

Pengendalian Kualitas Proses Produksi Hasil Gula Kristal Putih di Pabrik Gula Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI Menggunakan Diagram Kontrol *Maximum Multivariate Cumulative Sum* (Max-MCUSUM) Berbasis Residual Model *Multioutput Least Square Support Vector Regression* (MLS-SVR)

Annisa Yunika dan Muhammad Ahsan
Departemen Statistika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: muh.ahsan@its.ac.id

Abstrak—Gula yang merupakan bahan dasar pokok digunakan masyarakat sebagai pemanis dan juga pengawet makanan. Salah satu perusahaan agribisnis yang bergerak fokus pada produksi gula yaitu PT Perkebunan Nusantara XI (PTPN XI). Gula kristal putih adalah gula tebu atau bit yang melalui proses kristalisasi yang digunakan untuk konsumsi rumah tangga yang telah dijelaskan peraturan SNI 3140.3:2010. Pabrik Gula Djatiroto merupakan salah satu dari enam belas pabrik gula yang berada dibawah PTPN XI. Pada penelitian ini karakteristik kualitas yang digunakan yaitu warna larutan, besar jenis butir, dan kadar air yang masing-masing karakteristik kualitas memiliki hubungan. Hubungan pada ketiga variabel menunjukkan adanya kasus autokorelasi. Adanya autokorelasi menyebabkan false alarm dan mendapatkan pengambilan keputusan yang tidak tepat. Analisis yang digunakan yaitu dengan model algoritma *Multioutput Least Square Support Vector Regression* (MLS-SVR) untuk mengatasi data berautokorelasi dan dilakukan pengendalian menggunakan diagram kontrol Max-MCUSUM. *Input* model MLS-SVR ditentukan berdasarkan lag yang signifikan dari plot PACEF, dimana pada penelitian ini pada karakteristik kualitas warna larutan signifikan pada lag-1, 2, 11, dan 23, karakteristik kualitas besar jenis butir signifikan pada lag-1, 2, 3, dan 28, serta karakteristik kualitas kadar air signifikan pada lag-27. Hasil *input* model MLS-SVR dan kombinasi *hyper-parameter* optimal menghasilkan nilai residual yang dapat mengurangi autokorelasi. Nilai residual digunakan pada pembuatan diagram kontrol Max-MCUSUM. Pada fase I dengan $k = 0,5$ didapatkan diagram terkendali secara statistik setelah diatasi, dan pada fase II dengan menggunakan k yang sama menunjukkan tidak terdapat titik-titik yang keluar batas kontrol. Hasil identifikasi variabel penyebab *out of control* didapatkan variabel warna larutan dan besar jenis butir yang memiliki faktor-faktor yang menjadi penyebab terjadinya *out of control*. Hasil kapabilitas proses telah kapabel dan kinerja proses sudah baik secara multivariat.

Kata Kunci—Autokorelasi, Gula, Max-MCUSUM, MLS-SVR, Pengendalian Kualitas.

I. PENDAHULUAN

PERKEMBANGAN zaman yang semakin pesat dirasakan pada setiap aspek kehidupan salah satunya adalah bidang industri. Industri yang sedang mengalami peningkatan kebutuhan konsumsi seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk Indonesia yaitu pada bidang industri gula. Gula dapat dibedakan beberapa jenis dengan berdasarkan bahan dasarnya yaitu gula aren, gula kelapa dan gula tebu. Gula tebu

dibedakan menjadi tiga jenis yaitu Gula Kristal Putih (GKP), Gula Kristal Mentah (GKM), dan Gula Kristal Rafinasi. Gula kristal putih adalah gula tebu atau bit yang melalui proses kristalisasi yang digunakan untuk konsumsi rumah tangga yang telah dijelaskan peraturan SNI 3140.3:2010 [1]. Salah satu perusahaan agribisnis yang bergerak fokus pada produksi gula yaitu PT Perkebunan Nusantara XI (PTPN XI). Pabrik Gula Djatiroto merupakan salah satu dari enam belas pabrik gula yang berada dibawah PTPN XI. PG Djatiroto merupakan unit terbesar yang dapat menggiling tebu setiap harinya yaitu dapat menggiling sebesar 10.000ton tebu. Besarnya kapasitas tebu yang dapat menggiling dapat meningkatkan kualitas gula agar dapat dipasarkan ke masyarakat. Namun, masih adanya faktor kehilangan pada proses produksi gula dikarenakan kualitas gula yang tidak sesuai dengan standar yang telah ditetapkan sehingga untuk mengatasi masalah tersebut perlu dilakukan pengendalian kualitas pada proses produksi gula. Pengendalian kualitas dapat dilakukan dengan menggunakan diagram kontrol.

Pengendalian kualitas proses secara statistik dengan diagram kontrol terdapat asumsi yang harus dipenuhi yaitu antar pengamatan yang saling independen dan data mengikuti distribusi normal [2]. Apabila antar pengamatan karakteristik kualitas saling dependen, maka terdapat autokorelasi dari masing-masing karakteristik kualitas. Adanya autokorelasi menyebabkan false alarm (*Error* tipe I) dan mendapatkan pengambilan keputusan yang tidak tepat. Agar mendapatkan kesimpulan yang sesuai atau efektif, perlu dilakukannya cara untuk mengatasi autokorelasi dalam data. Terdapat beberapa penelitian yang menyarankan untuk mengatasi kasus tersebut yaitu dengan menggunakan *Support Vector Regression* (SVR) sebagai metode alternatif. *Support Vector Regression* (SVR) merupakan salah satu cara machine learning yang dapat memberikan solusi yang optimal. *Least Square Support Vector Regression* (LS-SVR) merupakan bentuk *Least Square* dari *Support Vector Regression* dengan mengganti metode pemrograman kuadrat dengan metode pemrograman linier [3]. Apabila karakteristik kualitas yang diamati lebih dari satu, maka akan menjadi *multioutput*.

Penelitian sebelumnya dilakukan oleh Aulia (2021) mengenai pengendalian kualitas proses produksi air di PDAM Tirtanadi Provinsi Sumatera Utara dengan diagram kontrol MEWMA berbasis residual model *Multioutput Least*

Square SVR (MLS-SVR) dan didapatkan dengan model MLS-SVR, variabel-variabel menunjukkan pola yang sesuai dengan data aktual pada proses produksi air di PDAM Tirtanadi [4]. Penelitian lainnya dilakukan oleh Angrenani (2020) mengenai pengendalian kualitas gula kristal putih (GKP) di Pabrik Gula Semboro PT Perkebunan Nusantara XI dengan menggunakan diagram kontrol *Maximum MCUSUM* dimana penelitian tersebut memperoleh hasil perhitungan statistik CUSUM dengan menggunakan batas interval (h) sebesar 59,98 didapatkan proses produksi GKP telah terkendali secara statistik.

Penelitian ini akan dilakukan pengendalian kualitas secara statistik pada produksi gula kristal putih menggunakan diagram kontrol Max-MCUSUM diduga diagram kontrol yang lebih efektif dikarenakan secara simultan dapat memonitor rata-rata dan variabilitas proses yang digunakan untuk mendeteksi adanya pergeseran kualitas yang kecil dengan berbasis residual model MLS-SVR dimana penerapan diagram kontrol ini menggunakan dua fase yaitu fase I yang digunakan untuk mendapatkan model yang dapat dianggap mewakili pada proses yang *in control* sehingga dari fase I akan didapatkan *hyper-parameter* optimal yang dapat digunakan untuk memodelkan fase II sedangkan fase II digunakan sebagai testing untuk mengetahui apakah data tetap *in control* atau tidak.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Statistika Deskriptif

Statistik deskriptif adalah metode statistik yang digunakan untuk meringkas dan menggambarkan data yang menonjol. Statistika deskriptif adalah metode-metode yang berkaitan dengan pengumpulan dan penyajian suatu gugus data sehingga memberikan informasi yang berguna. Informasi yang didapatkan dari statistika deskriptif adalah ukuran pemusatan dan ukuran penyebaran data [5]. Ukuran pemusatan data yang sering digunakan adalah mean, median, dan modus. Ukuran penyebaran data yang sering digunakan adalah *range*, *interquartile range*, varians, dan standar deviasi.

B. Pengendalian Kualitas Statistik

Pengendalian kualitas adalah kegiatan yang dapat mengukur kualitas produk, membandingkan dengan spesifikasi atau persyaratan yang tersedia dan mengambil tindakan yang sesuai apabila ada perbedaan antara penampilan yang sebenarnya dan yang standar. Dalam pengendalian kualitas mempunyai tujuh alat utama, yaitu histogram, *check sheet*, diagram pareto, diagram sebab akibat, *defect concecntration diagram*, *scatter diagram*, dan diagram kontrol [2].

C. Diagram Kontrol

Diagram ini digunakan untuk mengetahui apakah telah terjadi perubahan proses produksi, mendeteksi penyebab yang mempengaruhi proses dan membuat standar dari suatu proses [2]. Diagram kontrol (*control chart*) merupakan metode statistik yang membedakan adanya variasi atau penyimpangan karena sebab umum dan karena sebab khusus. Digunakan untuk mengendalikan proses produksi dengan mendeteksi penyebab variasi yang tidak alami (penyebab khusus) atau biasa disebut dengan proses *shift* (terjadinya

pergeseran proses) serta untuk meminimalkan variasi yang terdapat pada proses sehingga menghasilkan proses yang stabil serta kualitas yang unggul.

D. Uji Normal Multivariat

Uji normal multivariat merupakan uji yang digunakan untuk mengetahui apakah data atau pengamatan telah mengikuti distribusi normal secara multivariat atau tidak. Karakteristik kualitas Y_1, Y_2, \dots, Y_m dikatakan telah mengikuti distribusi normal multivariat dengan parameter μ dan Σ dan memiliki probability density function atau fungsi kepadatan normal yang ditunjukkan pada persamaan 1 [6]. Salah satu metode yang sering digunakan untuk melakukan pengujian distribusi normal multivariat adalah uji *Shapiro-Wilk* dengan pengujian hipotesis sebagai berikut.

H_0 : Data berdistribusi normal multivariat

H_1 : Data tidak berdistribusi normal multivariat

$$W^* = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m W_j \tag{1}$$

Dimana,

$$W_j = \frac{b^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})} \tag{2}$$

dengan b dapat dihitung berdasarkan n genap atau ganjil. Jika n genap, $l = n/2$ maka

$$b = \sum_{i=1}^l a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_{ik}) \tag{3}$$

Jika n ganjil, $l = (n-1)/2$ maka,

$$b = a_n (x_n - x_1) + \dots + a_{m+2} (x_{m+2} - x_m) \tag{4}$$

Dimana x_{m+1} merupakan median dan nilai a merupakan koefisien tabel *normality test*. Dengan taraf signifikansi α , Tolak H_0 apabila nilai $W^* < C_{\alpha, n, m}$ atau $p\text{-value} < \alpha$ dengan $C_{\alpha, n, m}$ merupakan quantil statistik *Shapiro Wilk* [7].

E. Uji Dependensi

Uji dependensi merupakan pengujian yang digunakan untuk melihat hubungan antar karakteristik kualitas yang digunakan. Pada uji dependensi dapat menggunakan uji *bartlett* yaitu untuk mengetahui apakah matriks korelasi sama dengan matriks identitas. Jika Y_1, Y_2, \dots, Y_m merupakan karakteristik kualitas, maka dikatakan saling bebas atau tidak berhubungan apabila matriks korelasi antar karakteristik kualitas membentuk matriks identitas [8].

H_0 : $\rho = I$ (tidak terdapat korelasi antar karakteristik kualitas)

H_1 : $\rho \neq I$ (terdapat korelasi antar karakteristik kualitas)

Statistik uji pada uji dependensi dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$\chi^2 = - \left(n - 1 - \frac{2m+5}{6} \right) \ln |R| \tag{5}$$

Tolak H_0 apabila nilai $\chi^2 \geq \chi^2_{\left(\alpha, \frac{1}{2}m(m-1) \right)}$ sehingga dapat disimpulkan bahwa terdapat korelasi antar variabel.

F. Autocorrelation Function dan Partial Autocorrelation Function

Autocorrelation Function (ACF) atau fungsi autokorelasi merupakan suatu representasi dari hubungan antara Y_i dan Y_{i+k} dari proses yang sama dan terpisah k lag waktu [9]. Dengan mengambil sampel dari populasi, maka ACF dapat dihitung dengan menggunakan seperti persamaan 6.

$$\hat{\rho}_k = \frac{\sum_{i=k+1}^n (Y_i - \bar{Y})(Y_{i-k} - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (6)$$

Partial Autocorrelation Function (PACF) merupakan alat untuk mengukur dari keeratan hubungan antara Y_i dan Y_{i+k} apabila pengaruh lag $i + 1, i + 2, \dots, i + k - 1$ dianggap terpisah. Dapat dituliskan persamaan PACF berikut.

$$\hat{\phi}_{k+1,k+1} = \frac{\hat{\rho}_{k+1} - \sum_{l=1}^k \hat{\phi}_{kl} \hat{\rho}_{k+1-l}}{1 - \sum_{l=1}^k \hat{\phi}_{kl} \hat{\rho}_l} \quad (7)$$

G. Multioutput Least Square Support Vector Regression (MLS-SVR)

Least Square Support Vector Regression (LS-SVR) mempelajari mengenai pemetaan input ke single output. Jika terdapat kasus yang diselesaikan dengan algoritma LS-SVR memiliki multioutput maka hubungan silang output dapat diabaikan dan single output regression dapat digeneralisasi menjadi multioutput regression [10].

Algoritma MLS-SVR dengan fungsi kernel pemetaan dari dimensi d menjadi dimensi h , dimana h merupakan Hilbert space yaitu dimensi yang lebih tinggi. Didapatkan fungsi MLS-SVR sebagai berikut.

$$\hat{f}(x) = \varphi(x)^T \bar{W} + (\bar{b})^T = \varphi(x)^T \text{repmat}(\bar{w}_0, 1, m) + \varphi(x)^T \bar{V} + (\bar{b})^T$$

$$\varphi(x)^T \text{repmat}(\sum_{j=1}^m Z \tilde{\alpha}_j, 1, m) + \frac{m}{\gamma'} \varphi(x)^T Z(\bar{A}) + \bar{b}^T = \text{repmat}(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \tilde{\alpha}_{ij} K(x, x_i), 1, m) + \frac{m}{\gamma''} \sum_{i=1}^n \tilde{\alpha}_i K(x, x_i) + \bar{b}^T \quad (8)$$

Fungsi kernel yang digunakan adalah Radial Basis Function (RBF) dimana fungsi ini digunakan untuk mengimplementasi-kan model pada dimensi yang lebih tinggi tanpa harus mendefinisikan fungsi pemetaan dari dimensi awal ke dimensi yang lebih tinggi. Fungsi kernel dapat ditulis dengan persamaan 8 sebagai berikut.

$$K(x, x_i) = \exp(-\sigma \|x - x_i\|^2) \quad (9)$$

Selanjutnya menentukan hyper-parameter dari model MLS-SVR dengan metode grid search [11]. Algoritma metode ini yaitu menjadikan titik-titik grid yang memiliki jarak yang sama, yang memiliki jarak yang sama, yang dapat dihitung ukuran kesalahan setiap titik-titik parameter. Pada metode grid search didapatkan hyper-parmaeter, dilakukan perhitungan Mean Square Error (MSE) dan hyper-parameter optimal dipilih berdasarkan rata-rata dari MSE terkecil. Berikut merupakan perhitungan MSE dan rata-rata dari MSE.

$$MSE_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2 \quad (10)$$

$$\overline{MSE} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m MSE_j \quad (11)$$

H. Diagram Kontrol Maximum Multivariate Cumulative Sum (Max-MCUSUM) Berbasis Residual Model MLS-SVR

Diagram kontrol Max-MCUSUM digunakan untuk memonitor kualitas produk dalam rata-rata dan variabilitas proses dalam satu diagram [12]. Apabila data tidak memenuhi asumsi saling independen, maka akan mengakibatkan diagram kontrol tidak berfungsi dengan baik. Hal ini

dikarenakan data memiliki autokorelasi akan menyebabkan adanya banyak false alarm.

Data yang memiliki autokorelasi dapat diatasi dengan algoritma MLS-SVR. Masing-masing output pengamatan data autokorelasi secara multivariat dapat ditentukan dengan signifikansi dalam PACF, input dari model MLS-SVR yaitu

$$X = (y_{1,(i-1)}, \dots, y_{1,(i-p_1)}, \dots, y_{j,(i-1)}, \dots, y_{j,(i-p_j)}, \dots, y_{m,(i-1)}, \dots, y_{m,(i-p_m)}, \dots)$$

dan didapatkan statistik dari Max-MCUSUM berbasis MLS-SVR diperoleh pembentukan variabel random Z_i berikut.

$$Z_i = \frac{(\mu_{e(b)} - \mu_{e(g)})^T \Sigma_{e(g)}^{-1} (e_i - \mu_{e(g)})}{\left[(\mu_{e(b)} - \mu_{e(g)})^T \Sigma_{e(g)}^{-1} (\mu_{e(b)} - \mu_{e(g)}) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

Ketika vektor residual e_i didapatkan dari shifted process, maka vektor mengalami pergeseran matriks kovarians $\Sigma_{e(b)}$ maka dapat dituliskan sebagai berikut.

$$W_i = \Phi^{-1} \left\{ H \left[(e_i - \mu_{e(g)})^T \Sigma_{e(b)}^{-1} (e_i - \mu_{e(g)}); m \right] \right\} \quad (13)$$

Variabel random Z_i dan W_i bersifat independen dan mengikuti distribusi normal. Berikut merupakan statistik diagram kontrol Max-MCUSUM berbasis model MLS-SVR.

$$M_{(r)i} = \max[C_{(r)i}, S_{(r)i}] \quad (14)$$

dimana $C_{(r)i}$ transformasi dari variabel random Z_i dan $S_{(r)i}$ transformasi dari variabel random W_i yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$C_{(r)i} = \max[C_{(r)i}^+, C_{(r)i}^-] \quad (15)$$

$$C_{(r)i}^+ = \max[0, Z_i - k + C_{(r)i-1}^+] \quad (16)$$

$$C_{(r)i}^- = \max[0, -k - Z_i + C_{(r)i-1}^-] \quad (16)$$

$$S_{(r)i} = \max[S_{(r)i}^+, S_{(r)i}^-] \quad (17)$$

$$S_{(r)i}^+ = \max[0, W_i - k + S_{(r)i-1}^+] \quad (18)$$

$$S_{(r)i}^- = \max[0, -k - W_i + S_{(r)i-1}^-] \quad (18)$$

dimana $C_{(r)0}$ dan $S_{(r)0}$ merupakan titik awal dan reference value $k > 0$ ditentukan pada saat pertama kali monitoring.

Statistik diagram kontrol Max-MCUSUM berbasis model MLS-SVR hanya dapat dibandingkan dengan UCL, ketika $M_{(r)i} \geq 0$. Dan dapat mendeteksi sinyal OC ketika M_i lebih dari UCL. Persamaan 19 merupakan perhitungan untuk upper control limit diagram kontrol Max-MCUSUM berbasis model MLS-SVR yaitu dapat diestimasi dengan menggunakan metode bootstrap yang merupakan salah satu metode resampling untuk mengestimasi parameter dengan distribusi yang tidak diketahui. Persamaan 19 merupakan perhitungan untuk batas kontrol atas atau upper control limit diagram kontrol Max-MCUSUM berbasis model MLS-SVR.

$$UCL = \frac{1}{N'} \sum_{l=1}^{N'} M_{(r)(100(1-\alpha))}^l \quad (19)$$

Dimana $M_{(100(1-\alpha))}^l = M_{((1-\alpha)B)}^l$ dan $l = 1, 2, \dots, N'$ replikasi. Batas kontrol atas pada diagram kontrol Max-MCUSUM berbasis model MLS-SVR dapat dilakukan

Tabel 2.
Variabel penelitian

Variabel	Keterangan	Satuan	Spesifikasi
y_1	Warna Larutan	IU	201-300
y_2	Besar Jenis Butir	Mm	0,8-1,2
y_3	Kadar Air	%	Maks 0,1

dengan menghitung statistik $M_{(r)i}$ yang kemudian membangkitkan data dengan *bootstrap* sebanyak B kali dan menentukan persentil sampel *bootstrap* yang kemudian menentukan batas kontrol atas.

I. Diagram Ishikawa

Diagram *Ishikawa* atau diagram sebab akibat adalah suatu alat untuk menganalisa mutu dengan tujuan untuk mengetahui secara menyeluruh hubungan antara kecacatan dengan penyebabnya, ini adalah satu-satunya alat bantu yang menggunakan data verbal (*non-numerical*) atau data kualitatif dalam penyajiannya. Alat bantu ini menggambarkan tentang suatu kondisi "penyimpangan mutu" yang dipengaruhi oleh bermacam-macam penyebab yang saling berhubungan [2].

J. Analisis Kapabilitas Proses

Pada kapabilitas proses terdapat beberapa indeks yaitu $C_p, C_{pk}, P_p,$ dan P_{pk} . Perbedaan penggunaan C dan P yaitu pada indeks C memerhatikan sampel data dan indeks P memerhatikan populasi data serta indeks C merupakan indeks yang digunakan untuk melihat jangka panjang sedangkan indeks P merupakan indeks yang digunakan untuk melihat jangka pendek. Selain itu, menurut *Automotive Industry Action Group* (AIAG) untuk menentukan indeks kapabilitas yang prosesnya telah *in control* atau telah terkendali secara statistik dapat menggunakan C_p dan C_{pk} . Sedangkan untuk proses yang tidak dalam keadaan *in control*, dapat menggunakan P_p dan P_{pk} [2]. Berikut merupakan perhitungan indeks dengan menggunakan C_p dan C_{pk} .

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

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl}) \tag{21}$$

dimana,

$$C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \tag{22}$$

$$C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \tag{23}$$

Dikarenakan pada penelitian ini menggunakan karakteristik kualitas yang lebih dari satu, maka menggunakan indeks kapabilitas proses secara multivariat dan dapat dilakukan perhitungan menggunakan persamaan sebagai berikut [13].

$$MC_p = \sum_{j=1}^n W_j C_p(Y_k) \tag{24}$$

$$MC_{pk} = \sum_{j=1}^n W_j C_{pk}(Y_k) \tag{25}$$

Dimana MC_p dan MC_{pk} merupakan bentuk C_p dan C_{pk} dalam bentuk multivariat dan W_j merupakan pembobot dari karakteristik kualitas yang ditetapkan oleh perusahaan.

Tabel 1.
Struktur data penelitian

Pengamatan	Karakteristik Kualitas		
	y_1	y_2	y_3
1	$y_{1.1}$	$y_{1.2}$	$y_{1.3}$
2	$y_{2.1}$	$y_{2.2}$	$y_{2.3}$
3	$y_{3.1}$	$y_{3.2}$	$y_{3.3}$
...
n	$y_{n.1}$	$y_{n.2}$	$y_{n.3}$

Apabila tidak terdapat pembobot untuk masing-masing karakteristik kualitas, maka nilai pembobot dianggap sama.

K. PT Perkebunan Nusantara XI

PT Perkebunan Nusantara XI (Persero) didirikan pada tanggal 14 Februari 1996 yang merupakan gabungan antara PT Perkebunan XX (Persero) dan PT Perkebunan XXIV-XXV (Persero) yang masing-masing didirikan berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia. PT Perkebunan Nusantara XI menjadi anak perusahaan dengan PT Perkebunan Nusantara III (Persero) sebagai Holding BUMN Perkebunan dimana *launching* Holding BUMN Perkebunan dilakukan bertempat di Kantor Pusat PT Perkebunan Nusantara XI Surabaya. Terdapat sembilan belas unit usaha di PT Perkebunan Nusantara XI yaitu enam belas unit pabrik gula, satu unit pabrik alkohol dan spiritus, satu unit pabrik karung, dan satu unit usaha strategis yang tersebar di wilayah Jawa Timur. Pabrik Gula Djatiroto merupakan salah satu unit yang berada di PT Perkebunan Nusantara XI Jawa Timur. Pabrik Gula Djatiroto terletak di Desa Kaliboto Lor, Kecamatan Djatiroto, Kabupaten Lumajang, Jawa Timur. Pabrik Gula Djatiroto merupakan unit yang memiliki kapasitas gula terbesar yang berada di PT Perkebunan Nusantara XI, dimana dapat menggiling 10.000ton tebu setiap harinya [14]. Terdapat tujuh tahapan atau stasiun pengolahan yang berada diproses produksi gula kristal putih di Pabrik Gula Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data sekunder dari hasil pengamatan kualitas gula kristal putih yang diperoleh dari divisi *quality assurance* PG Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI pada masa musim giling tebu yaitu 28 Mei 2021 – 25 Oktober 2021 dengan Fase I yaitu dari 28 Mei 2021 – 4 Oktober 2021 dan Fase II yaitu dari 5 Oktober 2021 – 25 Oktober 2021. Pengukuran kualitas dilakukan dengan pengambilan sampel sebanyak 50-gram setelah gula melewati *vibrating screen* yang selanjutnya diolah laboratorium. Pada penelitian ini menggunakan tiga karakteristik kualitas yaitu warna larutan, besar jenis butir, dan kadar air.

B. Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu terdapat tiga karakteristik kualitas yang telah dijelaskan pada Tabel 1.

C. Struktur Data

Struktur data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu disajikan pada Tabel 2. Dengan k eterangan n adalah Jumlah

Tabel 4.
Analisis karakteristik fase I

Karakteristik Kualitas	Rata-rata	Varian	Minimum	Median	Maksimum
Warna Larutan	255,5	382,73	196	257	290
Besar Jenis Butir	0,987	0,0015	0,91	1	1,04
Kadar Air	0,032	0,00008	0,02	0,04	0,04

observasi, dan $y_{n,m}$ adalah Jumlah observasi ke-n dan karakteristik kualitas ke-m.

D. Langkah Analisis

Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Merumuskan masalah dan menentukan tujuan penelitian.
2. Melakukan pengumpulan data dan menginput data kualitas gula kristal putih di Pabrik Gula Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI.
3. Melakukan analisis karakteristik pada setiap variable kualitas gula kristal putih di Pabrik Gula Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI.
4. Melakukan uji dependensi pada karakteristik kualitas gula kristal putih di Pabrik Gula Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI.
5. Melakukan pemeriksaan autokorelasi terhadap data kualitas gula kristal putih di Pabrik Gula Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI.
6. Melakukan pemodelan menggunakan algoritma *Multi output Least Square Support Vector Regression* (MLS-SVR) pada data fase I dan fase II. Jika adanya autokorelasi. Pemodelan dengan MLS-SVR fase I dicari *hyper-parameter* optimal, *lagrange multiplier*, dan parameter \tilde{b} yang digunakan untuk memodelkan data fase II. (1) Menentukan taraf signifikansi α dan nilai referensi k . (2) Menghitung signifikansi PACF dan menentukan *input* MLS-SVR. (3) Menghitung parameter MLS-SVR α dan \tilde{b} dan fungsi keputusan dari model MLS-SVR. (4) Menghitung residual dari model MLS-SVR yaitu selisih antara output dan fungsi keputusan kemudian rata rata MSE dari masing-masing karakteristik kualitas untuk mendapatkan parameter yang optimal.
7. Melakukan pemeriksaan asumsi diagram kontrol. Uji normalitas multivariat menggunakan uji *Saphiro-Wilk* dan pemeriksaan autokorelasi pada data residual menggunakan plot ACF.
8. Menganalisis data dengan menggunakan diagram control multivariat *Max-MCUSUM* dari data residual yang didapatkan dari pemodelan menggunakan algoritma MLS-SVR. Fase I digunakan untuk mendapatkan model yang dapat dianggap mewakili pada proses yang *in control*. Apabila terdapat pengamatan *out of control*, maka dicari *hyper-parameter* yang optimal sehingga data residual fase I yang telah *in control*. (1) Menghitung statistik Z_i . (2) Menghitung statistik W_i . (3) Menghitung statistik $C_{(r)i}^+$ dan $C_{(r)i}^-$. (4) Menghitung statistik $S_{(r)i}^+$ dan $S_{(r)i}^-$. (5) Menghitung statistik $C_{(r)i}$ dan $S_{(r)i}$. (6) Menghitung statistic $M_{(r)i}$. (7) Mengestimasi UCL

Tabel 3.
Analisis karakteristik fase II

Karakteristik Kualitas	Rata-rata	Varian	Minimum	Median	Maksimum
Warna Larutan	255,5	382,73	196	257	290
Besar Jenis Butir	0,987	0,0015	0,91	1	1,04
Kadar Air	0,032	0,00008	0,02	0,04	0,04

- menghitung statistik $M_{(r)i}$ yang kemudian membangkitkan data dengan bootstrap sebanyak B kali berdasarkan statistik $M_{(r)i}$ dan mengurutkan sampel nilai minimum ke nilai maksimum kemudian menentukan persentil dari sampel bootstrap yang kemudian dapat menentukan batas kontrol atas. (8) Membandingkan statistik M_i dengan UCL. Apabila salah satu dari statistik M_i lebih besar dari UCL, maka dapat mengidentifikasi pergeseran sebagai berikut. (i) Jika $C_i > UCL$ maka dapat ditandai dengan m+. Ini menunjukkan bahwa terjadi pergeseran vektor rata-rata proses. (ii) Jika $S_i > UCL$ maka dapat ditandai dengan v+. Ini menunjukkan bahwa terjadi pergeseran matriks kovarians. (iii) Jika $C_i > UCL$ dan $S_i > UCL$ maka dapat ditandai dengan m+v+. Ini menunjukkan bahwa terjadi pergeseran vektor rata-rata proses dan matriks kovarians.
9. Apabila proses tidak terkendali, maka mengidentifikasi variabel penyebab *out of control* dan membuat serta menginterpretasi diagram sebab akibat (*Ishikawa*).
 10. Menganalisis data dengan analisis kapabilitas proses.
 11. Menarik kesimpulan dan saran.

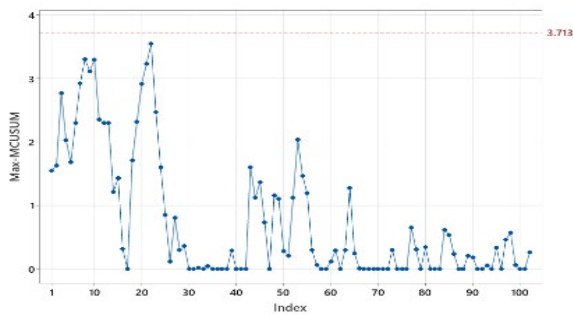
IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Karakteristik Data

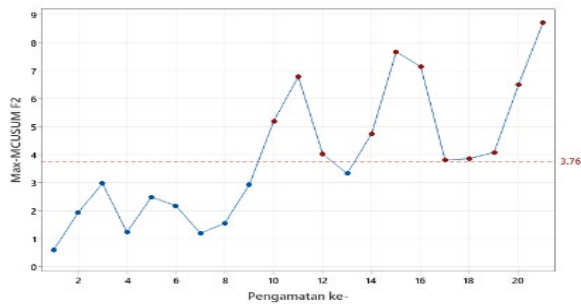
Sebelum melakukan analisis statistika deskriptif, data pengamatan akan dibagi menjadi fase I dan fase II untuk mendapatkan proses yang terkendali pada fase I. Tabel 3 merupakan analisis deskriptif dari masing-masing fase.

Tabel 3 menunjukkan rata-rata pada ketiga karakteristik kualitas berada di batas spesifikasi yang telah ditetapkan oleh perusahaan. Jika dilihat dari minimumnya, warna larutan memiliki nilai minimum yang berada di bawah batas spesifikasi yang ditetapkan oleh perusahaan dan varian atau persebaran data ketiga karakteristik kualitas memiliki nilai yang lebih kecil dari nilai rata-rata menunjukkan bahwa ketiga karakteristik kualitas cenderung homogen serta karakteristik kualitas besar jenis butir dan kadar air memiliki nilai yang rendah yang artinya kedua karakteristik kualitas memiliki data yang dekat. Berbeda dengan karakteristik kualitas warna larutan memiliki persebaran data yang tinggi yang artinya data warna larutan memiliki data yang tersebar.

Dilihat dari Tabel 4, rata-rata ketiga karakteristik kualitas hasil proses produksi gula di Pabrik Gula Djatiroto memiliki nilai yang berada di batas spesifikasi. Nilai varian atau persebaran data yang lebih kecil dari nilai rata-rata menunjukkan bahwa ketiga karakteristik kualitas pada fase II cenderung homogen. Hal ini dapat dilihat pada nilai



Gambar 1. Diagram kontrol Max-MCUSUM berbasis residual model MLS-SVR fase I.



Gambar 2. Diagram kontrol Max-MCUSUM berbasis residual model MLS-SVR fase II.

minimum dan nilai maksimum yang memiliki rentang nilai yang kecil.

B. Uji Dependensi

Sebelum analisis selanjutnya, dilakukan uji dependensi untuk mengetahui apakah ketiga karakteristik kualitas saling berhubungan atau tidak. Didapatkan nilai *Chi-Square* sebesar 8,820 dengan nilai *Chi-Square* tabel sebesar 7,81 didapatkan kesimpulan bahwa ketiga karakteristik kualitas proses produksi gula kristal putih di PG Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI pada fase I saling dependen. Hal ini juga dapat dilihat dari *p-value* sebesar 0,032 dan diperkuat teori yang ada di lapangan bahwa ketiga karakteristik kualitas yaitu warna larutan, besar jenis butir, dan kadar air saling berhubungan satu sama lain. Ketika kadar air gula kristal putih semakin tinggi, maka besar jenis butir akan semakin besar. Dan ketika besar jenis butir semakin besar, maka warna larutan gula yang terbentuk semakin cokelat.

C. Pengecekan Autokorelasi

Salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk melakukan analisis dengan diagram kontrol yaitu tidak adanya dependensi antar data pengamatan. Ketiga karakteristik kualitas hasil gula kristal putih di pabrik gula Djatiroto terjadi autokorelasi yang signifikan. Adanya autokorelasi pada data pengamatan proses hasil produksi gula disebabkan karena proses produksi dilakukan secara terus menerus sehingga perlu dilakukannya penggunaan pemodelan MLS-SVR untuk mengatasi adanya autokorelasi pada data.

Pemodelan Menggunakan MLS-SVR Fase I, karakteristik kualitas warna larutan signifikan pada lag-1, 2, 11, dan 23, karakteristik kualitas besar jenis butir signifikan pada lag-1, 2, 3, dan 28, serta karakteristik kualitas kadar air signifikan pada lag-27. *Input* model MLS-SVR pada fase I yang terbentuk $Y_{1(i-1)}, \dots, Y_{1(i-23)}, Y_{2(i-1)}, \dots, Y_{2(i-28)}, Y_{3(i-27)}$. *Input* yang dipilih yaitu model yang memiliki nilai MSE minimum yaitu dengan kombinasi *hyper-parameter* optimal

Tabel 5. Hasil kombinasi karakteristik kualitas identifikasi *out of control*

Kombinasi Karakteristik Kualitas	Keterangan	Banyak Pengamatan <i>Out of control</i>
Warna Larutan, Besar Jenis Butir, Kadar Air	<i>Out</i>	5
Warna Larutan dan Besar Jenis Butir	<i>Out</i>	19
Warna Larutan dan Kadar Air	<i>Out</i>	4
Besar Jenis Butir dan Kadar Air	<i>In</i>	0

$\gamma' = 2^{20}, \gamma'' = 2^{20}$, dan $\sigma = 2^{20}$ dengan nilai MSE sebesar 0,5571. Pemodelan MLS-SVR menggunakan fungsi kernel RBF dengan parameter σ .

Pola data nilai prediksi karakteristik kualitas warna larutan dari pemodelan MLS-SVR memiliki pola yang mirip dengan nilai data aktual fase I. Karakteristik kualitas besar jenis butir dapat dilihat bahwa pola data nilai prediksi karakteristik kualitas besar jenis butir memiliki pola yang mirip akan tetapi memiliki nilai yang cenderung dibawah dari nilai data aktual fase I. Dan karakteristik kualitas kadar air memiliki pola data nilai prediksi yang mirip dengan nilai aktual pada fase I. Begitu pula pada fase II menunjukkan bahwa pola nilai data prediksi pada karakteristik kualitas warna larutan menunjukkan hasil yang tidak terlalu berbeda dengan pola nilai data aktual. Berbeda dengan karakteristik kualitas besar jenis butir yang memiliki pola nilai data prediksi yang cenderung berbeda dengan pola nilai data aktualnya. Serta karakteristik kualitas kadar air yang juga memiliki pola nilai data cenderung berbeda dengan pola nilai data aktual. Hasil *time series plot* antara nilai prediksi model MLS-SVR dengan nilai aktual ketiga karakteristik kualitas gula kristal putih di Pabrik Gula Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI pada fase II memiliki pola yang cukup berbeda. Perbedaan pola ini akan diperiksa dengan diagram kontrol.

D. Diagram Kontrol Max-MCUSUM Berbasis Residual Model MLS-SVR

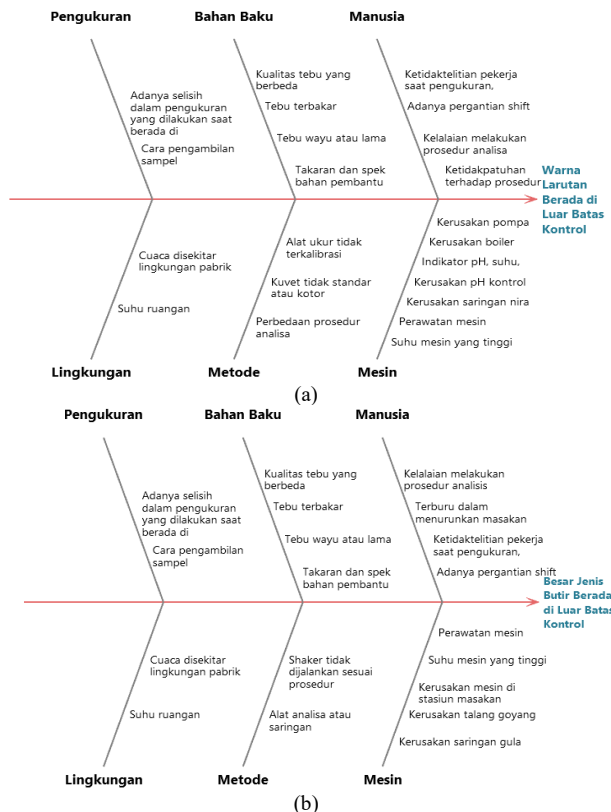
Batas kontrol pada fase I yaitu sebesar 3,713 dengan $k=0,5$ terdapat lima pengamatan yang berada diluar batas kontrol yang artinya residual model MLS-SVR proses produksi hasil gula belum terkendali secara statistik. Berikut merupakan diagram kontrol Max-MCUSUM yang telah diatas.

Gambar 1 merupakan diagram kontrol Max-MCUSUM berbasis residual model MLS-SVR fase I yang telah terkendali secara statistik setelah dilakukan tiga kali mengganti nilai residual pertama yang terindikasi sebagai *out of control* dengan nilai residual sebelumnya dan dapat dilanjutkan diagram kontrol Max-MCUSUM fase II. Berikut diagram kontrol Max-MCUSUM fase II dengan k dan α yang sama dengan fase I.

Gambar 2 adalah diagram kontrol Max-MCUSUM fase II dengan $k=0,5$ dan batas kontrol sebesar 3,713 terdapat 11 titik pengamatan yang berada diluar batas kontrol. Dapat dikatakan bahwa baik secara variabilitas proses produksi hasil gula kristal putih PG Djatiroto belum terkendali secara statistik.

E. Identifikasi Out of control

Identifikasi *out of control* atau OOC dilakukan untuk mengetahui karakteristik kualitas pada proses produksi hasil gula kristal putih yang menjadi penyebab adanya sinyal OOC.



Gambar 3. Diagram *ishikawa* a) warna larutan, b) besar jenis butir.

Dilakukan identifikasi penyebab *out of control* dengan melakukan kombinasi dua variabel karakteristik kualitas yaitu warna larutan dengan besar jenis butir, warna larutan dengan kadar air, dan besar jenis butir dengan kadar air menggunakan diagram kontrol Max-MCUSUM dengan $k=0,5$. Berikut hasil kombinasi karakteristik kualitas identifikasi *out of control*.

Tabel 5 menunjukkan bahwa pada kombinasi karakteristik kualitas warna larutan, besar jenis butir, dan kadar air proses produksi gula kristal putih di PG Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI dengan $k=0,5$ dan $UCL = 3,713$ memiliki pengamatan *out of control* paling banyak yaitu pada kombinasi warna larutan dan besar jenis butir. Dapat disimpulkan bahwa pada diagram Ishikawa Max-MCUSUM dengan kombinasi karakteristik kualitas warna larutan dan besar jenis butir diduga memiliki peran penyebab terjadinya pengamatan *out of control*. Hasil identifikasi OOC diatas menunjukkan bahwa terdapat faktor yang menjadi penyebab karakteristik kualitas proses produksi gula kristal putih di PG Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI *out of control*.

Dilihat dari Gambar 3, terdapat 6 faktor penyebab suatu pengamatan tidak terkendali dalam proses produksi gula kristal putih di PG Djatiroto yaitu faktor manusia, mesin, metode, bahan baku, lingkungan, dan pengukuran. Pada karakteristik kualitas warna larutan, faktor manusia salah satunya disebabkan oleh kelalaian melakukan prosedur analisa, ketidakpatuhan terhadap prosedur proses produksi gula khususnya pH, suhu, dan waktu. Faktor mesin salah satunya yaitu kerusakan saringan nira, pH terkontrol dan lainnya. Pada faktor metode yaitu perbedaan prosedur analisa, kuvet tidak standar dan lain-lain. Faktor bahan baku yaitu kualitas tebu yang berbeda. Faktor lingkungan baik warna larutan atau besar jenis butir disebabkan oleh suhu ruangan dan cuaca yang berada di sekitar pabrik. Dan faktor pengukuran disebabkan karena adanya selisih dalam

Tabel 6. Perbandingan antar diagram kontrol

Jenis Diagram Kontrol	Fase	Jenis Pergeseran	Banyak <i>out of control</i>
Diagram Kontrol Generalized Variance dan T ² Hotelling	Fase I	Variability	0
	Fase II	Mean	0
Diagram Kontrol MEWMV dan MEWMA	Fase I	Variability	3
	Fase II	Mean	0
Diagram Max-MCUSUM	Fase I	Variability	0
	Fase II	Mean	11

Tabel 7. Analisis kapabilitas proses

Karakteristik Kualitas	C _p	C _{pk}
Warna Larutan	1,66	1,57
Besar Jenis Butir	4,15	4,07
Kadar Air	1,94	1,21

pengukuran yang dilakukan pada saat di stasiun. Pada karakteristik kualitas besar jenis butir, dari faktor manusia disebabkan oleh terburu-buru untuk menurunkan masakan dikarenakan mengejar target produksi dan lain-lain, pada faktor mesin disebabkan karena kerusakan pada talang goyang, stasiun masakan, saringan gula, dan lainnya. Faktor metode disebabkan oleh alat analisa atau saringan yang jebol dan lainnya, dan faktor pengukuran disebabkan adanya selisih dalam pengukuran saat di stasiun dan cara pengambilan sampel.

F. Perbandingan dengan Diagram Kontrol

Dilakukan analisis dengan menggunakan diagram kontrol multivariat lainnya bertujuan untuk membandingkan diagram kontrol paling sensitif terhadap pergeseran yang kecil.

Tabel 6 menunjukkan bahwa pada diagram kontrol Max-MCUSUM lebih sensitif dibandingkan diagram lainnya. Hal ini dapat dilihat dari banyaknya jumlah pengamatan *out of control* pada diagram Max-MCUSUM memiliki jumlah pengamatan lebih banyak. Dilihat bahwa pergeseran terjadi dikarenakan variabilitas proses yang tidak ada pengamatan yang *out of control* pada *mean process* setiap diagram kontrol.

G. Analisis Kapabilitas Proses

Indeks yang digunakan apabila proses telah terkendali secara statistik untuk mengukur kapabilitas proses secara multivariat yaitu MC_p dan MC_{pk}. Adapun perhitungan kapabilitas proses secara univariat dilakukan karakteristik kualitas proses produksi pada fase II sebagai berikut.

Tabel 7 menunjukkan bahwa nilai C_p dan C_{pk} untuk masing-masing karakteristik kualitas proses produksi memiliki nilai lebih dari satu berarti proses produksi gula kristal putih di PG Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI telah kapabel dan kinerja proses 6baik. Analisis kapabilitas proses secara multivariat dimana untuk perhitungannya sebagai berikut.

$$MC_p = 0,33 \times (1,66 + 4,15 + 1,94) = 0,33 \times 7,75 = 2,5575$$

$$MC_{pk} = 0,33 \times (1,57 + 4,07 + 1,21) = 0,33 \times 6,85 = 2,2605$$

Dilihat dari diatas memberikan informasi nilai MC_p dan MC_{pk} , dimana kedua nilai lebih besar dari satu yang berarti proses telah kapabel dan kinerja proses secara multivariat memiliki tingkat presisi dan akurasi proses yang baik.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan mengenai pengendalian kualitas proses produksi hasil gula kristal putih didapatkan kesimpulan sebagai berikut. Pertama, *input* dari model MLS-SVR ditentukan berdasarkan banyaknya lag yang signifikan yang berasal dari plot PACF yaitu pada karakteristik kualitas ICUMSA signifikan pada lag-1, 2, 11, dan 23, besar jenis butir signifikan pada lag-1, 2, 3, dan 28, serta kadar air signifikan pada lag-27. Hasil *input* dan *hyper-parameter* optimal didapat nilai residual model MLS-SVR yang mengurangi autokorelasi pada data pengamatan. Hasil analisis yang dilakukan untuk pengendalian proses menggunakan diagram kontrol Max-MCUSUM pada fase I dengan k sebesar 0,5 didapat proses telah terkendali secara statistik setelah diatasi karena adanya OOC dan data aktual yang memiliki autokorelasi berhasil dikurangi sehingga data fase I telah mewakili proses *in control* dan adanya *false alarm* lebih kecil. Pada hasil analisis fase II dengan menggunakan nilai $k=0,5$ terdapat 11 pengamatan fase II yang berada diluar batas kontrol sehingga proses belum terkendali secara statistik.

Kedua, terdapat dua karakteristik kualitas yang menjadi penyebab terjadinya *out of control* yaitu warna larutan dan besar jenis butir yang keduanya memiliki faktor yang menjadi penyebab terjadinya OOC yaitu dari segi manusia, mesin, metode, bahan baku, lingkungan, dan pengukuran.

Ketiga, perhitungan kapabilitas proses yang telah dilakukan mendapatkan hasil bahwa secara multivariat kinerja proses produksi gula kristal putih di PG Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI telah kapabel dari segi presisi dan akurasi.

B. Saran

Saran yang dapat diberikan kepada PG Djatiroto PT Perkebunan Nusantara XI adalah mempertahankan proses yang dijalankan dan memperbaiki proses karena ada pengamatan yang tidak sesuai dengan standar yang telah ditentukan. Dari analisis yang telah dilakukan, diharapkan mempertimbangkan agar perusahaan mengetahui dan evaluasi proses produksi yang dilakukan. Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu mencari cara lain apabila dengan menggunakan PACF masih belum teratasi untuk autokorelasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. I. Kurniasari, D. H. Darwanto, and S. Widodo, "Permintaan gula kristal mentah Indonesia," *Ilmu Pertan.*, vol. 18, no. 1, pp. 24–30, 2015, doi: 10.22146/ipas.6173.
- [2] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control Eight Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2020. ISBN: 978-1-119-39930-8.
- [3] V. N. Vapnik, *Statistical Learning Theory*. New Jersey: Wiley, 1998. ISBN: 978-0-471-03003-4.
- [4] T. R. Aulia, "Pengendalian Kualitas Proses Produksi Air Di PDAM Tirtanadi Provinsi Sumatera Utara Menggunakan Diagram Kontrol MEWMA Berbasis Residual Model Multioutput Least Square SVR (MLS-SVR)," Departemen Statistika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2021.
- [5] R. E. Walpole, *Pengantar Statistika Edisi Ke-3 (Penerjemah Bambang Sumantri)*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 1993. ISBN: 9794033138.
- [6] R. A. Johnson and D. W. Wichern, *Applied Multivariate Statistical Analysis*. New Jersey: Pearson, 2007. ISBN: 978-0-13-187715-3.
- [7] S. S. Shapiro and M. B. Wilk, "An analysis of variance test for normality (complete samples)," *Biometrika*, vol. 52, no. 3/4, pp. 591–611, 1965, doi: 10.2307/2333709.
- [8] D. F. Morrison, *Multivariate Statistical Methods*. Singapore: McGraw Hill, 1990. ISBN: 0071008152.
- [9] J. D. Cryer and K.-S. Chan, *Time Series Analysis With Applications in R*. New York: Springer, 2008. ISBN: 978-0-387-75958-6.
- [10] X. An, S. Xu, L.-D. Zhang, and S.-G. Su, "Multiple dependent variables LS-SVM regression algorithm and its application in NIR spectral quantitative analysis," *Spectrosc. Spectr. Anal.*, vol. 29, no. 1, pp. 127–130, 2009, doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)01-0127-04.
- [11] C.-W. Hsu, C.-C. Chang, and C.-J. Lin, "A Practical Guide to Support Vector Classification," Department of Computer Science, National Taiwan University Taipei, 2016.
- [12] S. W. Cheng and K. Thaga, "Multivariate max-MCUSUM chart," *Qual. Technol. Quant. Manag.*, vol. 2, no. 2, pp. 221–235, 2005, doi: 10.1080/16843703.2005.11673095.
- [13] S. Raissi, "Multivariate process capability indices on the presence of priority for quality characteristics," *J. Ind. Eng. Int.*, vol. 5, no. 9, pp. 27–36, 2009.
- [14] PT. Perkebunan Nusantara XI, "PT Perkebunan Nusantara," Surabaya: PTPN XI, 2017.