belum terkendali secara statistik. Setelah dilakukan investigasi di titik tersebut, pihak perusahaan mengonfirmasi bahwa penyebab data di luar batas kendali dikarenakan terdapat penyebab khusus (*assignable causes*) pada proses produksi meliputi permasalahan manusia, metode, mesin, lingkungan, dan material. Oleh karena itu diperlukan eliminasi pada observasi yang keluar dari batas kendali untuk dibentuk peta kendali yang baru.



Gambar 3. Peta Kendali Multivariat *Short Runs* setelah perbaikan

Berdasarkan Gambar 3 menunjukkan peta kendali setelah 13 observasi yang keluar dari batas kendali dikeluarkan dan dibuat peta kendali baru, terlihat masih terdapat satu titik yang keluar dari batas kendali, sehingga proses produksi belum terkendali secara statistik dan diperlukan

identifikasi dan eliminasi observasi ke 4 untuk dibentuk peta kendali yang baru.



Gambar 4. Peta Kendali Multivariat *Short Runs* setelah perbaikan kedua

Berdasarkan Gambar 4 menunjukkan peta kendali setelah observasi ke 4 yang keluar dari batas kendali dikeluarkan dan dibuat peta kendali baru, terlihat seluruh titik berada di dalam batas kendali dan tidak terdapat pola yang mengindikasikan pergeseran proses, sehingga proses produksi telah terkendali secara statistik dan dapat dilanjut menganalisis kapabilitas.

INDEKS KAPABILITAS

Analisis kapabilitas proses produksi kaca *Sunergy* yang disajikan pada Tabel 4 menunjukkan bahwa kinerja proses produksi berjalan sangat baik yang berarti proses kapabel. Karakteristik ketebalan memiliki nilai C_p 7,307 yang berarti variasi proses sangat kecil dibandingkan dengan batas spesifikasi, sehingga peluang dihasilkannya produk di luar batas spesifikasi menjadi sangat rendah. Nilai C_{pk} sebesar 1,015 yang berarti rata-rata proses sedikit bergeser dari posisi tengah rentang spesifikasi, sehingga masih ada peluang perbaikan untuk memusatkan proses tepat di tengah batas spesifikasi.

Karakteristik *transmittance* menghasilkan nilai C_p 2,416 dan C_{pk} 1,639, sedangkan karakteristik *emissivity* menghasilkan nilai C_p 1,809 dan C_{pk} 1,608. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa *transmittance* dan *emissivity* juga berada pada kondisi proses yang kapabel, walaupun penyebaran dan pemusatan prosesnya tidak sebaik karakteristik ketebalan. Dengan demikian, pengendalian proses tetap perlu dipertahankan terutama untuk menjaga stabilitas *transmittance* dan *emissivity* agar tidak mendekati batas spesifikasi.

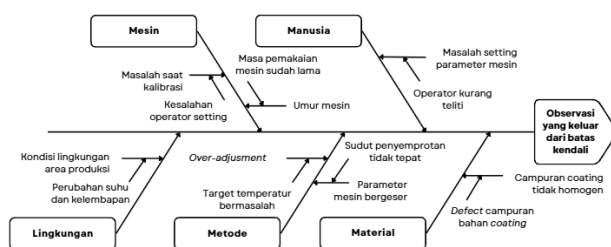
Tabel 4. Analisis Kapabilitas

Variabel	Bobot (W_p)	C_p	C_{pk}	MC_p	MC_{pk}
Ketebalan	0,333	7,307	1,015	3,841	1,420
<i>Transmittance</i>	0,333	2,416	1,639		
<i>Emissivity</i>	0,333	1,809	1,608		

Secara keseluruhan, indeks MC_p sebesar 3,841 dan MC_{pk} sebesar 1,420 menunjukkan bahwa proses produksi kapabel dan mampu memenuhi spesifikasi pelanggan. Pemberian bobot 0,333 pada setiap karakteristik kualitas ketebalan, *transmittance*, dan *emissivity* dianggap memiliki tingkat kepentingan yang sama dalam menilai kapabilitas proses kaca *Sunergy*. Jumlah bobot seluruh karakteristik harus bernilai satu, sehingga untuk tiga karakteristik digunakan bobot yang sama besar.

DIAGRAM ISHIKAWA

Setelah membentuk peta kendali, didapatkan hasil analisis pada Gambar 5 yang menunjukkan masih terdapat titik observasi yang berada di luar batas kendali, sehingga proses produksi kaca *Sunergy* belum sepenuhnya terkendali dan memerlukan tindakan perbaikan. Diagram ishikawa menjadi solusi untuk menelusuri faktor penyebab tidak terkendalnya proses produksi yang terjadi pada kaca *Sunergy*. Hasil identifikasi menggunakan diagram ishikawa disajikan pada gambar berikut.



Gambar 5. Diagram Ishikawa

Gambar 5 menunjukkan bahwa penyebab tidak terkendalnya proses produksi berdasarkan 5 faktor meliputi manusia, mesin, material, metode, dan lingkungan. Hasil analisis mengenai faktor penyebab dijabarkan sebagai berikut.

1. Manusia

Akar masalah yang dominan pada faktor manusia adalah disebabkan karena operator yang kurang teliti dalam menjalankan instruksi. Kelalaian kecil seperti mengabaikan tanda-tanda awal ketidakstabilan proses, tidak memeriksa ulang setting parameter mesin, tidak mengikuti rangkaian prosedur, dapat mengakibatkan batch proses produksi tidak berjalan sesuai spesifikasi. Hal ini yang mengindikasikan adanya pengaruh *human*

error karena terdapat observasi tertentu yang keluar dari batas kendali.

2. Mesin

Faktor mesin berkaitan dengan ketergantungan proses kinerja kalibrasi peralatan, *coater* dan *undercoater*. Mesin yang belum dikalibrasi berpotensi menghasilkan *spray* yang tidak konsisten pada kaca dan mengakibatkan ketebalan *coating* tidak merata. Hal tersebut yang mengakibatkan terdapat observasi tertentu pada peta kendali keluar dari batas kendali.

3. Metode

Penyebab utama faktor metode adalah dikarenakan metode semprotan yang tidak tepat, terutama pada sudut penyemprotan dan target temperatur yang tidak sesuai dengan spesifikasi mesin. Hal tersebut yang mengakibatkan distribusi bahan pelapisan di permukaan kaca menjadi tidak merata dan laju reaksi termal tidak optimum, sehingga ketebalan dan sifat optik lapisan menjadi bervariasi antar observasi.

4. Material

Defect pada campuran bahan *coating* diakibatkan karena campuran material yang tidak homogen. Komposisi yang tidak seragam berpotensi menimbulkan variasi pada ketebalan dan sifat optik lapisan. Kondisi tersebut dapat memperbesar risiko proses produksi tidak terkendali dan terdapat observasi yang keluar dari batas kendali meskipun parameter proses dan pengaturan mesin telah dijaga konstan.

5. Lingkungan

Aspek yang berpengaruh adalah kondisi lingkungan di area produksi serta kesesuaian spesifikasi material dari pemasok. Perubahan suhu dan kelembapan udara dapat memengaruhi karakteristik semprotan, proses pengeringan maupun pemanasan pada saat pelapisan. Faktor tersebut menyebabkan proses menjadi kurang stabil dari waktu ke waktu.

FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) digunakan setelah diketahui akar penyebab tidak terkendalnya proses produksi kaca *Sunergy*. Hasil analisis disajikan pada tabel berikut.

Tabel 5. Hasil penilaian FMEA

Faktor	Mode Kegagalan	Dampak Kegagalan	S	O	D	RPN
Manusia	Operator kurang teliti (<i>setting</i>)	Ketebalan <i>coating</i> tidak konsisten	4	4	3	48

	dan monitoring)	dan observasi keluar batas kendali				
Mesin	Kalibrasi coater/undercoater tidak optimal	Semprotan tidak merata, variasi ketebalan pada lapisan kaca	4	3	3	36
Metode	Sudut semprot & target temperatur tidak sesuai	Distribusi coating tidak homogen , sifat optik bervariasi	4	4	4	64
Material	Campuran bahan coating tidak homogen	Defect coating, variasi optik dan ketebalan signifikan	5	3	4	60
Lingkungan	Perubahan suhu dan kelembapan	Proses pendinginan tidak stabil	3	3	3	27

Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai *Risk Priority Number* (RPN) yang diperoleh dengan menggunakan ketentuan nilai Tabel 1 hingga 3 adalah faktor Metode dengan RPN 64 dan Material dengan RPN 60 sehingga kedua faktor tersebut memberikan risiko paling tinggi terhadap tidak terkendalinya proses produksi kaca *Sunergy*.

PENUTUP

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan terhadap proses produksi kaca *Sunergy* dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil analisis kapabilitas menunjukkan bahwa proses produksi kaca *Sunergy* dinyatakan kapabel secara statistik dengan nilai presisi ($MC_p = 3,841$) dan nilai akurasi ($MC_{pk} = 1,420$). Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses produksi memiliki presisi dan akurasi yang tinggi.

2. Penyebab ketidaksesuaian hasil proses produksi adalah ketidaktepatan operator saat *setting* parameter mesin, performa mesin, *spray coating* tidak sesuai, bahan baku yang tidak homogen, dan kelembapan ruangan yang memengaruhi proses produksi.
3. Risiko kegagalan terbesar pada proses produksi kaca *Sunergy* berasal dari faktor Metode yaitu ketidaktepatan metode penyemprotan dan Material yaitu pengendalian temperatur mesin tidak homogen.

SARAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian, perusahaan perlu melakukan perbaikan pengendalian proses produksi secara berkelanjutan, khususnya pada faktor Metode dan Material yang terbukti berpengaruh terhadap kualitas hasil produksi. Perbaikan tersebut dapat difokuskan pada peningkatan kesiapan dan kesesuaian peralatan serta material yang digunakan, disertai dengan penerapan pemantauan kualitas yang terstandar dan evaluasi kinerja proses secara berkala. Saran untuk penelitian selanjutnya yakni penggunaan analisis kinerja peta kendali *Average Run Length* (ARL) agar evaluasi yang dihasilkan lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Iriawan, N. (2006). *Metode Statistik Multivariat: Aplikasi & Pemodelan*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Johnson, R. A., & Winchurn, D. W. (2007). *Applied Multivariate Statistic Analysis* (ke6 ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Khoo, M. B., & Quah, S. H. (2002). Proposed Short Runs Multivariate Control Charts for the Process Mean. *Quality Engineering*, 603-621.
- Khoo, M., Quah, S., H.C.Low, & C.K.Ch'Ng. (2005). Short Run Multivariate Control Chart for Process Dispersion. *International Journal of Reliability Quality and Safety Engineering*, 227-239.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2018). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (7 ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Stamatis, D. H. (2019). *Risk Management using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*. Milwaukee: Quality Press.
- Udiatami, W. M., & Wibawati. (2021). Pengendalian Kualitas Proses Produksi Kaca *Sunergy* dengan Diagram Kendali Multivariat Short Runs. *Sains dan Seni ITS, IV*(2022).