

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan meningkatnya persaingan pasar yang semakin ketat dan meluas, para pelaku industri terus berupaya menarik perhatian konsumen agar menggunakan produk yang mereka tawarkan. Kualitas menjadi faktor penentu bagi konsumen dalam mempertimbangkan produk di antara berbagai pilihan yang tersedia sehingga produsen harus dapat menghasilkan produk yang berkualitas untuk tetap bersaing di pasar (Chong et al., 2022). Faktor kunci dalam mencapai manufaktur berkelanjutan adalah memberikan jaminan kualitas produk yang telah menjadi tuntutan dalam pasar global saat ini. (Psarommatis et al., 2020). Oleh karena itu, produsen harus mengukur dan memastikan kualitas produk mereka di setiap tahap produksi (Dreyfus et al., 2022).

Kualitas dapat diartikan sebagai ukuran seberapa baik suatu produk atau layanan memenuhi kebutuhan pelanggan berdasarkan standar tertentu (Siregar & Elvira, 2020). Kualitas juga sering kali dikaitkan dengan kesesuaian terhadap spesifikasi desain yang mencakup berbagai fitur dan sifat dari produk tersebut (Papavasileiou et al., 2024). Namun, tantangan utama dalam pengelolaan kualitas adalah keberadaan variasi yang tidak dapat dihindari dalam proses produksi. Variasi adalah fenomena alami yang selalu ada dalam output setiap proses, tidak peduli seberapa hati-hati proses tersebut dijalankan (Abid et al., 2020). Perbedaan antara output aktual suatu produk dengan output yang diinginkan sering kali disebut sebagai cacat produksi. Kecacatan mencerminkan ketidaksesuaian antara kualitas yang diharapkan dan yang tercapai dalam hasil produksi (Kareem et al., 2022). Cacat yang tidak terdeteksi dan sampai kepada pelanggan dapat merugikan reputasi dan penjualan perusahaan di masa depan, sehingga penting untuk meminimalkan cacat tanpa mengorbankan kinerja sistem produksi (Björkman & Wisén, 2020; Tsintotas et al., 2024).

Persaingan pasar yang kompetitif mengharuskan perusahaan untuk terus mengoptimalkan sistem produksi mereka untuk mengurangi gangguan dan masalah kualitas yang dapat menghambat kelancaran produksi (Cadi et al., 2021). PT Maruki International Indonesia Makassar sebagai salah satu perusahaan manufaktur yang fokus memproduksi Butsudan sebagai produk utamanya juga mendapatkan tantangan yang serupa. Sistem produksi di perusahaan ini menggunakan skema *make-to-order*, di mana produksi dilakukan berdasarkan pesanan yang diterima dari kantor pusat di Jenang. Perusahaan ini kerap menghadapi masalah berupa produk



an oleh kerusakan material atau kurangnya ketelitian pekerja. Kondisi ini menyebabkan produk harus diperbaiki kembali, istilah *remaking*. Oleh karena itu, maka perusahaan perlu ya pengendalian kualitas dalam proses produksinya.

kualitas merupakan aspek mendasar dalam setiap sistem tujuan untuk mempertahankan dan memastikan konsistensi

kualitas produk. Proses ini sangat penting untuk menjamin bahwa produk yang dihasilkan selalu memenuhi standar dan spesifikasi yang telah ditetapkan sebelumnya (Shi et al., 2024). Pengendalian kualitas berdasarkan metode kontrol tradisional pada umumnya masih mengandalkan operasi manual dan penilaian berdasarkan pengalaman pribadi. Pendekatan ini memiliki kelemahan karena kurangnya konsistensi dan akurasi, yang pada akhirnya dapat menghasilkan produk dengan kualitas rendah akibat ketidaktepatan dalam mendeteksi dan mengoreksi masalah proses (Ke et al., 2022). Oleh karena itu, pengendalian kualitas berbasis teknik statistik menjadi sangat penting untuk diterapkan dalam mengatasi masalah perbaikan atau penolakan produk yang disebabkan oleh variasi dalam proses (Guleria et al., 2021).

Teknik statistik seperti peta kendali menjadi pilihan yang tepat dan telah terbukti efektif dalam mengidentifikasi penyimpangan proses secara dini, sehingga perusahaan dapat segera melakukan tindakan korektif untuk mengidentifikasi dan menghilangkan penyebab masalah, serta menghentikan proses produksi sebelum menghasilkan barang yang tidak sesuai dengan standar. (Haq & Syed, 2021). Pencegahan dini ini memastikan kualitas produk tetap terjaga dan meminimalkan efek kerugian yang ditimbulkan (Lario et al., 2024). Pengendalian kualitas dengan peta kendali selain menjaga kualitas proses produksi, juga akan meminimalkan kebutuhan inspeksi, sehingga menghemat waktu, biaya dan tenaga (Zonnenshain & Kenett, 2020).

Peta kendali yang populer digunakan adalah peta kendali Shewhart. Peta kendali ini merupakan tipe tanpa memori yang dikembangkan oleh Shewhart (1926), dan kekuatan utamanya terletak pada kemampuannya untuk mendeteksi pergeseran besar dengan cepat. Namun, peta kendali ini kurang sensitif terhadap pergeseran kecil dan sedang dalam parameter proses (lokasi dan dispersi). Sebagai peningkatan dari diagram pemantauan tanpa memori, peta kendali *Cumulative Sum* (CUSUM) yang dikembangkan oleh Page (1954) dan peta kendali *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) yang diperkenalkan oleh Roberts (1959) mampu meningkatkan kemampuan deteksi pergeseran kecil yaitu kurang dari 1.5σ . Diagram tipe dengan memori ini menggunakan informasi masa lalu dan saat ini, sehingga lebih sensitif terhadap pergeseran kecil hingga sedang dalam parameter proses, meskipun memiliki kelemahan dalam mendeteksi pergeseran besar yang lebih lambat (Munir et al., 2023). Untuk mendeteksi perubahan rata-rata dalam kisaran 1σ atau kurang, peta kendali yang menunjukkan kinerja terbaik adalah EWMA. Sementara itu, untuk perubahan yang lebih besar dari 1σ tetapi kurang dari 1.5σ , metode CUSUM memberikan hasil yang lebih baik (Vargus et al., 2004).



(13) memperkenalkan struktur desain peta kendali Mix EWMA-a meningkatkan efektivitas pemantauan parameter proses. MEC ini, statistik EWMA digunakan sebagai input ke dalam peta kendali MEC menggabungkan peta kendali EWMA dan meningkatkan kemampuan deteksi perubahan kecil hingga sedang. Dengan kekuatan dari kedua peta kendali tersebut, MEC dapat memantau parameter proses lebih cepat dibandingkan peta kendali

EWMA dan CUSUM secara terpisah (Noor et al., 2023). Sebaliknya, Zaman et al (2015) memperkenalkan versi terbalik dari diagram MEC, di mana statistik CUSUM digunakan sebagai input ke dalam struktur EWMA. Pendekatan ini menghasilkan peta kendali Mix CUSUM-EWMA (MCE). Skema MCE terbukti memiliki kinerja lebih unggul dibandingkan diagram MEC ketika kondisi tertentu, terutama ketika nilai $\delta \geq 0.5$ untuk $\lambda \geq 0.5$.

Peta kendali CUSUM sendiri menunjukkan kinerja yang konsisten tanpa terpengaruh apakah perubahan terjadi di awal, tengah, maupun akhir dari seri data. Di sisi lain, peta kendali EWMA memiliki kemampuan mendeteksi perubahan dengan cepat pada awal seri, namun dalam beberapa kondisi tertentu, namun EWMA bisa menjadi lebih lambat dalam merespons untuk beberapa kondisi pergeseran tertentu dalam proses (Vargas et al., 2004). Upaya untuk meningkatkan kinerja peta kendali EWMA dilakukan oleh Shamma dan Shamma (1992) dengan mengembangkan peta kendali Double EWMA (DEWMA) yang memiliki kinerja yang lebih baik dalam mendeteksi pergeseran rata-rata proses. Peta kendali DEWMA dianggap lebih efisien (Raza & Siddiqi, 2017) dan mampu mengidentifikasi pergeseran yang gagal dideteksi oleh EWMA (Alevizakos & Koukouvinos, 2020).

Oleh karena itu, pengembangan peta kendali baru yang berusaha untuk mengkombinasikan antara CUSUM dan DEWMA dapat menjadi pendekatan yang lebih efektif dan efisien dalam mendeteksi pergeseran proses. Mix CUSUM-DEWMA menggabungkan kekuatan keduanya, yaitu kemampuan CUSUM untuk menangani perubahan kecil secara akumulatif dan kemampuan DEWMA untuk merespons perubahan dengan lebih cepat. Peta kendali Mix CUSUM-DEWMA bisa menjadi alternatif yang lebih baik dalam meningkatkan kemampuan peta kendali dalam pengendalian kualitas terhadap cacat produksi.

Beberapa penelitian telah membahas mengenai penerapan metode-metode peta kendali tersebut seperti Mohammadkhani & Amiri (2022) yang menggabungkan peta kendali EWMA dan CUSUM lebih lanjut dengan DRSS dan MRSS yang menunjukkan hasil bahwa MCE dan MEC memiliki performa yang baik dalam mendeteksi pergeseran kecil hingga sedang. Penelitian lain dilakukan oleh Noor et al (2023) dengan meneliti efisiensi robust MEC yang menunjukkan bahwa peta kendali ini memiliki kendali yang baik terhadap tingkat alarm palsu sehingga mampu mendeteksi kondisi abnormal yang sesungguhnya. Alevizakos et al (2021) mencoba mengembangkan peta kendali Triple EWMA (TEWMA) sebagai pengembangan dari peta kendali EWMA dan DEWMA. Hasilnya menunjukkan bahwa DEWMA memiliki kinerja yang lebih baik dari pada EWMA, bahkan mampu mengungguli TEWMA untuk deteksi pergeseran sedang dan mengimbangi TEWMA untuk proses



aroon et al (2023) menerapkan peta kendali DEWMA dengan si, menunjukkan hasil bahwa ARL DEWMA memiliki performa dingkan ARL EWMA untuk semua situasi percobaan. Kemudian Areepong (2023) menguji peta kendali DEWMA pada data menunjukkan bahwa bagan kendali tersebut secara konsisten ARL terendah pada berbagai variasi parameter pemulusan

eksponensial dan ukuran pergeseran yang menunjukkan efektivitas bagan kendali DEWMA pada semua skenario yang diujikan.

Peta kendali CUSUM, EWMA dan MEC bekerja dengan baik dalam mendeteksi penyimpangan dari rata-rata pada distribusi normal (Chaudhary et al., 2023). Adapun Peta kendali DEWMA dikembangkan dengan asumsi bahwa data yang dianalisis terdistribusi secara normal (Nawaz et al., 2021). Jika asumsi normalitas tidak terpenuhi maka peta kendali dapat menghasilkan keputusan yang tidak valid ketika diterapkan pada kondisi proses yang non-normal (Noor et al., 2021) yang meningkatkan jumlah alarm palsu (Celano & Chakraborti, 2021) dan mengurangi efisiensi peta kendali (Razalee et al., 2021). Adapun data total cacat produksi butsudan PT Maruki Internasional Indonesia berdistribusi normal sehingga karakteristik datanya cocok untuk dianalisis lebih lanjut dengan peta kendali gabungan CUSUM dan DEWMA.

Berdasarkan gap penelitian sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis data cacat produksi butsudan menggunakan metode peta kendali Mix CUSUM-DEWMA yang diharapkan dapat meningkatkan performa dalam memonitoring pergeseran proses lebih akurat dan meningkatkan kemampuan deteksi dini terhadap cacat produksi.

1.2 Rumusan Masalah

Berikut rumusan masalah berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan:

1. Bagaimana menentukan bentuk peta kendali Mix CUSUM DEWMA untuk memantau data total cacat produksi butsudan bulanan periode 2017 hingga 2023 pada PT Maruki Internasional Indonesia ?
2. Bagaimana perbandingan kinerja peta kendali Mix CUSUM DEWMA dengan peta kendali Mix CUSUM EWMA dalam penerapannya pada data total cacat produksi butsudan bulanan periode 2017 hingga 2023 pada PT Maruki Internasional Indonesia ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Data yang digunakan adalah data total cacat produksi bulanan periode 2017 hingga 2023 pada PT Maruki Internasional Indonesia
2. Nilai λ yang digunakan adalah 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.2, ..., 0.9 dan nilai $k = 0.5$

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini



It:

eta kendali *Mix Cumulative Sum-Doble Exponentially Weighted* untuk memantau data total cacat produksi butsudan bulanan hingga 2023 pada PT Maruki Internasional Indonesia
asil perbandingan kinerja peta kendali Mix CUSUM DEWMA
dali Mix CUSUM EWMA dalam penerapannya pada data total

cacat produksi butsudan bulanan periode 2017 hingga 2023 pada PT Maruki Internasional Indonesia

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan wawasan untuk mengembangkan pengetahuan tentang pengembangan peta kendali terutama pada pengembangan *Mix Cumulative Sum-Doble Exponentially Weighted Moving Average* yang dapat digunakan oleh kalangan luas
2. Mengembangkan metode *Mix Cumulative Sum-Doble Exponentially Weighted Moving Average* yang dapat diaplikasikan secara nyata dalam memantau cacat produksi
3. Meningkatkan akurasi deteksi cacat produksi butsudan pada PT Maruki Internasional Indonesia.

1.6 Teori

Sub-bab teori ini membahas mengenai beberapa teori yang digunakan sebagai dasar dalam penelitian ini. Kajian teori yang dibahas mencakup konsep CUSUM, DEWMA dan CUSUM-DEWMA.

1.6.1 Peta Kendali

Peta kendali adalah grafik yang digunakan untuk menganalisis perubahan suatu proses dari waktu ke waktu dengan memplot data dalam urutan waktu. Grafik ini mencakup garis tengah yang mewakili rata-rata, serta garis batas kendali atas dan bawah yang dihitung berdasarkan data historis. Garis-garis tersebut membantu dalam memantau stabilitas proses dan mendeteksi penyimpangan yang memerlukan perhatian (Ningrum et al., 2020).

Grafik kontrol merupakan alat statistik yang penting dan banyak digunakan karena kemampuannya untuk menganalisis dan mendeteksi ketidaknormalan dalam proses produksi serta memproyeksikan status proses dengan cara yang sederhana. Efektivitas grafik kontrol sangat bergantung pada tingkat sensitivitasnya dalam mendeteksi ketidaknormalan yang terjadi dalam proses produksi (Taboran et al., 2021). Jika suatu titik terletak di bawah atau di atas batas kontrol, maka proses dianggap berada di luar kendali dan pencarian penyebab yang dapat diidentifikasi akan segera dilakukan. Sebaliknya, proses akan dianggap berada dalam kendali jika titik-titik yang dipetakan berada dalam batas kontrol yang telah ditentukan (Bataineh et al., 2022).



et al (2020) menjabarkan bahwa peta kendali memiliki tiga standar produksi proses produksi agar mencapai tujuan proses produksi.

1.6.2 Cumulative Sum (CUSUM)

Peta kendali CUSUM pertama kali diperkenalkan oleh Page (1954) dan dirancang khusus untuk mendeteksi pergeseran kecil dalam suatu proses dengan tingkat sensitivitas yang tinggi. CUSUM menggambarkan jumlah kumulatif deviasi dari setiap nilai sampel terhadap nilai target, memberikan pentingnya (berat) yang sama untuk semua observasi historis (Hynek et al., 2021). Peta kendali CUSUM dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu menggunakan tabular CUSUM atau V-mask CUSUM. Namun, di antara kedua cara tersebut, tabular CUSUM lebih disarankan.

Montgomery (2009) menjelaskan bahwa tabular CUSUM bekerja dengan cara mengakumulasi deviasi dari μ_0 yang berada di atas nilai target menggunakan statistik C^+ dan mengakumulasi deviasi dari μ_0 yang berada di bawah nilai target menggunakan statistik C^- . Jika nilai awal $C_0^+ = C_0^- = 0$, maka C_j^+ dan C_j^- dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$C_j^+ = \max[0; X_j - (\mu_0 + K) + C_{j-1}^+] \quad (1)$$

$$C_j^- = \max[0; (\mu_0 - K) - X_j + C_{j-1}^-] \quad (2)$$

dengan X_j adalah pengamatan ke- j , μ_0 adalah nilai target dan K merupakan nilai kelonggaran atau toleransi yang biasanya dipilih setengah antara nilai target μ_0 dan nilai rata-rata out-of-control μ_1 . Oleh karena itu, jika pergeseran (δ) dinyatakan dalam satuan standar deviasi, maka $\mu_1 = \mu_0 + \delta\sigma$ atau $\delta = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma}$, maka k adalah setengah dari besarnya pergeseran atau $K = \frac{\delta}{2}\sigma = k\sigma$

Batas kendali atas dan bawah dari peta kendali ini dinyatakan sebagai berikut.

$$UCL = h\sigma \quad (3)$$

$$CL = 0 \quad (4)$$

$$LCL = -h\sigma \quad (5)$$

Nilai h dan k yang digunakan dalam penelitian ini diambil berdasarkan rekomendasi Montgomery (2009), di mana h bernilai 4 atau 5, dan nilai referensi $k = \frac{1}{2}$. Kombinasi ini umumnya memberikan kinerja yang baik terhadap performa ARL pada pergeseran sebesar 1σ dalam rata-rata proses.

1.6.3 Exponentially Weighted Moving Average (EWMA)

Model pendekatan EWMA diperkenalkan pertama kali oleh seorang peneliti bernama Roberts pada tahun 1959. EWMA memberikan bobot yang lebih besar pada informasi sampel saat ini dan bobot yang lebih kecil pada pengamatan yang lebih lama (seiring bertambahnya usia pengamatan, bobotnya terus berkurang) (Abbas et al., 2020). Secara matematis model pendekatan EWMA didefinisikan sebagai

$$Z_j = \lambda X_j + (1 - \lambda)Z_{j-1} \quad (6)$$

di EWMA pada waktu ke j , λ adalah parameter pembobotan $0 < \lambda \leq 1$, X_j adalah nilai pengamatan pada waktu ke- j , Z_{j-1} pada periode sebelumnya ($j - 1$) dan j adalah waktu atau waktu dengan $j = 1, 2, 3, \dots, n$.



Jika $\lambda = 1$, maka grafik EWMA akan menjadi grafik Shewhart yang hanya bergantung pada informasi saat ini (Kuiper & Goedhart, 2024). Nilai Lambda yang lebih kecil juga digunakan untuk mendeteksi pergeseran proses yang lebih kecil, sementara nilai Lambda yang besar membantu mendeteksi pergeseran yang lebih besar dalam proses (Javaid et al., 2023). Z_0 merupakan nilai awal yang terkadang dapat diperoleh dari nilai rata-rata hasil pengamatan seperti pada Persamaan (7).

$$Z_0 = \bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (7)$$

Jika direkursi untuk Z_{j-m} , dengan $m = 1, 2, 3, \dots, j$ maka akan diperoleh Persamaan (8).

$$Z_j = \lambda X_j + \lambda(1-\lambda)X_{j-1} + \lambda(1-\lambda)^2 X_{j-2} + \dots + \lambda(1-\lambda)^{j-2} X_2 + \lambda(1-\lambda)^{j-1} X_1 + (1-\lambda)^j Z_0 \quad (8)$$

Persamaan (8) secara sederhana dapat dinyatakan seperti dalam Persamaan (9) berikut.

$$Z_j = \lambda \sum_{m=0}^{j-1} (1-\lambda)^m X_{j-m} + (1-\lambda)^j Z_0 \quad (9)$$

atau juga dapat dinyatakan dalam Persamaan (10) berikut.

$$Z_j = \lambda \sum_{m=1}^j (1-\lambda)^{j-m} X_m + (1-\lambda)^j Z_0 \quad (10)$$

Terlihat adanya pergerakan *average* yang tidak hanya terjadi untuk X_1 , namun untuk data terbaru $X_2, X_3, \dots, X_n$. Pergerakan *average* untuk tiap Z_j disebut sebagai Persamaan *moving average* atau rata-rata bergerak. Selain itu, pada Persamaan (8) dapat diperhatikan bahwa bobot menurun secara eksponensial dari rata-rata subgrup terdahulu hingga rata-rata subgrup terbaru, yaitu $\lambda(1-\lambda)^0, \lambda(1-\lambda)^1, \lambda(1-\lambda)^2, \dots, \lambda(1-\lambda)^{j-2}, \lambda(1-\lambda)^{j-1}$. Pada Z_j terdapat adanya pergerakan *average* serta bobot yang mengalami penurunan secara eksponensial, sehingga Z_j disebut dengan EWMA (*Exponentially Weighted Moving Average*). Nilai rata-rata dari peta kendali EWMA adalah hasil dari ekspektasi Z_j dengan nilai rata-rata yang diinginkan adalah nilai Z_0 yang dinyatakan dengan Persamaan (11)

$$E[Z_j] = \mu_0 \quad (11)$$

Adapun variansi Z_j diberikan oleh persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \sigma_{Z_j}^2 &= \text{var}(Z_j) \\ &= \frac{\lambda \sigma_{X_j}^2 (1 - (1-\lambda)^{2j})}{2 - \lambda} \end{aligned} \quad (12)$$



menentukan batas kendali atas dan bawah untuk diagram kontrol yang akan oleh Persamaan (13) dan (14).

$$\sqrt{\frac{\lambda \sigma_{X_j}^2 (1 - (1-\lambda)^{2j})}{2 - \lambda}}$$

$$UCL_j = \mu_0 + L\sigma_{X_j} \sqrt{\frac{\lambda(1 - (1 - \lambda)^{2j})}{2 - \lambda}} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} LCL_j &= \mu_0 - L\sigma_{Z_j} \\ &= \mu_0 - L \sqrt{\frac{\lambda\sigma_{X_j}^2(1 - (1 - \lambda)^{2j})}{2 - \lambda}} \\ &= \mu_0 - L\sigma_{X_j} \sqrt{\frac{\lambda(1 - (1 - \lambda)^{2j})}{2 - \lambda}} \end{aligned} \quad (14)$$

1.6.4 Double Exponentially Weighted Moving Average (DEWMA)

Model pendekatan ini dikembangkan oleh Shamma, S.E dan Shamma, S.K pada tahun 1992. Statistik DEWMA adalah kombinasi berbobot dari pengamatan terkini dan sebelumnya dengan melakukan pemulusan eksponensial dua kali (Adeoti & Koleoso, 2020). Peta kendali DEWMA merupakan pengembangan dari diagram kendali EWMA yang berbasis pada statistik EWMA, sehingga dinamakan demikian. Keunggulan utama dari DEWMA adalah tingkat sensitivitasnya yang lebih tinggi dibandingkan dengan diagram EWMA klasik, terutama ketika tujuan utama adalah mendeteksi pergeseran kecil hingga moderat pada rata-rata proses. Dengan memberikan bobot ganda pada data terkini dan pengamatan sebelumnya, DEWMA dapat lebih cepat merespons perubahan yang terjadi dalam proses (Haq et al., 2021; Letshedi et al., 2021). Bentuk umum model pendekatan DEWMA adalah sebagai berikut.

$$Y_j = \lambda Z_j + (1 - \lambda)Y_{j-1} \quad (15)$$

dengan Y_j adalah Nilai DEWMA pada waktu ke j , λ adalah parameter pembobotan DEWMA dengan nilai $0 < \lambda \leq 1$, Z_j adalah nilai EWMA pada waktu ke- j , Y_{j-1} adalah Nilai DEWMA pada periode sebelumnya ($j - 1$) dan j adalah waktu atau subgrup dari pengamatan dengan $j = 1, 2, 3, \dots, n$. Peta kendali DEWMA berfungsi sebagai diagram EWMA jika nilai λ diganti menjadi 1 (Karoon et al., 2023).

Jika direkursi untuk Y_{j-m} , dengan $m = 1, 2, 3, \dots, j$ maka akan diperoleh Persamaan (16).

$$\begin{aligned} Y_j &= \lambda Z_j + \lambda(1 - \lambda)Z_{j-1} + \lambda(1 - \lambda)^2Z_{j-2} + \dots + \lambda(1 - \lambda)^{j-2}Z_2 \\ &\quad + \lambda(1 - \lambda)^{j-1}Z_1 + (1 - \lambda)^jY_0 \end{aligned} \quad (16)$$

Persamaan (16) secara sederhana dapat dinyatakan seperti dalam Persamaan (17)

$$Y_j = \lambda \sum_{m=0}^{j-1} (1 - \lambda)^m Z_{j-m} + (1 - \lambda)^j Y_0 \quad (17)$$

variansi dari pendekatan DEWMA menurut Shamma & Shamma pada Persamaan (18) dan Persamaan (19).

$$\mu_Y = \mu_X \quad (18)$$



$$\sigma_{Y_j}^2 = \lambda^4 \frac{\left[\frac{1 + (1 - \lambda)^2 - (j + 1)^2(1 - \lambda)^{2j} + (2j^2 + 2j - 1)(1 - \lambda)^{2j+2} - j^2(1 - \lambda)^{2j+4}}{[1 - (1 - \lambda)^2]^3} \right]}{\sigma^2} \quad (19)$$

Kemudian didefinisikan batas kendali atas dan bawah untuk diagram kontrol DEWMA yang ditunjukkan oleh Persamaan (20) dan (21).

$$\begin{aligned} UCL_j &= \mu_0 + L\sigma_{Y_j} \\ &= \mu_0 + L \sqrt{\lambda^4 \frac{\left[\frac{1 + (1 - \lambda)^2 - (j + 1)^2(1 - \lambda)^{2j} + (2j^2 + 2j - 1)(1 - \lambda)^{2j+2} - j^2(1 - \lambda)^{2j+4}}{[1 - (1 - \lambda)^2]^3} \right]}{\sigma^2}} \\ &= \mu_0 + L\sigma \sqrt{\lambda^4 \frac{\left[\frac{1 + (1 - \lambda)^2 - (j + 1)^2(1 - \lambda)^{2j} + (2j^2 + 2j - 1)(1 - \lambda)^{2j+2} - j^2(1 - \lambda)^{2j+4}}{[1 - (1 - \lambda)^2]^3} \right]}{\sigma^2}} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} LCL_j &= \mu_0 - L\sigma_{Y_j} \\ &= \mu_0 - L \sqrt{\lambda^4 \frac{\left[\frac{1 + (1 - \lambda)^2 - (j + 1)^2(1 - \lambda)^{2j} + (2j^2 + 2j - 1)(1 - \lambda)^{2j+2} - j^2(1 - \lambda)^{2j+4}}{[1 - (1 - \lambda)^2]^3} \right]}{\sigma^2}} \\ &= \mu_0 - L\sigma \sqrt{\lambda^4 \frac{\left[\frac{1 + (1 - \lambda)^2 - (j + 1)^2(1 - \lambda)^{2j} + (2j^2 + 2j - 1)(1 - \lambda)^{2j+2} - j^2(1 - \lambda)^{2j+4}}{[1 - (1 - \lambda)^2]^3} \right]}{\sigma^2}} \end{aligned} \quad (21)$$

1.6.5 Mixed CUSUM-EWMA (MCE)

Peta kendali CUSUM dan EWMA adalah alat yang efektif untuk mendeteksi pergeseran kecil pada rata-rata proses atau perubahan kecil dalam kualitas produk yang dihasilkan selama proses produksi. Zaman et al (2015) mengusulkan gabungan kedua metode ini menghasilkan skema peta kendali yang lebih unggul, yaitu peta kendali MCE yang di mana statistik pemetaan dari diagram CUSUM digunakan sebagai input untuk struktur EWMA dalam rangka meningkatkan kemampuan deteksi pergeseran yang lebih sensitif dan akurat. Peta kendali MCE yang diusulkan didasarkan pada dua statistik berikut:

$$MCE_j^+ = \lambda C_j^+ + (1 - \lambda)MCE_{j-1}^+ \quad (22)$$

$$MCE_j^- = \lambda C_j^- + (1 - \lambda)MCE_{j-1}^- \quad (23)$$



MCE, peta kendali EWMA pada Persamaan (6) disubstitusikan ke dalam CUSUM yang diperoleh secara tabular, sebagaimana Persamaan (1) dan Persamaan (2). Substitusi ini sesuai dengan gabungan kedua metode tersebut, di mana grafik pengendali CUSUM digunakan sebagai input untuk struktur EWMA. Nilai tersebut berfungsi sebagai

elemen yang dihitung dari data sampel yang telah disajikan. Kedua statistik tersebut juga dapat dinyatakan dalam Persamaan (24) dan (25) berikut.

$$MCE_j^+ = \lambda \sum_{m=0}^{j-1} (1-\lambda)^m C_{j-m}^+ + (1-\lambda)^j MCE_0^+ \quad (24)$$

$$MCE_j^- = \lambda \sum_{m=0}^{j-1} (1-\lambda)^m C_{j-m}^- + (1-\lambda)^j MCE_0^- \quad (25)$$

dengan C_j^+ dan C_j^- adalah statistik CUSUM klasik, dan $0 < \lambda \leq 1$ adalah parameter pemulusan dan nilai awal ditetapkan $MCE_0^+ = MCE_0^- = \mu_c$. Notasi untuk mean dan varians masing-masing dinyatakan dalam Persamaan (26) dan (27)

$$E(C_j^+) = E(C_j^-) = \mu_c \quad (26)$$

$$Var(C_j^+) = Var(C_j^-) = \sigma_c^2 \quad (27)$$

Peta kendali MCE telah dibangun dengan batas kontrol yang mengadopsi pola yang sama seperti diagram EWMA klasik. Satu-satunya perbedaan adalah hanya akan ada batas kontrol atas untuk diagram yang diusulkan karena rentang kedua statistik dalam MCE_j^+ dan MCE_j^- adalah dari 0 hingga ∞ . Batas atas peta kendali ini dinyatakan dalam Persamaan (28) berikut.

$$UCL_j = \mu_c + L\sigma_c \sqrt{\frac{\lambda(1 - (1-\lambda)^{2j})}{2-\lambda}} \quad (28)$$

Statistik MCE_j^+ dan MCE_j^- dari skema yang diusulkan akan diplot terhadap batas kontrol UCL . jika MCE_j^+ dan MCE_j^- berada di dalam batas tersebut, maka proses dianggap dalam keadaan *in-control*, tetapi jika tidak, dianggap *out-of-control*. Proses akan dinyatakan mengalami peningkatan dispersi jika $MCE_j^+ > UCL$ untuk setiap nilai j yang diberikan, sedangkan MCE_j^- yang melampaui batas kontrol menunjukkan adanya pergeseran penurunan dalam dispersi proses (Zaman et al., 2016).

1.6.6 Uji Normalitas

Uji normalitas adalah uji yang dilakukan untuk menilai suatu sebaran data pada sebuah kelompok data atau variabel, apakah sebaran data tersebut berdistribusi normal atau tidak. Salah satu uji statistik normalitas yang dapat digunakan yaitu uji Kolmogorov-Smirnov yang dirumuskan sebagai berikut (Demir, 2022).

Hipotesis:



berdistribusi normal
tidak berdistribusi normal

$$D_{hitung} = \max |F_s(x_i) - F_0(x_i)|$$

$$F_s(x_i) = \frac{f_{kum}}{n} \quad (29)$$

- D_{hitung} : Deviasi maksimum
 D_{tabel} : Nilai tabel Kolmogorov-Smirnov
 $F_0(x_i)$: Fungsi distribusi yang dihipotesiskan distribusi normal
 $F_s(x_i)$: Fungsi distribusi kumulatif dari data sampel
 f_{kum} : Frekuensi kumulatif ke- i
 n : Jumlah sampel

Kriteria Pengujian:

- Jika nilai $D_{hitung} < D_{tabel}$, maka H_0 diterima dan H_1 ditolak
- Jika nilai $D_{hitung} > D_{tabel}$, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima

1.6.7 Average Run Length

Ukuran yang paling signifikan dan paling umum digunakan untuk menilai kinerja diagram kendali adalah *Average Run Length* (ARL). ARL adalah jumlah sampel yang diharapkan diperlukan oleh peta kendali untuk memicu sinyal *out-of-control* untuk suatu perubahan yang diberikan pada parameter proses (Haq et al., 2021). Secara umum, nilai ARL dirumuskan sebagai berikut.

$$ARL = \frac{1}{p} \quad (30)$$

dengan p merupakan probabilitas bahwa satu titik keluar batas kendali, $p \neq 0$. ARL juga dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$ARL_0 = \frac{1}{\alpha} \quad (31)$$

$$ARL_1 = \frac{1}{1 - \beta} \quad (32)$$

ARL di bawah hipotesis nol dapat dianggap sebanding dengan tingkat kesalahan tipe I dalam uji hipotesis tradisional, sementara ARL di bawah hipotesis alternatif sebanding dengan tingkat kesalahan tipe II (Wen et al., 2021). Salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk menghitung ARL peta kendali adalah dengan menggunakan simulasi Monte Carlo. Simulasi Monte Carlo adalah metode analisis yang memanfaatkan data acak untuk menghasilkan statistik probabilitas. Tujuan utamanya adalah untuk memahami pengaruh ketidakpastian dalam suatu sistem atau model. Cara kerja Monte Carlo cukup sederhana yaitu program menghasilkan data acak berdasarkan distribusi probabilitas tertentu, yang kemudian digunakan dalam simulasi. Metode ini sangat serbaguna dan dapat diterapkan, misalnya untuk mengestimasi nilai ARL. Estimasi nilai ARL menggunakan Monte Carlo dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Taboran et al., 2021).

$$ARL = \frac{\sum_{j=1}^N RL_j}{N} \quad (33)$$



ik sampel sebelum terjadi satu *out of control*
 sampel sebelum terjadi satu *out of control* pada simulasi ke- j
 ulangan simulasi

Semakin kecil nilai ARL pada sebuah peta kendali, semakin cepat peta kendali tersebut dalam mendeteksi adanya ketidakterkendalian. Namun, dalam banyak kasus, tidak ada diagram kontrol yang memiliki nilai ARL terkecil di semua diagram kontrol untuk semua titik pergeseran sehingga jika satu diagram memiliki nilai ARL yang lebih kecil untuk sebagian besar titik, diagram tersebut dianggap lebih efektif daripada diagram lainnya (He et al., 2022).

1.6.8 PT Maruki Internasional Indonesia

PT Maruki Internasional Indonesia, yang sebelumnya dikenal dengan nama PT Tokai Material Indonesia, mengalami pergantian nama akibat perubahan kepemilikan saham. Sejak tanggal 14 Februari 2003, perusahaan ini resmi berganti nama menjadi PT Maruki Internasional Indonesia. Perusahaan ini memiliki status Penanaman Modal Asing (PMA) asal Jepang. Didirikan berdasarkan Surat Persetujuan Presiden Republik Indonesia No. B-323/Pres/6/1997, perusahaan ini resmi berdiri pada tanggal 3 Juli 1997 dan sebagai pemimpin perusahaan adalah Mr. Hidelino Asano bersama Prof. Dr. Ir. Nurdin Abdullah. Lokasinya berada di Kawasan Industri Makassar (KIMA), tepatnya di Kelurahan Kapasa, Kecamatan Tamalanrea, di sebelah utara Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan. Pemilihan lokasi ini dinilai strategis secara geografis karena berdekatan dengan pelabuhan laut dan bandara, yang memudahkan arus distribusi ekspor, pengadaan bahan baku, serta mendukung kelancaran aktivitas logistik dan mobilitas produksi.

Produk utama yang dihasilkan adalah Butsudan, yaitu jenis furniture tradisional Jepang yang digunakan dalam ritual agama Buddha, sebagai tempat untuk memberikan persembahan kepada leluhur (Indah et al., 2020). Bahan baku utama dalam pembuatan Butsudan adalah kayu, yang berasal dari berbagai jenis dan sumber, baik dari dalam negeri maupun luar negeri. Seiring dengan tekanan keuangan yang semakin ketat, banyak perusahaan butsudan memindahkan produksinya ke luar negeri, dengan hampir 80% butsudan yang dijual di Jepang kini diproduksi di luar negeri. Meskipun konstruksi regional telah lama menjadi bagian dari tradisi industri keagamaan Jepang, saat ini hampir semua wilayah tidak lagi mampu memproduksi butsudan secara lokal (Gould, 2023).

PT Maruki Co. Ltd, yang berpusat di Kyoto, Jepang, mendirikan beberapa pabrik penghasil Butsudan di berbagai negara, termasuk PT Maruki Internasional Indonesia yang berlokasi di Sulawesi Selatan. Bahan baku utama dalam pembuatan Butsudan di perusahaan ini adalah kayu Ebony dan Nyato yang dikenal memiliki kualitas tinggi serta tampilan yang indah, menjadikannya sangat cocok untuk produk yang memiliki nilai estetika dan spiritual seperti Butsudan. Kayu-kayu ini diperoleh



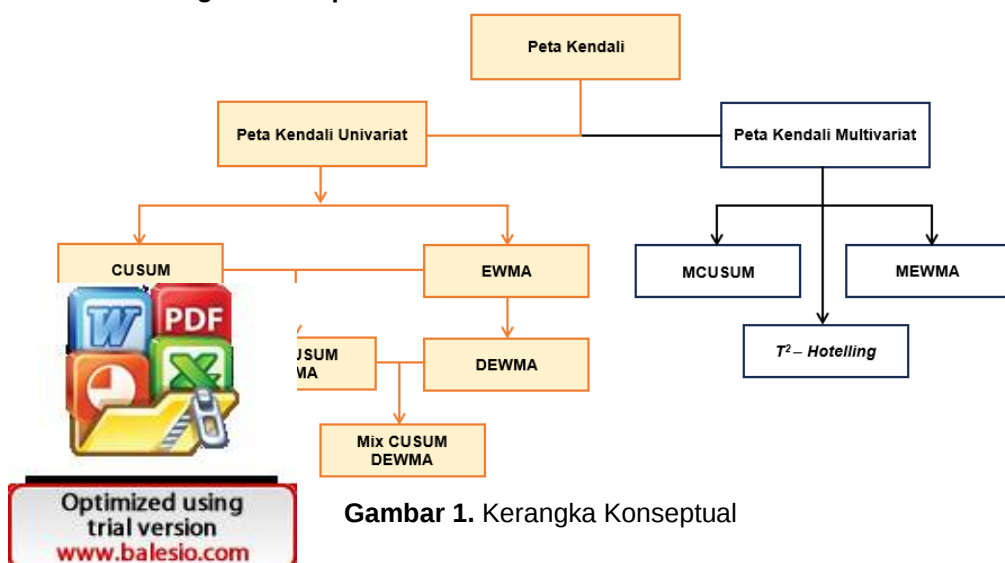
di, yang memang terkenal sebagai salah satu penghasil kayu di Indonesia. Penggunaan bahan lokal ini tidak hanya mendukung kualitas produk, tetapi juga memperkuat nilai tambah sumber daya dalam negeri.

PT Maruki Internasional Indonesia bergerak di bidang manufaktur dan secara rata-rata memproduksi sekitar 600-700 unit per bulan. Produksi ini dijalankan melalui beberapa *factory* khusus yang dikelola berdasarkan unit-unit produksi. Sistem produksinya bersifat *continuous* namun berbasis pesanan.

langsung dari kantor pusatnya di Jepang, Maruki Co. Ltd. Seperti halnya perusahaan manufaktur lainnya, PT. Maruki juga tidak lepas dari potensi cacat pada proses produksinya. Beberapa jenis cacat yang terdapat pada produk yaitu adanya keretakan/pecah, masalah sambungan, melengkung/bengkok, goresan/benturan, material kurang bagus/mengecil, *painting* kurang bagus, bergelembung, hingga beberapa cacat minor pada produk yang mengakibatkan pergantian komponen. Perusahaan menargetkan pencapaian *zero defect* sebagai bagian dari komitmen terhadap kualitas, namun dalam praktiknya masih terdapat toleransi terhadap produk cacat sebesar 3-5%. Tingkat cacat ini menunjukkan bahwa meskipun upaya perbaikan mutu terus dilakukan, tantangan dalam menjaga stabilitas proses produksi tetap ada, sehingga penguatan sistem pengendalian kualitas menjadi hal yang penting untuk mencapai standar yang lebih optimal. Adapun aktivitas ekspor dilakukan secara rutin sebanyak 3-4 kali dalam satu bulan. Meski telah beroperasi selama bertahun-tahun, kontribusi ekspor PT Maruki terhadap total kebutuhan pasar Jepang baru mencapai sekitar 3%, yang menunjukkan bahwa prospek pengembangan pasar masih sangat luas dan menjanjikan. Butsudan memiliki nilai budaya dan spiritual yang tinggi di Jepang, dan harga unitnya dapat mencapai Rp100 juta hingga Rp500 juta, tergantung pada status sosial pemilik dan kompleksitas desain. Dalam praktiknya, masyarakat Jepang umumnya membeli 2 hingga 3 unit Butsudan setiap lima tahun, menjadikan produk ini sebagai komoditas ekspor yang bernilai tinggi dan berkelanjutan bagi perusahaan.

Mengingat nilai jual tinggi dan makna budaya yang kuat, menjaga mutu Butsudan menjadi prioritas utama bagi PT Maruki Internasional Indonesia. Karena proses produksinya berbasis pesanan dan berkelanjutan, deteksi cacat sejak dini sangat penting untuk mencegah kerugian biaya dan reputasi. Oleh karena itu, dibutuhkan metode pengendalian kualitas yang efektif guna menekan cacat, meningkatkan efisiensi, dan memperkuat daya saing ekspor.

1.6.9 Kerangka Konseptual



Gambar 1. Kerangka Konseptual

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder, yaitu data produksi yang diperoleh dari laporan PT Maruki Internasional Indonesia. Data yang digunakan adalah data remaking butsudan dari tahun 2017 hingga 2023.

2.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan adalah data total cacat produksi butsudan yang dikembalikan (remaking) di PT Maruki Internasional Indonesia. Data ini terdiri atas 84 data yang diperoleh secara bulanan dari tahun 2017 hingga 2023.

2.3 Metode Analisis Data

Adapun langkah-langkah yang dilakukan berdasarkan tujuan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Melakukan uji kesesuaian distribusi normal terhadap data penelitian dengan uji Kolmogorov-Smirnov
2. Menentukan statistik dan batas kendali DEWMA dan Mix CUSUM EWMA berdasarkan mean dan variansinya
3. Menentukan statistik dan batas kendali Mix CUSUM DEWMA dengan mengintegrasikan statistik Mix CUSUM EWMA ke dalam statistik DEWMA
4. Menentukan statistik peta kendali CUSUM
5. Membentuk peta kendali Mix CUSUM EWMA untuk memantau proses cacat produksi butsudan
6. Membentuk peta kendali Mix CUSUM DEWMA untuk memantau proses cacat produksi butsudan
7. Menghitung dan membandingkan jumlah *out of control* dan nilai ARL peta kendali Mix CUSUM EWMA dan Mix CUSUM DEWMA untuk melihat efektivitas masing-masing peta kendali
8. Menginterpretasikan hasil analisis dan menarik kesimpulan

