

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi *broadband* telah membawa perubahan signifikan terhadap pola konsumsi informasi dan hiburan masyarakat. Akses yang lebih cepat dan luas terhadap konten digital, seperti video, gambar, dan musik, telah berkontribusi terhadap menurunnya penggunaan media konvensional seperti televisi dan media cetak. Selain itu, kehadiran *broadband* turut meningkatkan kemudahan akses masyarakat terhadap informasi mengenai produk, layanan, serta berbagai sumber daya penting dalam bidang ekonomi, bisnis, dan pemasaran. Namun demikian, manfaat tersebut hanya dapat dirasakan secara optimal apabila seluruh lapisan masyarakat memperoleh akses yang setara terhadap informasi dan layanan digital (Harald Edquist, 2023). Akses jaringan internet pun semakin meningkat di wilayah perkotaan maupun pedesaan, dengan kenaikan signifikan pada periode 2019-2022, yaitu 15,57% di perkotaan dan 22,27% di pedesaan (Badan Pusat Statistik, 2022). Kebutuhan akan jaringan internet yang stabil juga dirasakan oleh sektor bisnis, di mana jaringan yang andal dan cepat dapat meningkatkan efisiensi kerja. Namun, perusahaan menghadapi tantangan dalam mengelola jaringan akibat tingginya *latency*, rendahnya *throughput*, dan penggunaan *bandwidth* yang tidak optimal (Rachmat Maulana et al., 2024; Herlina, 2019).

Bagi penyedia layanan internet, tingginya *latency* dapat berdampak pada menurunnya kualitas layanan, peningkatan keluhan pelanggan, serta berkurangnya tingkat kepuasan pengguna. Hal ini dapat berujung pada hilangnya pelanggan dan menurunnya daya saing perusahaan di industri telekomunikasi yang semakin kompetitif. Berdasarkan hasil studi menunjukkan bahwa peningkatan *latency* adalah salah satu penyebab utama gangguan pada jaringan internet (Roy & Feamster, 2013). Oleh karena itu, investasi dalam infrastruktur jaringan yang handal menjadi langkah krusial untuk menjaga kinerja operasional dan mempertahankan loyalitas pelanggan.

Salah satu teknologi yang berperan penting dalam membangun infrastruktur jaringan yang handal adalah fiber optik. Dengan kemampuannya mentransmisikan data berkecepatan tinggi dan kapasitas besar, fiber optik menjadi solusi utama untuk memenuhi meningkatnya kebutuhan akan konektivitas yang stabil dan andal. Teknologi ini menawarkan keunggulan signifikan dibandingkan jaringan nirkabel, terutama dalam hal ketahanan terhadap gangguan elektromagnetik dan efisiensi transmisi data (Forouzan, 2021; Gerd, 2019; Palais, 2019). Namun, meskipun memiliki keunggulan tersebut, jaringan fiber optik tetap dapat mengalami gangguan akibat faktor eksternal, seperti kondisi cuaca ekstrem, maupun faktor internal, seperti kegagalan perangkat keras atau perangkat lunak (Anggono, 2020; Wibowo, 2018). Gangguan tersebut dapat menyebabkan anomali jaringan, termasuk peningkatan latensi yang berdampak pada penurunan kualitas layanan internet. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan yang mampu mendeteksi anomali secara dini agar permasalahan jaringan dapat diidentifikasi dan ditangani sebelum berdampak lebih luas pada pengguna.

Dalam ilmu statistika terdapat metode *Statistical Process Control* (SPC) yang dapat digunakan untuk memverifikasi dan memantau kualitas produk untuk meningkatkan

kualitas dari proses pembuatannya (Supharakonsakun & Areepong, 2023). Salah satu alat yang digunakan untuk memantau kualitas suatu proses produksi adalah peta kendali atau *control chart* (Supharakonsakun & Areepong, 2023). Metode berbasis *control chart* menjadi salah satu pendekatan yang efektif untuk mengidentifikasi pola anomali dalam jaringan. Dalam konteks jaringan komunikasi data, SPC dapat berperan dalam mendeteksi dan mengeliminasi variasi abnormal yang terjadi, sehingga membantu menjaga stabilitas dan keandalan jaringan. Beberapa metode utama dalam SPC yang digunakan untuk *quality control* di antaranya adalah *Double Exponentially Weighted Moving Average* (DEWMA) dan *Cumulative Sum* (CUSUM).

Dalam jaringan komunikasi data, tantangan utama yang dihadapi adalah mendeteksi dan mengeliminasi variasi abnormal yang dapat memengaruhi stabilitas dan keandalan sistem (Li et al., 2022). Oleh karena itu, diperlukan metode pemantauan yang mampu mengidentifikasi perubahan kecil secara akurat agar gangguan dapat segera ditangani sebelum berdampak signifikan terhadap performa jaringan. Salah satu pendekatan yang lebih adaptif dibandingkan metode konvensional adalah DEWMA yang dirancang untuk meningkatkan sensitivitas dalam mendeteksi perubahan halus dan tren yang sulit diidentifikasi (Supharakonsakun & Areepong, 2023).

DEWMA merupakan pengembangan dari metode *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA), dengan penerapan dua tingkat pemulusan eksponensial untuk meningkatkan efektivitas deteksi perubahan dalam data yang bersifat dinamis. metode ini memberikan bobot lebih besar pada observasi terbaru, sehingga lebih responsif dalam mengidentifikasi pergeseran kecil yang mungkin mengindikasikan anomali dalam sistem jaringan. Peta kendali DEWMA mampu mengidentifikasi pergeseran kecil yang terjadi secara kontinu pada rata-rata suatu proses dengan data yang berdistribusi normal, dibandingkan dengan peta kendali EWMA, metode ini menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam mendeteksi perubahan kecil pada rata-rata proses (Wang et al., 2002). Namun, meskipun DEWMA memiliki keunggulan dalam mendeteksi tren perubahan jangka pendek, metode ini masih memiliki keterbatasan dalam menangkap perubahan yang terjadi secara kumulatif dalam jangka waktu yang lebih panjang.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, metode CUSUM digunakan sebagai pelengkap dalam mendeteksi perubahan yang bersifat akumulatif. CUSUM bekerja dengan memantau penyimpangan nilai pengamatan terhadap rata-rata proses secara terus-menerus, sehingga memungkinkan deteksi perubahan kecil yang terjadi secara bertahap. Dengan mempertimbangkan sifat jaringan komunikasi data yang dinamis, kombinasi DEWMA dan CUSUM menawarkan pendekatan yang lebih efektif dalam mengidentifikasi variasi abnormal baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang.

Penelitian ini menggunakan Mixed DEWMA-CUSUM Sign (MDCS) *chart* yang merupakan metode nonparametrik untuk mendeteksi perubahan kecil pada rata-rata proses tanpa bergantung pada asumsi distribusi data. Pendekatan ini memanfaatkan uji tanda (sign test) untuk mengonversi data pengamatan menjadi serangkaian nilai biner (0 dan 1), yang membuatnya lebih tahan terhadap pengaruh pencilan serta lebih fleksibel dalam berbagai jenis data. Keunggulan utama dari peta kendali MDCS adalah kemampuannya dalam meningkatkan sensitivitas deteksi anomali tanpa memerlukan informasi distribusi awal, sehingga lebih andal dalam lingkungan jaringan komunikasi

yang kompleks dan dinamis. Dengan metode ini, analisis performa jaringan dapat dilakukan secara lebih akurat, memungkinkan deteksi dini terhadap gangguan yang berpotensi menghambat kualitas layanan.

Beberapa penelitian telah menjelaskan mengenai kedua metode ini diantaranya adalah *Performance Evaluation of EWMA and CUSUM Control Charts to detect Anomalies in Social Networks Using Average and Standard Deviation of Degree Measures* (Hosseini & Noorossana, 2018). Hasil dari penelitian tersebut, menunjukkan bahwa EWMA berkinerja lebih baik daripada CUSUM dalam mendeteksi perubahan kecil. Penelitian lainnya dilakukan oleh Karoon & Areepong (2023) dengan judul *Improving Sensitivity of the DEWMA Chart with Exact ARL Solution under the Trend AR(p) Model and Its Application*. Hasil Penelitian ini menunjukkan bahwa DEWMA memiliki kinerja tertinggi, dan ketika nilainya kecil, DEWMA memiliki sensitivitas tinggi dalam mendeteksi proses. Dan penelitian menggunakan metode CUSUM dilakukan oleh Wei Lu & Hengjian Tong dengan judul *Detecting Network Anomalies Using CUSUM and EM Clustering*, penelitian ini berhasil mendeteksi Sebagian besar *anomaly* yang terlewatkan oleh SNORT sekaligus mengurangi tingkat alarm palsu (Lu & Tong, 2009). Penelitian tentang *mixed EWMA-CUSUM (MEC)* yang menggunakan *median-based estimator*, yang disebut *Median and modified one-step M-estimator (MOM)* telah dilakukan oleh Noor et al. (2024) pada data yang tidak normal, memberikan hasil yang baik tanpa terpengaruh oleh bentuk distribusi yang berbeda-beda. Penelitian lain tentang *mixed EWMA-CUSUM For Process Monitoring* yang dilakkan oleh (N. Abbas et al., 2013) perbandingan dari beberapa peta kendali mengungkapkan bahwa gabungan dua *control chart* membuat skema yang diusulkan bahkan menjadi lebih sensitif terhadap pergeseran kecil dibandingkan dengan *control chart* yang dirancang untuk mendeteksi perubahan kecil.

Penelitian yang membandingkan *control chart* EWMA dan DEWMA telah dilakukan oleh Alkahtani, (2013) yang menyatakan bahwa DEWMA lebih unggul karena dapat dirancang untuk lebih tahan terhadap data non-normal dan menunjukkan performa ARL yang lebih stabil dibandingkan EWMA.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode DEWMA dan CUSUM masing-masing memiliki keunggulan dalam mendeteksi anomali, seperti sensitivitas DEWMA terhadap perubahan kecil (Karoon & Areepong, 2023) dan kemampuan CUSUM untuk mendeteksi anomali besar sambil mengurangi tingkat alarm palsu, atau peringatan sistem deteksi anomali yang menunjukkan adanya perubahan atau masalah meskipun tidak terjadi penyimpangan nyata dalam proses yang dipantau (Lu & Tong, 2009). Namun, belum ada penelitian yang secara eksplisit mengkaji kombinasi keduanya untuk menciptakan metode yang lebih adaptif dalam mendeteksi berbagai jenis anomali. Meskipun penelitian (Noor et al., 2024) menggunakan metode *Mixed EWMA-CUSUM* dengan estimator berbasis median pada data non-normal, penelitian tersebut tidak mencakup penggunaan DEWMA, yang memiliki sensitivitas lebih tinggi terhadap perubahan kecil. Selain itu, (N. Abbas et al., 2013) menunjukkan bahwa kombinasi dua peta kendali membuat skema lebih sensitif terhadap pergeseran kecil, tetapi juga tidak mencakup DEWMA sebagai salah satu komponen.

Penelitian ini menjadi dasar yang kuat untuk mengintegrasikan metode *mixed DEWMA-CUSUM Sign Chart* untuk memantau data nonparametrik seperti *latency* pada jaringan komunikasi data berbasis fiber optik.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana menentukan peta kendali *Mixed DEWMA-CUSUM Sign*
2. Bagaimana penerapan peta kendali *Mixed DEWMA-CUSUM Sign* untuk mendeteksi anomali dari data *latency* jaringan berbasis fiber optik
3. Bagaimana perbandingan sensitivitas dari Peta kendali *Mixed DEWMA-CUSUM Sign* dengan peta kendali *DEWMA Sign* dan peta kendali *CUSUM Sign*.

1.3. Tujuan Penelitian

1. Memperoleh peta kendali *Mixed DEWMA-CUSUM Sign*
2. Menerapkan peta kendali *Mixed DEWMA-CUSUM Sign* untuk mendeteksi anomali dari data *latency* jaringan berbasis fiber optik
3. Membandingkan sensitivitas dari Peta kendali *Mixed DEWMA-CUSUM Sign* dengan peta kendali *DEWMA Sign* dan peta kendali *CUSUM Sign*.

1.4. Batasan Masalah

1. Penelitian ini hanya menganalisis *Mixed DEWMA-CUSUM Sign*, *DEWMA Sign*, dan *CUSUM Sign*
2. Penelitian ini hanya menunjukkan hasil dari ketiga metode dengan menggunakan $\lambda = 0.5$.
3. Data yang digunakan dalam penelitian ini terbatas pada data *latency* dari jaringan komunikasi fiber optik. Faktor eksternal lain yang mungkin mempengaruhi kualitas jaringan, seperti faktor cuaca atau kondisi perangkat keras, dan yang lainnya tidak akan dianalisis.
4. Penelitian ini menggunakan data *latency* dengan resolusi waktu tertentu, seperti data per jam, sehingga tidak mempertimbangkan fluktuasi *latency* dalam skala waktu yang lebih kecil, seperti detik atau menit.
5. Analisis hanya dilakukan secara simulasi berdasarkan data yang tersedia dan tidak melibatkan uji coba langsung pada jaringan komunikasi fiber optik secara *real-time*.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Mengembangkan ilmu bidang statistika proses kontrol dengan menghasilkan formulasi *Mixed DEWMA-CUSUM Sign* dan mengevaluasi kinerja metode *DEWMA Sign* dan *CUSUM Sign* dalam mendeteksi anomali *latency*, sehingga dapat menjadi referensi metodologis dalam analisis data *time series* yang serupa.
2. Memberikan informasi kepada Perusahaan *provider* dalam mendeteksi perusahaan pelanggan mana yang mengalami *latency* tinggi.

1.6. Control Chart

Peta kendali merupakan alat statistik yang digunakan untuk memonitor dan mengendalikan proses, memastikan bahwa proses tersebut berjalan dalam batas normalnya. Konsep ini pertama kali dikembangkan oleh Dr. Walter Shewhart dan telah berkembang menjadi komponen penting dalam pengendalian kualitas statistik. Peta kendali terdiri atas dua jenis utama: peta kendali variabel, yang digunakan ketika data kualitas bersifat kuantitatif, dan peta kendali atribut, yang mengacu pada data kualitatif seperti status lulus/gagal atau cacat/tidak cacat.

Dalam studi terkini, peta kendali variabel telah diterapkan secara luas di sektor kesehatan, seperti untuk memonitor waktu tunggu pasien dan waktu penyelesaian layanan, guna meningkatkan efisiensi operasional. Sebaliknya, peta kendali atribut digunakan untuk memantau hasil dengan karakteristik kategorikal. Meskipun peta kendali dapat menunjukkan apakah suatu proses berada dalam kontrol atau tidak, metode ini sering kali memerlukan teknik tambahan untuk menganalisis penyebab penyimpangan, seperti wawancara terstruktur atau pemetaan alur nilai, untuk memberikan wawasan yang lebih dalam tentang akar masalah dan peluang peningkatan kualitas.

Studi menunjukkan bahwa tantangan dalam penerapan peta kendali meliputi pengumpulan data yang memakan waktu serta kebutuhan untuk menggabungkannya dengan metode lain untuk analisis yang lebih menyeluruh (Slyngstad, 2021).

Peta kendali atau *control chart* adalah alat yang paling efektif untuk meminimalkan variabilitas dalam proses produksi. Menurut Montgomery (1990), terdapat tiga penggunaan utama peta kendali:

- a. Pemantauan dan pengawasan suatu proses.
- b. Pengurangan variabilitas proses.
- c. Penaksiran parameter produk atau proses.

Peta kendali digunakan untuk membantu mendeteksi adanya penyimpangan dengan menetapkan batas-batas kendali. Batas kendali tersebut meliputi batas kendali atas (*Upper Control Limit/UCL*), garis tengah (*Central Line/CL*), dan batas kendali bawah (*Lower Control Limit/LCL*). "Out of control" atau kejadian di luar batas kendali adalah kondisi di mana karakteristik produk tidak sesuai dengan spesifikasi perusahaan atau keinginan pelanggan dan posisinya berada di luar batas kendali pada Peta kendali (Nurhaedah et al., 2020).

Peta kendali memiliki berbagai manfaat yang penting dalam pengelolaan mutu proses produksi. Alat ini berfungsi untuk menunjukkan apakah suatu proses berada dalam batas kendali atau mengalami penyimpangan yang memerlukan tindakan korektif. Selain itu, peta kendali memungkinkan pengawasan proses produksi secara kontinu guna menjaga kestabilan proses dan memastikan konsistensinya. Lebih jauh, peta kendali juga digunakan untuk menentukan kemampuan proses (*process capability*) dalam memenuhi standar kualitas yang telah ditetapkan. Peta kendali membantu menilai efektivitas dan kepatuhan yang diterapkan dalam proses produksi, serta memberikan panduan dalam menetapkan kriteria penerimaan untuk kualitas produk. Dengan demikian, peta kendali menjadi alat yang esensial dalam mendukung keberhasilan sistem manajemen mutu.

1.7. *Sign Control Chart*

Dalam Amin et al. (1995), diagram kendali nonparametrik digunakan untuk mengamati median (atau rata-rata) proses. Diagram ini didasarkan pada tanda (sign) yang dihitung dalam sampel dan digunakan sebagai pengganti rata-rata sampel dalam diagram Shewhart dan CUSUM. Dalam diagram berbasis tanda, Average Run Length (ARL) akan sama untuk semua distribusi di mana median sama dengan nilai target. Selama ada rata-rata, maka median dan rata-rata akan sama jika distribusi bersifat simetris.

Dibandingkan dengan diagram yang berbasis rata-rata sampel ($\bar{X}$), diagram kendali nonparametrik umumnya lebih efisien dibandingkan dengan diagram yang berbasis rata-rata sampel karena distribusi pengamatan memiliki "ekor berat", yaitu ketika pengamatan terjadi di ekor distribusi memiliki kemungkinan yang lebih besar untuk terjadi dibandingkan dengan distribusi normal.

karakteristik utama dari *sign control chart*:

1. *sign control chart* dirancang untuk mengendalikan variabilitas proses atau rata-rata proses; diagram ini didasarkan pada tanda yang dihitung dalam setiap sampel, dan mudah digunakan dan dipahami. Pada peta kontrol lokasi, median proses dihitung, dan ketika suatu pengamatan memiliki nilai yang melebihi median dalam kondisi terkendali, tanda (+) diberikan. Pada peta kontrol variabilitas, jika suatu pengamatan berada di bawah kuartil pertama atau di atas kuartil ketiga, tanda (+) diberikan. (+) jika nilainya berada dibawah kuartil pertama atau diatas kuartil ketiga.
2. Untuk menentukan batas kendali yang sesuai, *sign control chart* tidak memerlukan asumsi kenormalan dan estimasi proses variabilitas tidak diperlukan. ketika distribusi dasar data tidak diketahui, lebih baik menggunakan *sign control chart* karena ARL dalam kondisi terkendali tidak bergantung pada parameter distribusi data. akibatnya, diagram ini sangat bermanfaat pada tahap awal proses
3. *Sign control chart* lebih efektif dibandingkan dengan diagram parametrik yang sebanding ketika distribusi dasarnya bersifat heavy tailed.
4. Meskipun *sign control chart* memerlukan ukuran sampel moderat yang lebih besar dari ukuran sampel biasa, seperti 4 atau 5, memungkinkan penggunaan rencana pengambilan sampel yang dipangkas (*curtailed sampling plans*) untuk mendapatkan ukuran sampel harapan yang kecil.

1.8. Distribusi Binomial

Distribusi binomial digunakan untuk menggambarkan penyebaran data dari serangkaian percobaan yang dilakukan sebanyak n kali, dimana setiap percobaan merupakan pengulangan dari percobaan Bernoulli. Dalam setiap pengulangan, hanya ada dua kemungkinan hasil, yaitu sukses atau gagal (Ramadani et al., 2024). Distribusi binomial memiliki ciri-ciri sebagai berikut:

1. Percobaan hanya memiliki dua peristiwa, seperti ya-tidak, sukses-gagal.
2. Probabilitas suatu peristiwa adalah tetap, tidak berubah untuk setiap percobaan.
3. Setiap percobaan hanya mempunyai dua kemungkinan hasil, yaitu sukses atau gagal dengan peluang sukses yaitu p dan peluang gagal yaitu $q = 1 - p$
4. Percobaannya bersifat independen, artinya peristiwa dari suatu percobaan tidak mempengaruhi atau dipengaruhi peristiwa dalam percobaan lainnya

5. jumlah atau banyaknya percobaan yang merupakan komponen percobaan binomial harus tertentu

Rumus distribusi binomial:

$$P(x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x (1-p)^{n-x} \quad (1)$$

dengan:

x : jumlah sukses dalam n kali percobaan

p : peluang sukses ($0 \leq p \leq 1$)

n : jumlah percobaan

q : peluang gagal

1.9. Double Exponentially Weighted Moving Average Sign (DEWMA Sign)

Pemilihan bagan kendali yang sesuai sangat penting untuk memantau perubahan pada proses. Khususnya, ketika karakteristik kualitas suatu proses tidak diketahui atau asumsi normalitas tidak terpenuhi, bagan kendali nonparametric menjadi solusi yang tepat. Yang et al (2011) pertama kali mengembangkan bagan kendali nonparametrik EWMA *Sign* yang bersifat nonparametrik sebagai metode untuk mengawasi penyimpangan terhadap target proses. metode ini juga dirancang untuk mengatasi kelemahan diagram Shewhart dalam mengidentifikasi perubahan proses berskala kecil. Pengembangan dari bagan kendali EWMA *sign* adalah DEWMA nonparametrik berbasis *sign* yang dilakukan oleh (Rahmadani et al., 2024) dengan parameter yang disesuaikan untuk meningkatkan kemampuan deteksi.

Anggap X adalah karakteristik kualitas dari sebuah proses dengan nilai target T . misal $Y = X - T$ dan $p = P(Y > 0) = \text{"process proportion"}$ atau proporsi proses dengan nilai $p = 0.5$ yang mengindikasikan bahwa proses terkendali. Namun, ketika $p = p_1 \neq 0.5$ artinya proses berada diluar kendali, mengindikasikan bahwa proses tersebut telah bergeser atau berubah karena adanya penyebab yang dapat ditentukan atau diidentifikasi, yang disebut sebagai "*assignable cause*". Hal ini merujuk pada penyimpangan atau perubahan yang disebabkan oleh faktor eksternal atau yang tidak normal, yang berbeda dari variasi acak yang biasa terjadi dalam proses. Misalkan sebuah sampel acak dengan ukuran n telah dikumpulkan pada waktu t , X_{it} , $i = 1, 2, \dots, n$, dan $t = 1, 2, \dots$ untuk memantau penyimpangan dari target proses. Maka didefinisikan

$$Y_{it} = X_{it} - T \text{ dan } I_{it} = \begin{cases} 1, & \text{jika } Y_{it} > 0 \\ 0, & \text{sebaliknya} \end{cases} \text{ untuk } i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

sekarang, jika N_t adalah total bilangan dari I_{it} , maka $N_t = \sum_{i=1}^n I_{it}$ mengikuti distribusi binomial dengan parameter $(n, 0.5)$ untuk proses yang terkendali.

Sebuah skema bagan kendali yang baru disebut Nonparametrik "*Double EWMA*" (DEWMA) *sign chart* diusulkan untuk memantau karakteristik kualitas dari sebuah proses yang distribusinya belum diketahui atau belum teridentifikasi dengan jelas. Pemantauan statistik, DE_t , menyaring dua kali angka-angka yang tercatat secara berurutan N_t , menggunakan EWMA, Z_t , sebagai berikut:

$$DE_t = \lambda_2 Z_t + (1 - \lambda_2) DE_{t-1}, 0 < \lambda_2 \leq 1 \quad (3)$$

$$Z_t = \lambda_2 \sum_{j=1}^t \frac{1 - [(1 - \lambda_2)/(1 - \lambda_1)]^{t-j+1}}{1 - (1 - \lambda_2)/(1 - \lambda_1)} (1 - \lambda_1)^{t-j} N_j \quad (4)$$

dengan nilai awal $DE_0 = T = \frac{n}{2}$. Kemudian, substitusi persamaan (4) ke persamaan (3), Persamaan DEWMA adalah

$$DE_t = \lambda_1 \lambda_2 \sum_{j=1}^t \frac{1 - [(1 - \lambda_2)/(1 - \lambda_1)]^{t-j+1}}{1 - (1 - \lambda_2)/(1 - \lambda_1)} (1 - \lambda_1)^{t-j} N_j + \left((1 - \lambda_1) \lambda_2 \frac{(1 - \lambda_1)^t - (1 - \lambda_2)^t}{\lambda_2 - \lambda_1} + (1 - \lambda_2)^t \right) T \quad (5)$$

rata-ratanya adalah $E(DE_t) = \frac{n}{2}$, dan ketika $t \rightarrow \infty$, variansinya adalah sebagai berikut:

$$Var(DE_t) = \frac{n}{4} \cdot \left(\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \right)^2 \cdot \left\{ \frac{(1 - \lambda_1)^2}{1 - (1 - \lambda_1)^2} - 2 \frac{(1 - \lambda_1)(1 - \lambda_2)}{1 - (1 - \lambda_1)(1 - \lambda_2)} + \frac{(1 - \lambda_2)^2}{1 - (1 - \lambda_2)^2} \right\}$$

dimana varians simptotik digunakan untuk menyederhanakan bagan kendali nonparametrik DEWMA *Sign* dan untuk membandingkannya dengan skema EWMA. Dengan asumsi bahwa L menunjukkan lebar batas kendali, bagan kendali nonparametrik DEWMA *Sign* dapat dituliskan sebagai:

$$\begin{aligned} UCL &= \frac{n}{2} + L\sqrt{Var(DE_t)} \\ CL &= \frac{n}{2} \\ LCL &= \frac{n}{2} - L\sqrt{Var(DE_t)} \end{aligned} \quad (6)$$

Seiring dengan pergeseran proses, tindakan yang tepat harus diambil setiap kali DE_t berada di luar batas kendali.

Secara spesifik, ketika $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ di persamaan (5) dan $0 < \lambda \leq 1$, maka persamaan nonparametrik DEWMA bisa ditulis ulang sebagai :

$$DE_t = \lambda_2 \cdot \sum_{j=1}^t (t - j + 1)(1 - \lambda)^{t-j} N_j + (1 - \lambda)^t (1 + t\lambda)T \quad (7)$$

rata-rata dalam kasus ini adalah $E(DE_t) = \frac{n}{2}$, dan ketika $t \rightarrow \infty$, maka variansinya adalah

$$Var(DE_t) = \frac{n}{4} \cdot \lambda^4 \cdot \frac{1 + (1 - \lambda)^2}{[1 - (1 - \lambda)^2]^3} \quad (8)$$

1.10. Cumulative Sum Sign (CUSUM Sign)

Peta kendali CUSUM *Sign* adalah alat statistik yang digunakan untuk memantau perubahan lokasi dalam proses industri tanpa mengasumsikan distribusi tertentu dari data. Pendekatan ini memanfaatkan tanda (*sign*) dari data untuk mendeteksi pergeseran dalam median atau lokasi pusat proses. keunggulan utama dari metode ini adalah sifatnya yang bebas distribusi (*distribution free*), sehingga cocok untuk berbagai jenis data tanpa memerlukan asumsi distribusi spesifik.

Salah satu referensi yang membahas topik ini adalah artikel berjudul "A distribution-free adaptive CUSUM-sign chart for monitoring shifts in the location of

unknown industrial process" oleh Abbas et al. (2024), artikel tersebut mengembangkan CUSUM *sign* adaptif yang bebas berdistribusi untuk memantau lokasi proses, menawarkan pendekatan yang lebih fleksibel dan efektif dalam mendeteksi pergeseran lokasi tanpa tergantung pada asumsi distribusi data tertentu.

Definisi *sign test* adalah sebagai berikut:

jika $X_i > \theta_0$, maka $S_i = +1$

jika $X_i \leq \theta_0$, maka $S_i = 0$

dengan demikian:

$$S_i = \begin{cases} +1, & \text{jika } X_i > \theta_0 \\ 0, & \text{jika } X_i \leq \theta_0 \end{cases}$$

berikut adalah formula dari CUSUM *Sign*

$$C_i^+ = \max(0, C_{i-1}^+ + \text{sign}(X_i - \theta_0) - k) \quad (8)$$

$$C_i^- = \min(0, C_{i-1}^- + \text{sign}(X_i - \theta_0) + k)$$

dengan:

k : faktor sensitivitas untuk menentukan toleransi terhadap perubahan

$C_0^+ = 0$ dan $C_0^- = 0$ adalah nilai awal CUSUM *Sign*

h : batas kontrol (*control limit*), yang biasanya ditentukan melalui simulasi atau berdasarkan tingkat false alarm (alarm palsu) yang diinginkan.

1.11. Average Run Length (ARL)

Average Run Length (ARL) adalah salah satu cara yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja dari peta kendali. ARL adalah rata-rata banyaknya titik sampel yang harus diplot sampai sampel tersebut menunjukkan adanya kondisi yang tidak terkendali (*out of control*). Secara umum terdapat dua nilai ARL yaitu ARL_0 (*in control*) dan ARL_1 (*out of control*). ARL_0 digunakan jika proses berada dalam keadaan yang terkendali secara statistik, dan ARL_1 digunakan apabila proses terjadi dalam keadaan tidak terkendali (Van Delsen, 2015).

ARL adalah salah satu metode untuk mengevaluasi peta kendali yang menunjukkan rata-rata jumlah observasi yang perlu diplot sebelum muncul sinyal ketidakterkendalian. Semakin kecil nilai ARL dari sebuah peta kendali, maka semakin cepat peta kendali tersebut dapat mendeteksi ketidakterkendalian.

1. ARL untuk *in control process*

Nilai ARL yang digunakan untuk proses yang terkendali adalah sebagai berikut

$$ARL_0 = \frac{1}{P(\text{Tolak } H_0 | H_0 \text{ Benar})} = \frac{1}{\alpha} \quad (9)$$

Dengan α adalah tingkat *false alarm* atau probabilitas deteksi sinyal ketika proses berada dalam kondisi normal.

2. ARL untuk *out of control process*

Nilai ARL pada Shewhart dapat diperoleh sebagai berikut

$$ARL_1 = \frac{1}{P(\text{Tolak } H_0 | H_0 \text{ Benar})} = \frac{1}{1 - \beta} \quad (10)$$

dimana H_0 adalah proses dalam keadaan terkendali (*in control*). Selanjutnya dalam uji hipotesis α adalah tipe kesalahan I yang merupakan probabilitas menetapkan bahwa proses dalam keadaan tidak terkendali (*out of control*) tetapi nyatanya proses dalam keadaan terkendali (*in control*). Sedangkan dalam uji hipotesis β adalah tipe kesalahan II yang merupakan probabilitas menetapkan bahwa proses dalam keadaan terkendali tetapi nyatanya proses dalam keadaan yang tidak terkendali sehingga $1 - \beta$ merupakan probabilitas yang menetapkan bahwa proses dalam keadaan tidak terkendali sebagai proses yang *out of control* (Stivo & Van Delsen, 2015).

Simulasi Monte Carlo adalah metode analisis yang menggunakan data acak untuk menghasilkan statistik probabilitas yang membantu memahami pengaruh suatu ketidakpastian. Monte Carlo bekerja sebagai program sederhana yang menghasilkan data acak berdasarkan distribusi tertentu untuk kemudian disimulasikan. Metode ini dapat diterapkan untuk menghitung nilai *Average Run Length* (ARL). Estimasi nilai ARL menggunakan Monte Carlo dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$ARL = \frac{\sum_{i=1}^N RL_i}{N}$$

Dengan:

ARL : Rata-rata titik sampel sebelum terjadi satu *out of control*

RL_i : Jumlah titik sampel sebelum terjadi satu *out of control* pada simulasi ke- i

N : Jumlah perulangan simulasi

D. C. Montgomery & Wiley 2009 dalam bukunya mengungkapkan bahwa ada banyak analisis studi dari kinerja ARL Cusum, berdasarkan dari studi-studi tersebut, ada beberapa rekomendasi umum untuk memilih nilai H dan K yang digunakan pada saat melakukan analisis ARL cusum.

$$ARL = \frac{\exp(-2\Delta b) + 2\Delta b - 1}{2\Delta^2} \quad (11)$$

Untuk $\Delta \neq 0$, dimana $\Delta = \delta^* - k$ untuk cusum satu sisi atas C_i^+ , $\Delta = -\delta^* - k$ untuk cusum satu sisi bawah, $b = h + 1.166$, dan $\delta^* = (\mu_1 - \mu_0)/\sigma$, bisa juga digunakan $ARL = b^2$.

Kuantitas δ^* mewakili pergeseran rata-rata, dalam satuan σ , untuk ARL yang akan dihitung. Jika $\delta^* = 0$ maka akan dilakukan perhitungan ARL_0 dari persamaan (11), namun jika $\delta^* \neq 0$ maka akan dilakukan perhitungan nilai ARL_1 yang sesuai dengan pergeseran δ^* . Untuk memperoleh ARL dua sisi cusum, yakni ARL^+ dan ARL^- digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{1}{ARL} = \frac{1}{ARL^+} + \frac{1}{ARL^-} \quad (12)$$

1.12. Dasar Teori Jaringan Komunikasi Data

Jaringan komunikasi data melibatkan transfer data melalui saluran komunikasi, menggabungkan konsep teoritis informasi, pengkodean, dan analisis jaringan. Claude

Shannon, pelopor teori informasi, mendefinisikan informasi sebagai ukuran pengurangan ketidakpastian dalam sinyal komunikasi. Penelitian lebih lanjut, seperti penggunaan teori informasi untuk komunikasi multi-pengguna telah memungkinkan desain jaringan yang lebih efisien, seperti pada teknologi 5G dan IoT (*Internet of Things*) (Shamai & Zaidi, 2020).

Pengkodean sumber dan saluran merupakan dasar untuk pengoptimalan jaringan. Pengkodean ini mencakup pengurangan redundansi dan pengelolaan kesalahan transmisi data, seperti pada metode pengkodean turbo atau polar. Teknologi modern kini mendekati kapasitas maksimal saluran komunikasi, sesuai batas yang ditetapkan oleh Shannon. Selain itu, pengembangan komunikasi data juga berfokus pada parameter lain seperti latensi, reliabilitas, dan konsumsi energi. Sistem modern, seperti *Cloud Radio Access Networks (C-RAN)*, mencerminkan aplikasi praktis dari teori komunikasi untuk memenuhi kebutuhan pengguna yang semakin kompleks (Shamai & Zaidi, 2020).

Jaringan data juga mencakup konsep interkoneksi dan integrasi perangkat di dalam *Internet of Things (IoT)*. Ini memanfaatkan analisis data besar untuk manajemen jaringan secara *real-time*, meningkatkan efisiensi dan keandalan dalam komunikasi antar perangkat. Dengan teknologi seperti *edge computing* dan 6G yang muncul, penelitian terus berlanjut untuk mengembangkan algoritma baru yang mampu mengatasi keterbatasan saat ini dalam jaringan, termasuk aspek seperti keamanan informasi, prioritas data, dan pengelolaan sumber daya spektrum (Shamai & Zaidi, 2020).

1.13. Sistem Pemantauan Jaringan Komunikasi Data

Menurut Suryadi (1993), komunikasi data adalah bagian dari teknologi komunikasi yang secara khusus berkenaan dengan transmisi atau pemindahan data dan informasi di antara komputer dan piranti-piranti yang lain dalam bentuk digital yang dikirimkan melalui media komunikasi data. Data berarti informasi yang disajikan oleh kode digital. Komunikasi data merupakan bagian penting dari infrastruktur yang memungkinkan komputer-komputer dapat berkomunikasi satu sama lain. Sistem komunikasi data dapat dibagi menjadi tiga komponen utama yaitu sumber komunikasi, media komunikasi dan penerima.

Komunikasi data adalah pertukaran data antara dua perangkat melalui beberapa bentuk media transmisi seperti kabel (Fatih & Ropianto, 2023). Agar komunikasi data dapat terjadi, perangkat yang berkomunikasi harus menjadi bagian dari sistem komunikasi yang terdiri dari kombinasi perangkat keras (peralatan fisik) dan perangkat lunak (program) (Fatih & Ropianto, 2023).

Untuk berlangsungnya komunikasi data perlu jaringan komunikasi data. Jaringan komputer merupakan sekumpulan komputer yang saling terhubung satu sama lain menggunakan protokol, dimana berdasarkan luas area cakupan yang dicapai jaringan komputer dapat diklasifikasikan menjadi *Local Area Network (LAN)* dan *Wide Area Network (WAN)* (Fatih & Ropianto, 2023).

Menurut Fatih et al (2023), proses komunikasi dapat berlangsung jika setiap peralatan komunikasi yang digunakan saling terhubung satu sama lain dan menjadi bagian dari sistem komunikasi keseluruhan. Karena itu, proses komunikasi data yang

berlangsung dalam sistem komunikasi data umumnya terdiri dari tiga sistem utama yaitu sistem sumber, sistem transmisi, dan sistem tujuan.

1. Sistem sumber adalah sistem pengirim data yang terdiri atas sumber data dan *transmitter*.
2. Sistem transmisi adalah sistem pengiriman data berupa jaringan dan transmisi tunggal maupun kompleks yang menghubungkan sumber data dan tujuan. Pengiriman data menggunakan sistem transmisi mengandung arti bahwa data dikirimkan melalui saluran komunikasi *point-to-point* atau *point-to-multipoint*, misalnya serat optik atau saluran komunikasi nirkabel.
3. Sistem tujuan adalah sistem penerimaan data terdiri atas penerima data dan tujuan.

Ketiga sistem ini harus ada dalam proses komunikasi data. Jika salah satu unsur dalam sistem tersebut tidak ada, maka komunikasi data tidak dapat dilakukan. Adapun unsur-unsur yang terdapat di setiap sistem adalah *source* (sumber data), *transmitter*, media komunikasi data (medium), *receiver* (penerima), *message* (pesan) dan protokol (Fatih et al, 2023)

Beberapa ahli berpendapat bahwa jaringan komunikasi data adalah kumpulan komputer dan perangkat lain yang saling terhubung sehingga memungkinkan pertukaran data dan sumber daya (Andrew S, 1981). Jaringan komunikasi data adalah jaringan yang terdiri dari berbagai perangkat yang digunakan untuk mentransmisikan data dan memungkinkan berbagai perangkat tersebut berkomunikasi satu sama lain (Stallings W, 1987). Jaringan komunikasi data adalah jaringan yang digunakan untuk mentransmisikan informasi dari satu titik ke titik lainnya, memungkinkan komunikasi yang cepat dan efisien (Halsall, 1996). Maka dapat disimpulkan bahwa, jaringan komunikasi data adalah sebuah sistem yang memungkinkan pertukaran data antara komputer dan perangkat lain melalui media komunikasi. Jaringan ini terdiri dari berbagai perangkat seperti komputer, *router*, dan *switch* yang terhubung secara fisik atau melalui teknologi nirkabel untuk mengirimkan, menerima, dan memproses data. Pengertian ini mencakup beberapa aspek utama:

1. Pertukaran data: Inti dari jaringan komunikasi data adalah kemampuan untuk mentransmisikan data dari satu perangkat ke perangkat lain.
2. Koneksi: jaringan ini dapat menggunakan berbagai jenis koneksi, baik kabel (seperti fiber optik atau kabel tembaga) maupun nirkabel (seperti Wi-Fi atau teknologi seluler).
3. Perangkat jaringan: termasuk komputer, server, *router*, *switch*, dan perangkat jaringan lainnya yang bekerja bersama untuk memastikan data mencapai tujuan yang diinginkan.
4. Efisiensi dan kecepatan: Salah satu tujuan utama dari jaringan komunikasi data adalah untuk memastikan bahwa data dikirim dengan cepat dan efisien, dengan minimal gangguan atau kehilangan data.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Putra, Sukri, & Zuhri (2018) dengan judul Sistem *Monitoring Realtime* Jaringan Irigasi Desa (JIDES) dengan konsep Jaringan Sensor Nirkabel, Jaringan Sensor Nirkabel ini mengikuti tahapan proses yang sistematis

dan hasilnya menunjukkan waktu *update* data ketinggian air setiap 60 detik antara titik *node* dengan waktu pengiriman ke *database server* rata-rata setiap 60 detik.

1.14. *Fiber-Optic*

Fiber optik adalah kabel berbahan serat optik yang menggunakan cahaya sebagai media transmisinya untuk mengirim data. Fiber optik dengan kecepatannya dalam mentransmisikan data. Untuk struktur kabel Fiber Optik pada umumnya terdiri dari bagian paling luar adalah pelindung (*coating*), kelongsong (*tube*), dan bagian dalam (*core*) (Irfan Hanif, Defiana Arnaldy, 2017). Butuh waktu yang cukup lama untuk merealisasikan migrasi jaringan teknologi *wireless* ke fiber optik karena harus membangun sebuah infrastruktur jalur kabel yang cukup banyak dan luas agar mudah di koneksikan ke sisi klien (Hanif & Arnaldy, 2017).

Fiber optik adalah teknologi yang menggunakan serat kaca atau plastik yang sangat tipis untuk mentransmisikan data dalam bentuk cahaya. Teknologi ini digunakan secara luas dalam komunikasi karena mampu mentransfer informasi dengan kecepatan tinggi dan dalam jarak jauh dengan sedikit kehilangan sinyal. Fiber optik juga digunakan dalam berbagai aplikasi lainnya, termasuk sensor, pencahayaan, dan medis.

Senior (1985) dalam bukunya *Optical Fiber Communications*, mendefinisikan *fiber optic* sebagai media tipis dan fleksibel yang mampu memandu cahaya dari satu ujung ke ujung lainnya, digunakan terutama untuk telekomunikasi dan transmisi data. Agrawal (2002) dalam buku *Fiber-Optic Communication Systems* menyatakan bahwa *fiber optic* adalah media transmisi yang digunakan untuk mengirimkan data dalam bentuk cahaya, memberikan *bandwidth* tinggi dan kemampuan komunikasi jarak jauh. Keisser (2000) dalam buku *Optical Fiber Communications* menjelaskan bahwa *fiber optic* adalah serat fleksibel dan transparan yang terbuat dari kaca (silika) atau plastik, sedikit lebih tebal dari rambut manusia, yang dapat mentransmisikan cahaya di antara kedua ujung serat. Pengertian-pengertian ini menekankan kemampuan fiber optik dalam mentransmisikan data melalui cahaya, memberikan kecepatan tinggi, dan jangkauan yang luas dengan sedikit kehilangan sinyal, yang membuatnya sangat berguna dalam komunikasi dan aplikasi lainnya.

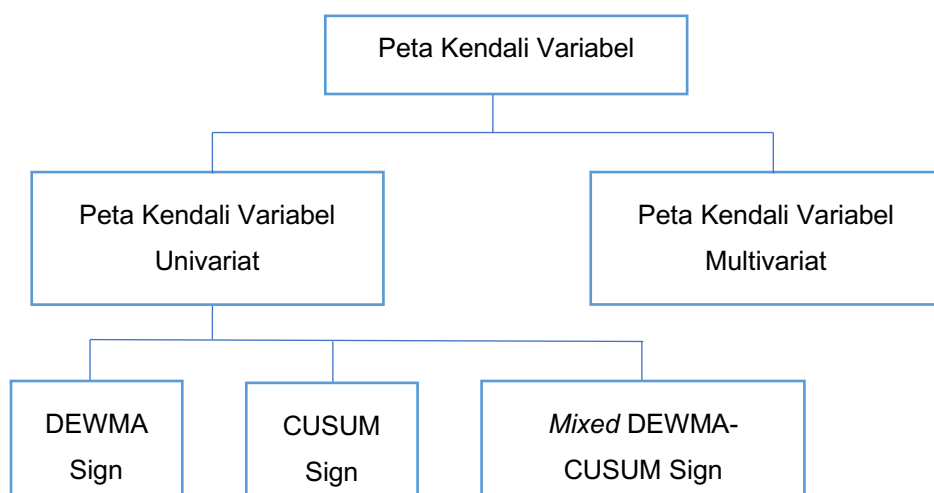
1.15. *Anomali Latency*

Anomali *latency* merujuk pada penyimpangan atau ketidaknormalan dalam waktu tunda (*latency*) yang diharapkan dalam transmisi data melalui jaringan. Ini berarti waktu yang dibutuhkan untuk data untuk berpindah dari satu titik ke titik lain dalam jaringan melebihi waktu yang diharapkan atau standar. Jacobson (1988) menyebutkan bahwa anomali *latency* adalah penundaan tak terduga dalam transmisi data yang dapat terjadi karena berbagai faktor seperti kemacetan jaringan, *loop routing*, atau kegagalan perangkat keras, yang mempengaruhi kinerja komunikasi jaringan secara keseluruhan. Paxson (1999) juga berpendapat bahwa anomali *latency* adalah penyimpangan signifikan dari pola keterlambatan yang biasa dalam transmisi paket, yang dapat menunjukkan masalah seperti kemacetan, perubahan jalur, atau kehilangan paket dalam jaringan.

Anomali *latency* adalah variasi tak terduga dalam waktu yang dibutuhkan untuk paket melintasi jaringan, seringkali diakibatkan oleh kemacetan jaringan, anomali

routing, atau berbagai tingkat lalu lintas silang (Dovrolis et al., 2001). Oleh karena itu, anomali *latency* dapat mempengaruhi kualitas layanan jaringan dan menyebabkan masalah seperti keterlambatan dalam aplikasi waktu nyata, penurunan *throughput*, dan pengalaman pengguna yang buruk. Anomali ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk kemacetan jaringan, perubahan rute, kegagalan perangkat keras, atau gangguan lainnya yang mempengaruhi kinerja jaringan.

1.16. Konseptual *Framework*



Gambar 1. Kerangka Konseptual

BAB II METODE PENELITIAN

2.1. Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh di Kantor Wilayah Salah satu Perusahaan ICT Nasional yang ada di Makassar. Perusahaan ICT tersebut memiliki beberapa layanan komunikasi data seperti Internet, Ip VPN dan *Metro-Ethernet*, dengan beberapa media akses seperti *fiber optic*, *radio wireless*, *vsat* (satelit) dan seluler.

2.2. Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini adalah *latency pingtime*.

2.3. Metode Analisis Data

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

1. Menggunakan metode berbasis sign test pada data *latency pingtime*, sehingga data berubah menjadi 0 dan 1, data bernilai 0 untuk data *latency* yang ideal ($\text{pingtime} \leq 3$), dan 1 untuk data yang diluar angka *latency* ideal ($\text{pingtime} > 3$).
2. Menentukan bobot λ yang optimal untuk digunakan pada peta kendali DEWMA
3. Menentukan batas kendali dari peta kendali DEWMA berdasarkan mean dan variansi
4. Menggunakan peta kendali CUSUM Sign
5. Membuat model Peta kendali Mixed DEWMA-CUSUM Sign dan melakukan implementasi terhadap data berbasis sign.
6. Menghitung masing-masing nilai ARL dari ketiga metode
7. Penarikan kesimpulan