

# Pengendalian Kualitas Semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi Menggunakan *Maximum Half-Normal Multivariate Control Chart* (Max-Half-Mchart)

I Melda Puspita Loka<sup>1</sup>, Hidayatul Khusna<sup>1</sup>, Diaz Fitra Aksioma<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Statistics, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Indonesia

\*Corresponding author: hidayatul@its.ac.id

Received: 17 February 2023

Revised: 29 September 2023

Accepted: 7 March 2024

**ABSTRAK** – Semen merupakan bahan perekat bangunan yang dihasilkan dari klinker dan memiliki bahan utama berupa silikat kalsium serta tambahan *gypsum*. Asosiasi Semen Indonesia (ASI) menyatakan terjadi penambahan konsumsi semen dalam negeri sebesar 5,5% pada tahun 2021. Persaingan di bidang industri yang cukup ketat menyebabkan PT Semen Bosowa Banyuwangi terus menjaga dan meningkatkan kualitas produknya. Salah satu langkah yang dilakukan adalah dengan melakukan pengecekan *blaine*, residu, dan *free lime* melalui laboratorium sebelum semen dipasarkan. Karena terdapat lebih dari satu karakteristik kualitas semen *Portland Composite Cement* (PCC) dan masing-masing karakteristik kualitas dimonitor tiap *shift*, maka diagram kendali yang digunakan adalah diagram kendali multivariat untuk pengamatan individu berupa diagram Max-Half-Mchart. Diagram Max-Half-Mchart untuk pengamatan individu dapat memonitor rata-rata dan variabilitas proses secara simultan dengan efektif. Pengendalian kualitas semen PCC menggunakan diagram Max-Half-Mchart pada fase I menunjukkan bahwa proses telah terkendali secara statistik. Pada fase II menunjukkan adanya pengamatan *out of control* yang teridentifikasi adanya pergeseran pada rata-rata proses. Hasil pengukuran kapabilitas proses secara multivariat diperoleh nilai  $MC_{pk}$  sebesar 1,053 yang berarti hasil produksi semen PCC secara keseluruhan telah sesuai dengan ketentuan perusahaan.

**Kata Kunci**– *Kapabilitas Proses, Max-Half-Mchart, Pengendalian Kualitas Statistika, Semen PCC.*

**ABSTRACT** – Cement is a building adhesive material produced from clinker and has the main ingredients in the form of calcium silicate and additional *gypsum*. The Indonesian Cement Association (ASI) states that there will be an increase in domestic cement consumption by 5.5% in 2021. Competition in the industrial sector is quite tight, causing PT Semen Bosowa Banyuwangi maintain and improve the quality of its products continuously. One of the steps taken is to check for *blaine*, residual, and *free lime* through the laboratory before the cement is distributed. Since there are more than one quality characteristic of *Portland Composite Cement* (PCC) and each quality characteristic is monitored every *shift*, the control chart used is a multivariate control chart for individual observations in the form of a Max-Half-Mchart. The Max-Half-Mchart for individual observation can effectively monitor mean and process variability simultaneously. PCC cement quality control using the Max-Half-Mchart in phase I showed that the process was statistically controlled. In phase II, there were out of control observations identified as a shift in the average process. The multivariate process capability measurement results obtained a  $MC_{pk}$  value of 1.053, which means that the overall production of PCC cement complies with company regulations.

**Kata Kunci**– *Process Capability, Max-Half-Mchart, Statistical Quality Control, PCC Cement.*

## I. PENDAHULUAN

Semen merupakan salah satu bahan perekat bangunan yang dihasilkan dari klinker yang dihaluskan dan memiliki bahan utama berupa silikat kalsium dan bahan tambahan berupa *gypsum*. Asosiasi Semen Indonesia (ASI) menyatakan terjadi kenaikan konsumsi semen dalam negeri sebesar 5,5% pada tahun 2021 dengan konsumsi semen terbesar merupakan Pulau Jawa. Gencarnya pembangunan infrastruktur di Indonesia menyebabkan industri semen menjadi salah satu industri yang berperan penting bagi perekonomian Indonesia. Untuk bersaing dalam industry semen, kualitas semen menjadi hal yang harus diperhatikan oleh produsen semen di Indonesia. Salah satu produsen semen di Indonesia adalah PT Semen Bosowa Banyuwangi dengan jenis semen yang diproduksi adalah *Portland Composite Cement* (PCC). PT Semen Bosowa Banyuwangi memiliki kapasitas produksi sebesar 1,8 juta ton per tahun yang ditujukan untuk konsumen di pulau Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara. Semen PCC merupakan jenis semen yang diperoleh dari hasil penggilingan terak semen *portland* dan *gypsum* yang dicampur dengan *pozzolan*, senyawa silikat, dan campuran bahan lain sebesar 6%-35% [1].

Persaingan dalam industri semen yang semakin ketat, menyebabkan PT Semen Bosowa Banyuwangi terus menjaga kualitas semen yang diproduksi. Salah satu upaya yang dilakukan oleh PT Semen Bosowa Banyuwangi untuk menjaga kualitas dan memonitor kualitas semen yang dihasilkan adalah dengan melakukan pengujian laboratorium. Pengendalian kualitas statistika biasa dilakukan dengan menggunakan diagram kendali yang dapat menunjukkan apakah hasil semen yang diproduksi telah stabil dan sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Pengendalian kualitas di PT Semen Bosowa Banyuwangi dapat dilakukan dengan memonitor *blaine*, residu, dan *free lime* semen PCC. Semakin halus semen, maka nilai *blaine* akan semakin tinggi dan partikel semen akan semakin kecil, sehingga partikel yang

tertahan pada ayakan akan semakin sedikit dan residu semen rendah [2]. Kadar kapur bebas atau *free lime* yang tinggi dapat menyebabkan kualitas semen yang dihasilkan menurun. Ketiga variabel dicatat tiap *shift* kerja, sehingga diagram kendali yang dapat digunakan adalah diagram kendali multivariat untuk pengamatan individu.

Diagram kendali simultan merupakan diagram kendali yang dapat memonitor rata-rata dan variabilitas proses secara serentak, sehingga lebih efektif jika dibandingkan dengan diagram kendali konvensional karena batas kontrol untuk rata-rata pada diagram kendali konvensional dipengaruhi oleh pergeseran pada variabilitas proses [3]. Diagram Max-MEWMA merupakan diagram kendali simultan yang *robust* terhadap distribusi normal multivariat, namun hanya dapat digunakan untuk memonitor pengamatan subgroup. Diagram Max-MCUSUM merupakan diagram kendali simultan yang dapat digunakan untuk memonitor pengamatan individu maupun subgroup, dan diagram Max-MCUSUM sensitif terhadap pergeseran proses yang kecil [4]. Diagram *Maximum Multivariate Control Chart* (Max-Mchart) merupakan diagram kendali simultan untuk pengamatan individu dengan pendekatan distribusi normal standar, namun statistik diagram Max-Mchart yang diperoleh dari nilai absolut statistik rata-rata dan variabilitas dapat menunjukkan hasil yang kurang sesuai, karena nilai negatif yang besar dapat teridentifikasi sebagai pengamatan *out of control* [5]. Diagram *Maximum Half-Normal Multivariate Control Chart* (Max-Half-Mchart) merupakan pengembangan dari diagram Max-Mchart. Diagram Max-Half-Mchart menggunakan pendekatan distribusi half-normal yang memiliki domain 0 sampai  $\infty$  untuk memperbaiki kesalahan pada diagram Max-Mchart dan efektif dalam memonitor rata-rata dan variabilitas proses [6]. Di samping keunggulan diagram Max-Half-Mchart, ketiga karakteristik kualitas pada proses produksi semen PCC cenderung memiliki pergeseran proses yang besar sehingga pada penelitian ini akan dilakukan pengendalian kualitas semen PCC PT Semen Bosowa Banyuwangi dengan menggunakan diagram Max-Half-Mchart.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Uji Dependensi

Uji dependensi dilakukan dengan uji *Bartlett's* untuk mengetahui apakah terdapat hubungan antar karakteristik kualitas. Antar karakteristik kualitas dikatakan tidak berhubungan apabila matriks korelasi sama dengan matriks identitas [7]. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

$H_0: \mathbf{R} = \mathbf{I}$  (Variabel independen)

$H_1: \mathbf{R} \neq \mathbf{I}$  (Variabel dependen)

Statistik Uji :

$$\chi^2_{hitung} = - \left[ n - 1 - \frac{2p + 5}{6} \right] \ln |\mathbf{R}| \tag{1}$$

dengan

$n$  = banyak observasi

$p$  = banyak karakteristik kualitas

$\mathbf{R}$  = matriks korelasi

Antar karakteristik kualitas dikatakan terdapat hubungan jika nilai  $\chi^2_{hitung} > \chi^2_{(\alpha, \frac{1}{2}p(p-1))}$ .

### B. Diagram Kendali Generalized Variance

Diagram kendali *Generalized Variance* (GV) merupakan diagram kendali yang digunakan untuk memonitor variabilitas proses. Statistik diagram GV untuk pengamatan individu diperoleh dengan melakukan standarisasi nilai pengamatan. Standarisasi dilakukan dengan mengurangkan dengan rata-rata kolom dan membagi dengan akar kuadrat varians.

### C. Diagram Kendali $T^2$ Hotelling

Diagram kendali  $T^2$  Hotelling merupakan diagram kendali yang dapat memonitor rata-rata proses. Statistik diagram  $T^2$  Hotelling untuk pengamatan individu adalah sebagai berikut [8].

$$T_i^2 = (\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}})' \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}) \tag{2}$$

dimana

$\mathbf{x}_i$  = vektor pengamatan ke- $i$

$\bar{\mathbf{x}}$  = vektor rata-rata

Batas kontrol untuk diagram  $T^2$  Hotelling untuk pengamatan individu fase I adalah sebagai berikut.

$$UCL = \frac{(n - 1)^2}{n} \beta_{\alpha, p/2, (n-p-1)/2} \tag{3}$$

Batas kontrol diagram  $T^2$  Hotelling untuk pengamatan individu fase II adalah sebagai berikut.

$$UCL = \frac{p(n + 1)(n - 1)}{n^2 - np} F_{\alpha, p, n-p} \tag{4}$$

Jika jumlah pengamatan  $n > 100$ , batas kontrol diagram  $T^2$  Hotelling untuk pengamatan individu adalah sebagai berikut.

$$UCL = \frac{p(n - 1)}{n - p} F_{\alpha, p, n-p} \tag{5}$$

atau

$$UCL = \chi_{\alpha,p}^2 \tag{6}$$

**D. Uji Normal Multivariat**

Uji normal multivariat dapat dilakukan dengan uji *Shapiro Wilk* untuk mengetahui apakah data mengikuti distribusi normal secara multivariat atau tidak. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

- $H_0$  : Data pengamatan berdistribusi normal multivariat
  - $H_1$  : Data pengamatan tidak berdistribusi normal multivariat
- Statistik Uji:

$$W^* = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p W_k \tag{7}$$

dimana

$$W_k = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{8}$$

Dengan nilai  $a$  merupakan koefisien tabel *normality test*.

Data mengikuti distribusi normal multivariat apabila nilai  $W^* > C_{\alpha,n,p}$ , dimana  $C_{\alpha,n,p}$  merupakan nilai quantil statistik *Saphiro Wlik* [9].

**E. Distribusi Half-Normal**

Distribusi half-normal merupakan distribusi normal dengan variabel random berupa absolut dari variabel random distribusi normal. Jika  $x$  berdistribusi normal dengan rata-rata  $\mu$  dan standar deviasi  $\sigma$ , maka  $z = |x|$  berdistribusi half-normal dengan parameter  $\mu$  dan  $\sigma$  [10]. Secara umum PDF dari distribusi half-normal dapat dituliskan sebagai berikut.

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp - \frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2, x \geq 0 \tag{9}$$

**F. Maximum Multivariate Control Chart (Max-Mchart)**

Diagram *Maximum Multivariate Control Chart* (Max-Mchart) merupakan diagram kendali simultan untuk pengamatan individu. Diagram Max-Mchart dikembangkan dengan menggabungkan statistik rata-rata  $T^2$  Hotelling pengatan individu dan statistik variabilitas dengan pendekatan *successive difference* [5]. Misalkan  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$  adalah variabel random berdistribusi normal multivariat  $N(\mu_g, \Sigma_g)$  dengan  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})'$  merupakan vektor  $x$  ke- $i$  berukuran  $p \times 1$  dengan  $p$  menyatakan banyaknya karakteristik kualitas dan  $i = 1, 2, \dots, n$  menyatakan banyaknya pengamatan. Statistik rata-rata yang digunakan merupakan statistik  $T^2$  Hotelling pengamatan individu sebagai berikut.

$$T_i^2 = (x_i - \mu_g)' \Sigma_g^{-1} (x_i - \mu_g), i = 1, 2, \dots, n \tag{10}$$

dengan

$\mu_g$  = vektor rata-rata berukuran  $p \times 1$  yang dihitung dari observasi *in control*

$\Sigma_g$  = matriks kovarians yang dihitung dari observasi *in control*

dimana  $T_i^2$  berdistribusi *chi-square* dengan derajat bebas  $p$  ( $\chi_p^2$ ) [11].

Statistik variabilitas dengan pendekatan *successive difference* dapat dituliskan sebagai berikut.

$$D_i = \frac{1}{2} (x_i - x_{i-1})' \Sigma^{-1} (x_i - x_{i-1}), i = 1, 2, \dots, n \tag{11}$$

dimana  $D_i$  berdistribusi *chi-square* dengan derajat bebas  $p$  ( $\chi_p^2$ ). Statistik rata-rata dan variabilitas diagram Max-Mchart dengan transformasi distribusi normal standar adalah sebagai berikut.

$$Z_i = \Phi^{-1} (H_p \{ (x_i - \mu_g)' \Sigma_g^{-1} (x_i - \mu_g) \}) \tag{12}$$

$$V_i = \Phi^{-1} \left( H_p \left\{ \frac{1}{2} \left( (x_i - x_{i-1})' \Sigma_g^{-1} (x_i - x_{i-1}) \right) \right\} \right) \tag{13}$$

dengan

$\Phi(\cdot)$  = fungsi distribusi kumulatif dari distribusi normal standar

$H(\cdot)$  = fungsi distribusi kumulatif dari distribusi *chi-square* dengan derajat bebas  $p$

dimana  $Z_i$  dan  $V_i$  berdistribusi normal standar, penggunaan pendekatan distribusi normal standar menyebabkan nilai statistik  $Z_i$  dan  $V_i$  berada di antara  $-\infty$  sampai  $\infty$ . Sehingga statistik dari diagram Max-Mchart untuk pengamatan individu dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$M_i^l = \max\{|Z_i|, |V_i|\}, i = 1, 2, \dots, n \tag{14}$$

Batas kontrol diagram Max-Mchart dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan *bootstrap*.  $M_1^l, M_2^l, \dots, M_n^l$  merupakan statistik diagram Max-Mchart pada proses *in control*. Jika  $M_{(1)}^{l(l)}, M_{(2)}^{l(l)}, \dots, M_{(B)}^{l(l)}$  merupakan kumpulan dari  $B$  banyaknya sampel *bootstrap* yang diambil secara random dari statistik  $M_1^l, M_2^l, \dots, M_n^l$  dengan pengambilan dan replikasi ke- $l$  dengan  $l = 1, 2, \dots, N$ . Maka batas kontrol untuk diagram Max-Mchart untuk pengamatan individu dapat dituliskan sebagai berikut.

$$UCL = \sum_{l=1}^N \frac{M_{(100(1-\alpha)),l}^{IH}}{N} \tag{15}$$

UCL diagram Max-Mchart bernilai semakin besar apabila karakteristik kualitas ( $p$ ) yang digunakan semakin banyak [5].

**G. Maximum Half-Normal Multivariate Control Chart (Max-Half-Mchart)**

Diagram *Maximum Half-Normal Multivariate Control Chart* (Max-Half-Mchart) merupakan pengembangan dari diagram Max-Mchart. Diagram Max-Mchart dengan pendekatan distribusi normal standar dapat memberikan hasil yang kurang tepat apabila nilai peluang dari distribusi *chi-square* mendekati 0 dan nilai kuantil dari distribusi normal standar bernilai negatif yang besar, sehingga nilai absolut negatif akan terdeteksi sebagai *signal out of control*. Diagram Max-Half-Mchart menggunakan pendekatan distribusi half-normal untuk menghindari nilai negatif pada perhitungan nilai kuantil karena memiliki nilai asal dari 0 hingga  $\infty$  [5].

Statistik diagram Max-Half-Mchart juga merupakan gabungan dari statistik rata-rata  $T^2$  Hotelling pengatan individu dan statistik variabilitas dengan pendekatan *successive difference*. isalkan  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$  adalah variabel random berdistribusi normal multivariat  $N(\mu_0, \Sigma_0)$  dengan  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})'$  merupakan vektor  $x$  ke- $i$  berukuran  $p \times 1$  dengan  $p$  menyatakan banyaknya karakteristik kualitas dan  $i = 1, 2, \dots, n$  menyatakan banyaknya pengamatan. Statistik rata-rata dan variabilitas diagram Max-Half-Mchart dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$Z_i = Q^{-1}(H_p\{(x_i - \mu_0)' \Sigma_0^{-1}(x_i - \mu_0)\}) \tag{16}$$

$$V_i = Q^{-1}\left(H_p\left\{\frac{1}{2}(x_i - x_{i-1})' \Sigma_0^{-1}(x_i - x_{i-1})\right\}\right) \tag{17}$$

dengan

$Q(\cdot)$  = fungsi distribusi kumulatif dari distribusi half-normal

$H(\cdot)$  = fungsi distribusi kumulatif dari distribusi *chi-square* dengan derajat bebas  $p$

dimana  $Z_i$  dan  $V_i$  berdistribusi half-normal, penggunaan pendekatan distribusi half-normal menyebabkan nilai statistik  $Z_i$  dan  $V_i$  berada di antara 0 sampai  $\infty$ . Sehingga statistik dari diagram Max-Half-Mchart dapat didefinisikan sebagai berikut [6].

$$M_i^{IH} = \max\{Z_i, V_i\}, i = 1, 2, \dots, n \tag{18}$$

Batas kontrol diagram Max-Half-Mchart dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan *bootstrap* pada statistik diagram Max-Half-Mchart pada proses *in control*. Pendekatan *bootstrap* dapat digunakan untuk mengestimasi batas kontrol suatu diagram tanpa memerlukan asumsi distribusi dari statistiknya.  $M_1^{IH}, M_2^{IH}, \dots, M_n^{IH}$  merupakan statistik diagram Max-Half-Mchart untuk pengamatan individu yang dihitung pada proses *in control*. Jika  $M_{(1)}^{IH(l)}, M_{(2)}^{IH(l)}, \dots, M_{(B)}^{IH(l)}$  merupakan kumpulan dari  $B$  banyaknya sampel *bootstrap* yang diambil secara random dari statistik  $M_1^{IH}, M_2^{IH}, \dots, M_n^{IH}$  dengan pengambilan dan replikasi ke- $l$  dengan  $l = 1, 2, \dots, N$ . Maka batas kontrol untuk diagram Max-Half-Mchart dapat dituliskan sebagai berikut.

$$UCL = \sum_{l=1}^N \frac{M_{(100(1-\alpha)),l}^{IH}}{N} \tag{19}$$

UCL diagram Max-Half-Mchart bernilai semakin besar apabila karakteristik kualitas ( $p$ ) yang digunakan semakin banyak [6].

**H. Analisis Kapabilitas Proses**

Analisis kapabilitas menunjukkan seberapa baik proses memenuhi toleransi atau spesifikasi yang ditentukan [12]. Kapabilitas proses dirumuskan sebagai berikut.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \tag{20}$$

dengan USL adalah batas spesifikasi atas, LSL batas spesifikasi bawah, serta  $\sigma$  nilai standar deviasi sampel. Nilai batas spesifikasi (mencakup USL dan LSL) diperoleh dari baku mutu yang telah ditetapkan oleh perusahaan, sedangkan batas kendali (pada diagram Max-Half-Mchart berupa UCL) dihitung dari hasil produksi. Untuk spesifikasi satu arah digunakan CPU dan CPL seperti berikut.

$$CPU = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \tag{21}$$

$$CPL = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \tag{22}$$

dengan  $\mu$  adalah garis tengah untuk diagram kontrol rata-rata.  $C_{pk}$  dapat diperoleh sebagai berikut.

$$C_{pk} = \min(CPU, CPL) \tag{23}$$

Perhitungan  $C_p$  dan  $C_{pk}$  pada kasus multivariat adalah sebagai berikut.

$$MC_p = \sum_{k=1}^p D_k C_p(x_k) \tag{24}$$

$$MC_{pk} = \sum_{k=1}^p D_k C_{pk}(x_k) \tag{25}$$

$D_k$  merupakan pembobotan dengan  $\sum_{k=1}^p D_k = 1$ . Kriteria penilaian  $MC_p$  dan  $MC_{pk}$  yaitu apabila nilai yang didapatkan kurang dari 1 maka kinerja proses tidak bagus atau tidak kapabel secara multivariat, jika lebih dari 1 maka kinerja proses tersebut bagus atau kapabel.

**I. Proses Produksi Semen PCC PT Semen Bosowa Banyuwangi**

Proses produksi semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi mulai dari pengadaan material hingga pengemasan adalah sebagai berikut.

1. Penyimpanan material  
Material dikirim melalui jalur laut dan jalur darat, kemudian material disimpan.
2. Pengangkutan material  
Material diangkut menggunakan *belt conveyor* menuju *dosing*.
3. Penyesuaian jumlah material  
Material yang berada di dalam *dosing* akan ditakar sesuai dengan ketentuan sebelum menuju *cement mill*.
4. Pencampuran material  
Material dicampur dan ditambahkan *cement grinding aid* yang dapat meningkatkan efisiensi penggilingan dan mengurangi konsumsi energi.
5. Penggilingan  
Material yang masuk ke dalam *vertical cement mill* akan digiling menggunakan *roller* untuk menghaluskan dan mencampur seluruh material.
6. Penyaringan  
Semen halus akan disaring menggunakan *classifier* dan dipindahkan menuju silo semen menggunakan *air slide*.
7. Pengujian  
Kualitas semen diuji oleh *Quality Assurance and Quality Control Department*.
8. Pengemasan  
Semen yang telah memenuhi standar akan diarahkan menuju mesin *packer* dan dikemas dalam ukuran 40 kg dan 50 kg.

**III. METODE PENELITIAN**

**A. Sumber Data**

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data sekunder berupa *blaine*, residu, dan *free lime* semen PCC yang diperoleh melalui pengujian laboratorium proses PT Semen Bosowa Banyuwangi pada bulan Agustus 2021 hingga Januari 2022. Terdapat 96 data yang akan dibagi menjadi fase I dan fase II. Fase I merupakan 80 data pertama, yaitu data pada bulan Agustus 2021 hingga Desember 2021 dan 16 data terakhir akan digunakan sebagai data fase II, yaitu data pada bulan Januari 2022.

**B. Variabel Penelitian**

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini mengenai karakteristik kualitas semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi berupa *blaine*, residu, dan *free lime* dengan batas spesifikasi ditunjukkan pada Tabel 1 sebagai berikut.

**Tabel 1** Batas Spesifikasi Semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi

Karakteristik Kualiatas	Batas Spesifikasi
<i>Blaine</i>	min 3.800 cm <sup>2</sup> /gram
Residu	max 8%
<i>Free lime</i>	max 1,5%

Definisi masing-masing karakteristik kualitas semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi yang diamati adalah sebagai berikut.

1. *Blaine*  
*Blaine* merupakan kehalusan semen yang dinyatakan dalam luas permukaan spesifik semen yang dihitung sebagai luas permukaan total dalam satuan cm<sup>2</sup>/gram.
2. Residu  
Residu merupakan persentase tertahan semen pada ayakan 45µm.
3. *Free lime*  
*Free lime* merupakan % kadar kapur bebas yang terkandung dalam semen dengan cara *volumetri*.

**C. Langkah Analisis**

Langkah analisis pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Merumuskan masalah dan tujuan.
2. Mengambil data sekunder.
3. Mendeskripsikan masing-masing variabel karakteristik kualitas semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi.



4. Melakukan uji dependensi dan uji distribusi normal multivariat.
5. Mendapatkan pengamatan *in control* menggunakan justifikasi diagram *Generalized Variance* (GV) dan  $T^2$  Hotelling.
6. Menghitung statistik diagram Max-Mchart fase I dengan tahapan sebagai berikut.
  - a. Menghitung statistik rata-rata  $T^2$  Hotelling pada persamaan (10).
  - b. Menghitung statistik variabilitas proses melalui pendekatan persamaan (11).
  - c. Mendapatkan fungsi transformasi statistik rata-rata dengan pendekatan distribusi normal standar pada persamaan (12).
  - d. Mendapatkan fungsi transformasi statistik variabilitas dengan pendekatan distribusi normal standar pada persamaan (13).
  - e. Mendapatkan statistik untuk diagram Max-Mchart untuk pengamatan individu berdasarkan persamaan (14).
7. Menentukan batas kontrol diagram Max-Mchart fase I dengan pendekatan *bootstrap* dengan langkah sebagai berikut.
  - a. Menetapkan  $\alpha = 0,0027$ . Nilai ini dipilih agar mendapatkan diagram kendali dengan batas kendali sebesar  $3\sigma$ .
  - b. Untuk perulangan  $l = 1, 2, \dots, 1000$  melakukan langkah-langkah sebagai berikut.
    - i. Meresampling data fase I *in control* yang diperoleh dari justifikasi diagram *Generalized Variance* (GV) dan  $T^2$  Hotelling dengan pengembalian sebanyak  $n = 1000$  sampel.
    - ii. Menghitung nilai statistik simultan diagram Max-Mchart.
    - iii. Meresampling statistik Max-Mchart sebanyak  $N = 1000$  kali.
    - iv. Menghitung persentil  $(1 - \alpha)$  dari hasil langkah b-iii.
  - c. Menghitung UCL berdasarkan persamaan (15).
8. Memplotkan diagram Max-Mchart fase I, jika diperoleh pengamatan *out of control* dilakukan identifikasi dengan kriteria sebagai berikut.
  - a. Jika nilai statistik rata-rata  $Z_i > UCL$ , maka teridentifikasi  $M^{++}$  atau teridentifikasi terjadi pergeseran pada rata-rata proses.
  - b. Jika nilai statistik variabilitas  $V_i > UCL$ , maka teridentifikasi  $V^{++}$  atau teridentifikasi terjadi pergeseran pada variabilitas proses.
  - c. Jika nilai statistik  $Z_i > UCL$  dan  $V_i > UCL$  maka teridentifikasi  $B^{++}$  atau teridentifikasi terjadi pergeseran pada rata-rata proses dan variabilitas proses.
9. Menghitung statistik diagram Max-Half-Mchart fase I dengan tahapan sebagai berikut.
  - a. Menghitung statistik rata-rata  $T^2$  Hotelling pada persamaan (10).
  - b. Menghitung statistik variabilitas proses melalui pendekatan persamaan (11).
  - c. Mendapatkan fungsi transformasi statistik rata-rata dengan pendekatan distribusi half-normal pada persamaan (16).
  - d. Mendapatkan fungsi transformasi statistik variabilitas dengan pendekatan distribusi half-normal pada persamaan (17).
  - e. Mendapatkan statistik untuk diagram Max-Half-Mchart berdasarkan persamaan (18).
10. Menentukan batas kontrol diagram Max-Half-Mchart fase I dengan pendekatan *bootstrap* dengan langkah sebagai berikut.
  - a. Menentukan  $\alpha = 0,0027$ .
  - b. Untuk perulangan  $l = 1, 2, \dots, 1000$  melakukan langkah-langkah sebagai berikut.
    - i. Meresampling data fase I *in control* yang diperoleh dari justifikasi diagram *Generalized Variance* (GV) dan  $T^2$  Hotelling dengan pengembalian sebanyak  $n = 1000$  sampel.
    - ii. Menghitung nilai statistik simultan diagram Max-Half-Mchart.
    - iii. Meresampling statistik Max-Half-Mchart sebanyak  $N = 1000$  kali.
    - iv. Menghitung persentil  $(1 - \alpha)$  dari hasil langkah b-iii.
  - c. Menghitung UCL berdasarkan persamaan (19).
11. Memplotkan diagram Max-Half-Mchart fase I, jika diperoleh pengamatan *out of control* dilakukan identifikasi dengan kriteria sebagai berikut.
  - a. Jika nilai statistik rata-rata  $Z_i > UCL$ , maka teridentifikasi  $M^{++}$  atau teridentifikasi terjadi pergeseran pada rata-rata proses.
  - b. Jika nilai statistik variabilitas  $V_i > UCL$ , maka teridentifikasi  $V^{++}$  atau teridentifikasi terjadi pergeseran pada variabilitas proses.
  - c. Jika nilai statistik  $Z_i > UCL$  dan  $V_i > UCL$  maka teridentifikasi  $B^{++}$  atau teridentifikasi terjadi pergeseran pada rata-rata proses dan variabilitas proses.
12. Mengidentifikasi penyebab *out of control* menggunakan diagram ishikawa.
13. Menghitung statistik diagram Max-Mchart fase II menggunakan tahapan yang telah diuraikan pada Langkah 5, dimana vektor rata-rata dan matriks kovarians diperoleh dari pengamatan fase I diagram Max-Mchart yang telah *in control*.
14. Memplotkan diagram Max-Mchart fase II.
15. Menghitung statistik diagram Max-Half-Mchart fase II menggunakan tahapan yang telah diuraikan pada Langkah 8, dimana vektor rata-rata dan matriks kovarians diperoleh dari pengamatan fase I diagram Max-Half-Mchart yang

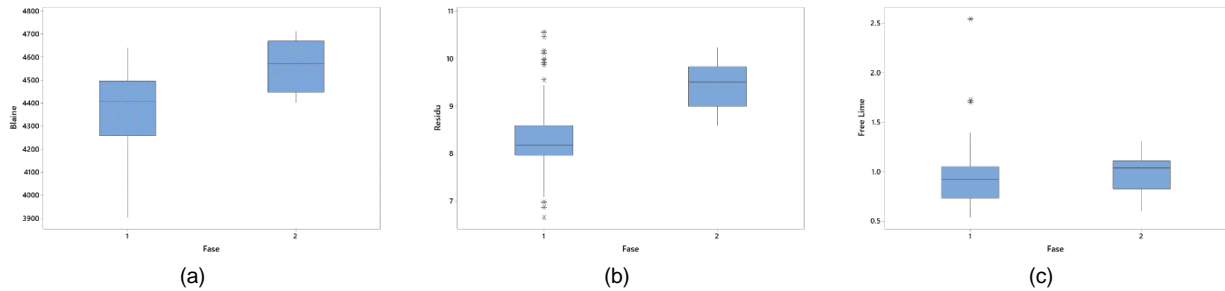
telah *in control*.

16. Memplotkan diagram Max-Half-Mchart fase II.
17. Menentukan kapabilitas proses produksi semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi.
18. Menarik kesimpulan dan saran

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### A. Karakteristik Kualitas Semen PCC

Persebaran data karakteristik kualitas semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi dapat ditunjukkan dengan menggunakan *boxplot* pada Gambar 1 sebagai berikut.



Gambar 1 *Boxplot* Karakteristik Kualitas Semen PCC (a) *Blaine*, (b) *Residu*, dan (c) *Free Lime*

Gambar 1 menunjukkan perbedaan karakteristik data fase I dan fase II masing-masing variabel pada semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi. Pada variabel *blaine* data fase II memiliki nilai *blaine* yang lebih tinggi dibandingkan dengan data fase I dan data hasil pengamatan *blaine* pada fase I dan fase II telah sesuai dengan spesifikasi. *Residu* pada fase II juga cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan fase I, selain itu pada fase II seluruh pengamatan memiliki residu yang melebihi batas spesifikasi. Terdapat *outlier* pada variabel residu fase I, residu yang terlalu tinggi pada semen PCC disebabkan oleh material yang digunakan terlalu keras, sehingga proses giling kurang maksimal. Kadar kapur bebas (*free lime*) pada fase I menunjukkan adanya pengamatan yang melebihi batas spesifikasi, sedangkan pada fase II sudah sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan oleh perusahaan. Adanya *outlier* pada variabel *free lime* disebabkan oleh oksidasi pada proses pembakaran klinker yang kurang maksimal, sehingga menyebabkan kadar kapur bebas semen PCC terlalu tinggi.

##### B. Uji Dependensi

Uji dependensi dengan menggunakan uji *Bartlett* dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat hubungan antar karakteristik kualitas semen PCC yang digunakan. Hasil uji *Bartlett* ditunjukkan pada Tabel 2 sebagai berikut.

**Tabel 2** Hasil Uji *Bartlett*

<i>Chi-square</i>	<i>df</i>	<i>P-value</i>
9,606	3	0,022

Nilai *chi-square* dengan  $\alpha = 5\%$  dan derajat bebas 3 adalah 7,815. Jika dibandingkan dengan hasil  $\chi^2_{hitung}$  sebesar 9,606, maka dapat diambil keputusan tolak  $H_0$  karena nilai  $\chi^2_{hitung} > \chi^2_{tabel}$ , yaitu  $9,606 > 7,815$ . Maka dapat disimpulkan terdapat hubungan antar variabel *blaine*, residu, dan *free lime*.

##### C. Penentuan Data in Control

Perhitungan statistik rata-rata untuk diagram Max-Mchart dan Max-Half-Mchart membutuhkan vektor rata-rata dan matriks kovarians dari data *in control*. Data *in control* merupakan data fase I yang telah terkendali secara statistik dengan menggunakan justifikasi diagram kontrol multivariat. Data pengamatan semen PCC fase I tidak mengikuti distribusi normal secara multivariat. Oleh karena itu, pada penelitian ini justifikasi untuk menentukan data *in control* dilakukan dengan membandingkan diagram MEWMV dan MEWMA yang merupakan diagram kontrol yang *robust* terhadap distribusi normal serta diagram kendali *Generalized Variance* (GV) dan  $T^2$  Hotelling dengan asumsi pengamatan mengikuti distribusi normal multivariat. Perbandingan diagram MEWMV dan MEWMA serta GV dan  $T^2$  Hotelling dapat ditunjukkan pada Tabel 3 sebagai berikut.

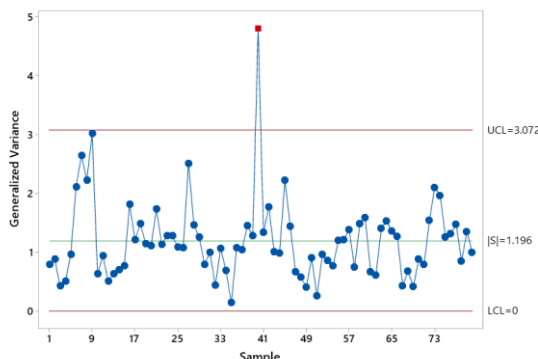
**Tabel 3** Perbandingan Diagram Justifikasi Pengamatan *in Control*

Jenis Diagram	Jenis Pergeseran	Banyaknya <i>out of control</i> yang terdeteksi
MEWMV dan MEWMA	Variabilitas (MEWMV)	18
	Rata-rata (MEWMA)	36
GV dan $T^2$ Hotelling	Variabilitas (GV)	1
	Rata-rata ( $T^2$ Hotelling)	6

Tabel 3 menunjukkan bahwa diagram MEWMV dan MEWMA menunjukkan jumlah pengamatan *out of control* lebih

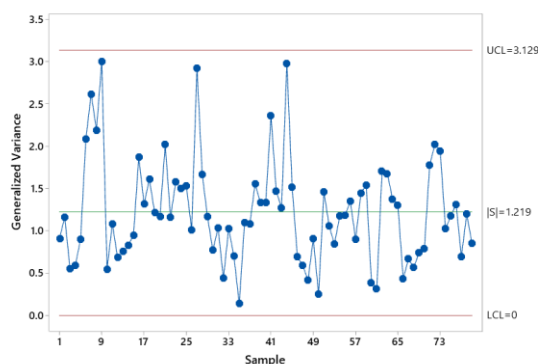
banyak dibandingkan dengan diagram GV dan  $T^2$  Hotelling. Hal tersebut menunjukkan bahwa diagram MEWMV dan MEWMA lebih sensitif dibandingkan diagram GV dan  $T^2$  Hotelling, namun pada penelitian ini akan dilakukan justifikasi pengamatan *in control* dengan menggunakan diagram GV dan  $T^2$  Hotelling meskipun asumsi data pengamatan berdistribusi normal multivariat tidak terpenuhi. Hal tersebut dikarenakan dengan diagram MEWMV dan MEWMA akan lebih banyak pengamatan yang dihapus untuk mendapatkan pengamatan *in control*, sehingga data yang digunakan untuk justifikasi data *in control* juga akan semakin sedikit.

Tahap pertama dari diagram kendali GV dan  $T^2$  Hotelling adalah melakukan pengendalian kualitas terhadap variabilitas proses menggunakan diagram kendali GV. Diagram kendali GV data fase I semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi yang terdiri dari 80 pengamatan pertama dapat ditunjukkan pada Gambar 2 sebagai berikut.



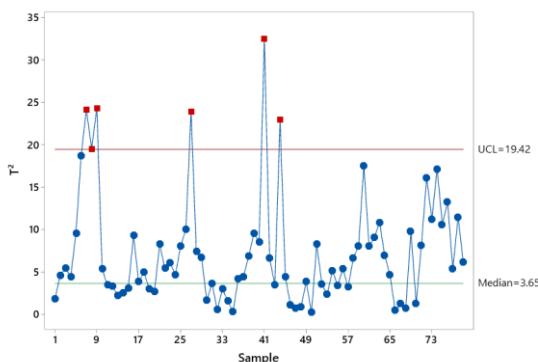
Gambar 2 Diagram GV Fase I

Gambar 2 menunjukkan adanya pengamatan yang *out of control*, yaitu pada pengamatan ke-40. Pengamatan tersebut dapat dihapus dari perhitungan untuk mendapatkan diagram GV yang terkendali secara statistik. Diagram GV setelah pengamatan *out of control* dihilangkan ditunjukkan pada Gambar 3 sebagai berikut.



Gambar 3 Diagram GV *in control*

Setelah dilakukan penghapusan pengamatan ke-40, diperoleh diagram GV yang terkendali secara statistik. Pengamatan *in control* pada diagram GV akan digunakan untuk melakukan perhitungan pada diagram  $T^2$  Hotelling. Diagram  $T^2$  Hotelling dapat ditunjukkan pada Gambar 4 sebagai berikut.



Gambar 4 Diagram  $T^2$  Hotelling Fase I

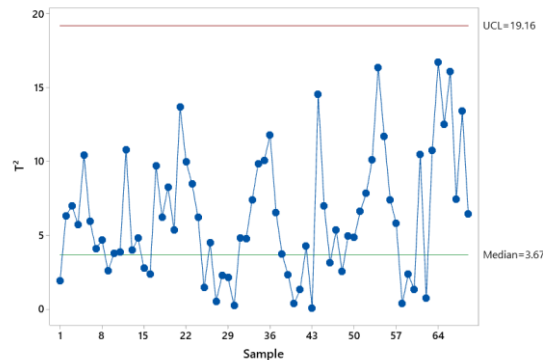
Gambar 4 menunjukkan pengamatan ke-7, 8, 9, 27, 41, dan 44 merupakan pengamatan *out of control*, dengan variabel penyebab *out of control* ditunjukkan pada Tabel 4 sebagai berikut.



Tabel 4 Variabel Penyebab *Out of Control*

Pengamatan	Variabel Penyebab <i>Out of Control</i>
7	Blaine
8	Blaine
9	Blaine dan residu
27	Residu dan <i>free lime</i>
41	Blaine, residu, dan <i>free lime</i>
44	<i>Free lime</i>

Setelah dilakukan identifikasi variabel penyebab *out of control*, pengamatan tersebut akan dihapus satu persatu dari perhitungan berdasarkan nilai statistik  $T^2$  yang terjauh dari batas kontrol hingga diperoleh diagram  $T^2$  Hotelling yang terkendali secara statistik. Setelah penghapusan 10 pengamatan *out of control*, diperoleh diagram  $T^2$  Hotelling yang ditunjukkan pada Gambar 5 sebagai berikut.



Gambar 5 Diagram  $T^2$  Hotelling *in Control*

Gambar 5 menunjukkan terdapat 69 pengamatan *in control* berdasarkan justifikasi diagram GV dan  $T^2$  Hotelling. Pengamatan tersebut akan digunakan sebagai justifikasi pengamatan *in control* untuk melakukan perhitungan statistik dan UCL diagram Max-Mchart dan Max-Half-Mchart fase I.

**D. Uji Distribusi Normal Multivariat**

Uji distribusi normal multivariat dengan uji *Shapiro Wilk* dilakukan untuk mengetahui apakah data hasil pengamatan mengikuti distribusi normal multivariat atau tidak. Hasil uji *Shapiro Wilk* ditunjukkan pada Tabel 5 sebagai berikut.

Tabel 5 Hasil Uji *Shapiro Wilk*

W	P-value
0,968	0,070

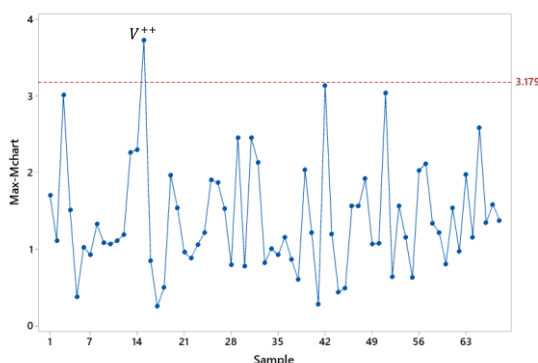
Menggunakan  $\alpha = 0,05$  jika dibandingkan dengan nilai *p-value* sebesar 0,070, maka dapat diambil keputusan gagal tolak  $H_0$  karena *p-value*  $> \alpha$ , yaitu  $0,070 > 0,05$ . Maka dapat disimpulkan bahwa data hasil pengamatan mengikuti distribusi normal multivariat.

**E. Diagram Maximum Multivariate Control Chart (Max-Mchart)**

Diagram Max-Mchart merupakan diagram kendali multivariat simultan untuk pengamatan individu. Statistik diagram Max-Mchart menggunakan pendekatan distribusi normal standar, sehingga nilai statistik dari diagram Max-Mchart berada di antara  $-\infty$  sampai  $\infty$ . Sehingga nilai statistik simultan dari diagram Max-Mchart merupakan nilai maksimum dari nilai absolut statistik rata-rata dan statistik variabilitasnya.

1) *Diagram Maximum Multivariate Control Chart (Max-Mchart) Fase I*

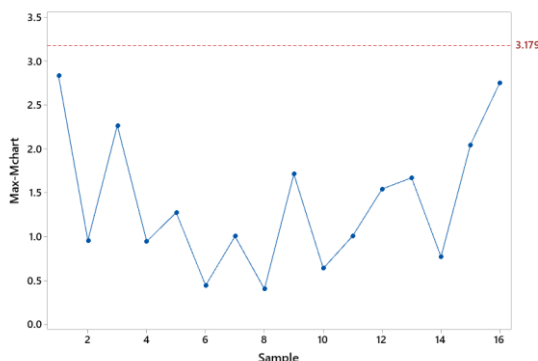
Data fase I untuk diagram Max-Mchart merupakan 69 data pengamatan *in control* yang diperoleh dengan justifikasi diagram GV dan  $T^2$  Hotelling sebagaimana diuraikan pada sub bagian C. Untuk mendapatkan nilai statistik diagram Max-Mchart diperlukan  $\mu_g$  yang merupakan vektor rata-rata dari pengamatan *in control* dan  $\Sigma_g$  yang merupakan matriks kovarians dari pengamatan *in control*. Perhitungan batas kontrol diagram Max-Mchart dilakukan dengan pendekatan *bootstrap*. Pendekatan *bootstrap* dilakukan dengan meresampling data *in control* yang diuraikan pada sub bagian C hingga diperoleh nilai persentil statistik dari diagram Max-Mchart dan dilakukan perulangan sebanyak  $N = 1.000$  kali. Batas kontrol diagram Max-Mchart dapat dihitung berdasarkan persamaan (15), sehingga diperoleh batas kontrol atas untuk diagram Max-Mchart fase I sebesar 3,179. Diagram Max-Mchart fase I dapat ditunjukkan pada Gambar 6 sebagai berikut.



Gambar 6 Diagram Max-Mchart Fase I

Gambar 6 menunjukkan terdapat statistik diagram Max-Mchart yang melebihi batas kontrol. Titik tersebut adalah  $M_{16}^I$ , yang menunjukkan adanya pergeseran pada variabilitas proses atau  $V^{++}$  karena hanya nilai statistik variabilitas  $|V_{16}| = 3,730$  yang lebih besar dari batas kontrol, sedangkan statistik rata-rata  $|M_{16}| = 0,652$  bernilai kurang dari batas kontrol. Berdasarkan hasil perhitungan statistik diagram Max-Mchart, statistik  $M_{16}^I$  *out of control* disebabkan oleh perhitungan CDF distribusi *chi-square* yang sangat kecil dan mendekati nol, sehingga nilai kuantil distribusi normal standar bernilai negatif yang cukup besar. Statistik diagram Max-Mchart yang diperoleh dari nilai maksimum dari absolut statistik rata-rata dan variabilitas menyebabkan, nilai negatif yang cukup besar pada perhitungan statistiknya teridentifikasi menjadi pengamatan yang *out of control*. Sehingga pengamatan tersebut tidak dapat dihapus dan dilanjutkan dengan diagram Max-Mchart fase II.

2) Diagram Maximum Multivariate Control Chart (Max-Mchart) Fase II



Gambar 7 Diagram Max-Mchart Fase II

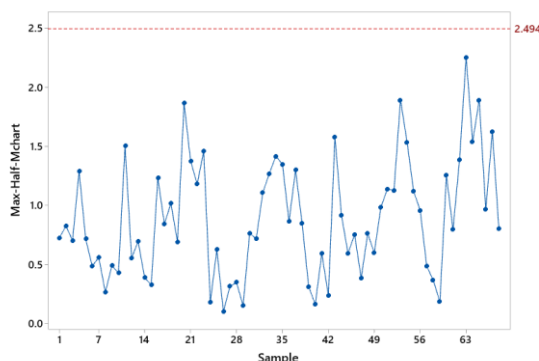
Data fase II merupakan 16 data pengamatan terakhir. Diagram Max-Mchart fase II ditunjukkan pada Gambar 7, dapat diketahui bahwa proses sudah terkendali secara statistik. Hal tersebut ditunjukkan dengan seluruh statistik diagram Max-Mchart berada di bawah garis UCL diagram Max-Mchart fase II, sehingga tidak teridentifikasi terjadi pergeseran pada rata-rata dan variabilitas proses.

F. Diagram Maximum Half-Normal Multivariate Control Chart (Max-Half-Mchart)

Diagram Max-Half-Mchart merupakan diagram kendali multivariat simultan yang dapat memonitor rata-rata dan variabilitas proses secara serentak. Statistik diagram Max-Half-Mchart diperoleh dengan menggunakan pendekatan distribusi half-normal, sehingga nilai statistik dari diagram Max-Half-Mchart berada di antara 0 sampai  $\infty$ . Karena itu, nilai statistik simultan dari diagram Max-Half-Mchart merupakan nilai maksimum dari statistik rata-rata dan statistik variabilitasnya.

1) Diagram Maximum Half-Normal Multivariate Control Chart (Max-Half-Mchart) Fase I

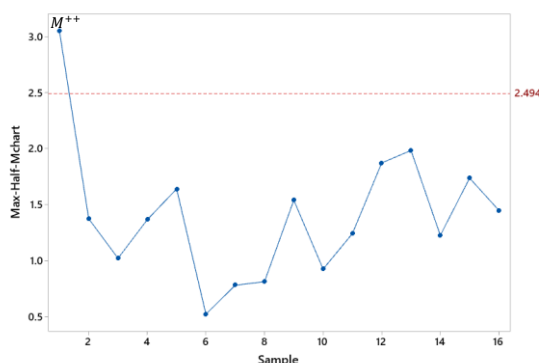
Batas kontrol diagram Max-Half-Mchart dihitung dengan pendekatan *bootstrap*. Pendekatan *bootstrap* dilakukan dengan meresampling data *in control* yang diperoleh dari justifikasi diagram kendali GV dan  $T^2$  Hotelling yang diuraikan pada sub bagian C hingga diperoleh nilai persentil statistik dari diagram Max-Half-Mchart dan dilakukan perulangan sebanyak  $N = 1.000$  kali. Batas kontrol diagram Max-Half-Mchart dapat dihitung berdasarkan persamaan (19), sehingga diperoleh batas kontrol atas untuk diagram Max-Half-Mchart fase I sebesar 2,494. Diagram Max-Half-Mchart fase I dapat ditunjukkan pada Gambar 8. Dapat diketahui bahwa seluruh statistik diagram Max-Half-Mchart berada di bawah batas kontrol. Hal tersebut menunjukkan bahwa tidak terjadi pergeseran pada rata-rata maupun variabilitas proses pada diagram Max-Half-Mchart, sehingga dapat dilanjutkan dengan diagram Max-Half-Mchart fase II.



Gambar 8 Diagram Max-Half-Mchart Fase I

2) Diagram Maximum Half-Normal Multivariate Control Chart (Max-Half-Mchart) Fase II

Gambar 9 menunjukkan terdapat statistik diagram Max-Half-Mchart yang melebihi batas kontrol. Titik tersebut adalah  $M_1^{H}$ , yang menunjukkan adanya pergeseran pada rata-rata proses atau  $M^{++}$  karena hanya nilai statistik rata-rata  $M_1 = 3,051$  yang lebih besar dari batas kontrol, sedangkan statistik rata-rata  $V_1 = 1,171$  bernilai kurang dari batas kontrol. Berdasarkan hasil diskusi dengan pihak perusahaan, penyebab titik tersebut *out of control* adalah bahan baku yang berasal dari sumber berbeda memiliki karakteristik yang berbeda pula, sehingga menyebabkan mesin tidak stabil dalam memaksimalkan hasil produksi.



Gambar 9 Diagram Max-Half-Mchart Fase II

G. Perbandingan Diagram Max-Mchart dan Max-Half-Mchart

Perbandingan diagram Max-Mchart dan diagram Max-Half-Mchart dilakukan untuk mengetahui diagram manakah yang lebih sesuai dan lebih sensitif dalam memonitor kualitas semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi pada penelitian ini. Perbandingan kedua diagram dapat dilakukan dengan membandingkan jumlah titik pengamatan yang *out of control* pada masing-masing diagram. Perbandingan jumlah titik pengamatan *out of control* pada diagram Max-Mchart dan diagram Max-Half-Mchart ditunjukkan pada Tabel 6. Dapat diketahui bahwa diagram Max-Mchart mendeteksi pengamatan *out of control* pada fase I, namun hal tersebut disebabkan karena statistik variabilitas bernilai negatif yang cukup besar. Diagram Max-Half-Mchart mampu mendeteksi pengamatan *out of control* pada fase II yang teridentifikasi terjadi pergeseran pada rata-rata proses.

Tabel 6 Perbandingan Diagram Max-Mchart dan Max-Half-Mchart

Jenis Diagram	Fase	Jenis Pergeseran	Titik <i>out of control</i>	Banyaknya <i>out of control</i> yang terdeteksi
Diagram Max-Mchart	Fase I	Variabilitas	16	1
		Rata-rata	-	0
		Variabilitas dan rata-rata	-	0
	Fase II	Variabilitas	-	0
		Rata-rata	-	0
		Variabilitas dan rata-rata	-	0
Diagram Max-Half-Mchart	Fase I	Variabilitas	-	0
		Rata-rata	-	0
		Variabilitas dan rata-rata	-	0
	Fase II	Variabilitas	-	0
		Rata-rata	1	1
		Variabilitas dan rata-rata	-	0

**H. Analisis Kapabilitas Proses**

Analisis kapabilitas proses dilakukan untuk mengetahui apakah data hasil pengamatan semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi telah sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan oleh perusahaan. Hasil analisis kapabilitas semen PCC ditunjukkan pada Tabel 7 sebagai berikut.

**Tabel 7** Analisis Kapabilitas Proses Semen PCC

Variabel	$C_{pk}$	$D_k$	$MC_{pk}$
Blaine	1,68	0,35	0,588
Residu	-0,18	0,35	-0,063
Free lime	1,76	0,30	0,528
<b>Total</b>		1	1,053

Bobot tiap variabel ditentukan berdasarkan hasil diskusi dengan pihak perusahaan. Berdasarkan nilai  $C_{pk}$  variabel *blaine* dan *free lime* yang sudah lebih dari satu menunjukkan bahwa *blaine* dan *free lime* semen PCC telah sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan oleh perusahaan. Pada variabel residu  $C_{pk}$  bernilai negatif yang berarti rata-rata dari data hasil pengamatan berada di luar batas spesifikasi. Sehingga hasil kapabilitas secara multivariat diperoleh nilai  $MC_{pk}$  sebesar 1,053 yang berarti hasil produksi semen PCC secara keseluruhan telah sesuai dengan ketentuan perusahaan. Karena nilai  $MC_{pk}$  sudah lebih dari satu, maka proses produksi semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi telah kapabel.

**V. KESIMPULAN DAN SARAN**

**A. Kesimpulan**

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil analisis pengendalian kualitas semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi menggunakan diagram Max-Half-Mchart pada fase I telah *in control*. Pada fase II menunjukkan adanya pengamatan *out of control* yang teridentifikasi adanya pergeseran pada rata-rata proses.
2. Pengukuran kapabilitas proses produksi semen PCC di PT Semen Bosowa Banyuwangi menggunakan analisis kapabilitas proses secara multivariat. Hasil perhitungan indeks kapabilitas secara multivariat diperoleh nilai  $MC_{pk}$  sebesar 1,053 yang berarti hasil produksi semen PCC secara keseluruhan telah sesuai dengan ketentuan perusahaan, sehingga proses telah kapabel.

**B. Saran**

Berdasarkan hasil analisis dan kesimpulan yang diperoleh, saran yang dapat diberikan kepada pihak PT Semen Bosowa Banyuwangi adalah diperlukan perbaikan proses karena masih terdapat titik-titik pengamatan yang berada di luar batas kontrol. Selain itu, pengendalian kualitas statistik menggunakan diagram kendali dapat menjadi pertimbangan dalam memonitor kualitas semen yang dihasilkan. Saran untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat dilakukan identifikasi variabel penyebab titik pengamatan *out of control*. Untuk penelitian selanjutnya, penggunaan diagram kontrol berbasis MEWMA [13]-[15] perlu untuk dipertimbangkan untuk meningkatkan sensitifitas diagram.

**REFERENCES**

[1] D. Montgomery, *Statistical Quality Control*, New York: Wiley, 2012.  
 [2] Badan Standarisasi Nasional, *Semen Portland Komposit*, 2004.  
 [3] I. Purnawan and A. Prabowo, "Pengaruh Penambahan Limestone terhadap Kuat Tekan Semen Portland Komposit," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 11, pp. 86-93, 2017.  
 [4] H. Khusna, M. Mashuri and Wibawati, "Vector Autoregressive-Based Maximum MCUSUM Control Chart for Monitoring the Quality of White Crystal Sugar," *Journal of Physics : Conference Series*, 2021.  
 [5] S. W. Cheng and K. Thaga, "Multivariate Max-CUSUM Chart," *Quality Technology & Quantitative Management*, pp. 221-234, 2005.  
 [6] R. Kruba, *Pengembangan Diagram Kontrol Multivariat Simultan untuk Pengamatan Individual*, Surabaya: ITS, 2022.  
 [7] R. Kruba, M. Mashuri and D. D. Prastyo, "The effectiveness of Max-half-Mchart over Max-Mchart in simultaneously monitoring process mean and variability of individual observations," *Quality and Reliability engineering International*, 2021.  
 [8] W. W. Daniel, *Statistika Nonparametrik Terapan*, Jakarta: Gramedia, 1989.  
 [9] Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, Arizona: John Wiley & Sons Inc, 2020.  
 [10] S. SS and W. MB, "An analysis of variance test for normality (complete samples)," *Biometrika*, vol. 52, pp. 591-611, 1965.  
 [11] C. Daniel, "Use of half-normal plots in interpreting factorial two-level experiments," *Technometrics*, vol. 1, pp. 311-341, 1959.  
 [12] Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control Seventh Edition*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2013.  
 [13] N. Sulistiawanti, M. Ahsan, and H. Khusna, "Multivariate Exponentially Weighted Moving Average (MEWMA) and Multivariate Exponentially Weighted Moving Variance (MEWMV) Chart Based on Residual XGBoost Regression for Monitoring Water Quality.," *Eng. Lett.*, vol. 31, no. 3, 2023.  
 [14] H. Khusna, M. Mashuri, S. Suhartono, D. D. Prastyo, and M. Ahsan, "Multioutput least square SVR based multivariate EWMA control chart: The performance evaluation and application," *Cogent Eng.*, Oct. 2018, doi: 10.1080/23311916.2018.1531456.  
 [15] H. Khusna, M. Mashuri, Suhartono, D. D. Prastyo, and M. Ahsan, "Multioutput Least Square SVR Based Multivariate EWMA Control Chart," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1028, no. 1, p. 12221, 2018.