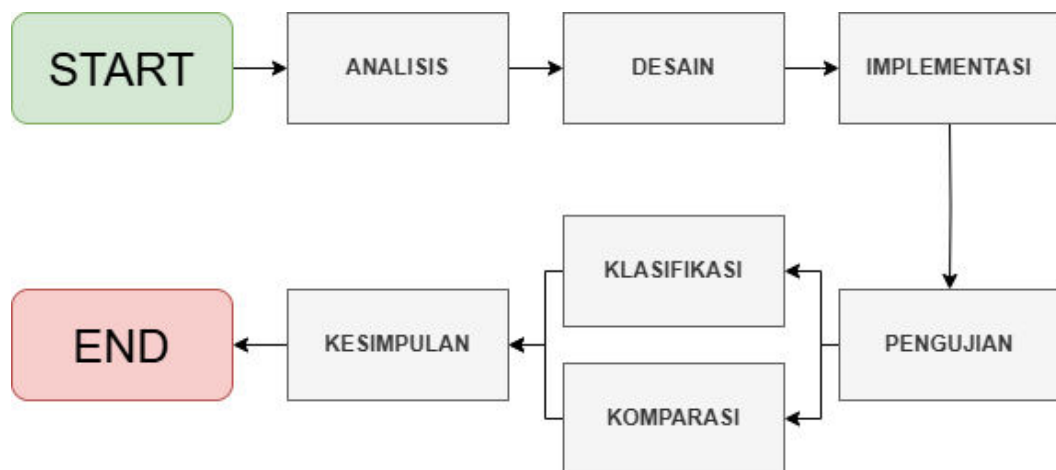


BAB III

METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan di RT/RW Net yang beralamat di Jamanis, Kabupaten Tasikmalaya, Jawa Barat, 46175.



Gambar 3.1 Metode Penelitian

Dalam penelitian ini fokus pada empat tahapan utama yang sudah disesuaikan dengan tujuan penelitian ini, sebagai berikut:

- 1) *Analysis* – Analisis kebutuhan dan parameter pengujian.
- 2) *Design* – Perancangan sistem *remote*, prosedur pengujian.
- 3) *Implementation* – Realisasi dan instalasi sistem *remote*.
- 4) Pengujian – Realisasi pemantauan, pengujian parameter.
- 5) Kesimpulan – Ringkasan Perbandingan dan Analisis Akhir

Penelitian ini dijadwalkan berlangsung selama tiga bulan, dengan estimasi waktu yang optimal untuk pengumpulan data. Meskipun demikian, tidak menutup kemungkinan penelitian dapat selesai lebih cepat, dan peneliti akan berupaya semaksimal mungkin agar penelitian dapat selesai sesuai jadwal yang diajukan.

3.1. Analisis Kebutuhan dan Parameter Pengujian

3.1.1. Penetapan Parameter Kinerja

Parameter kinerja yang digunakan untuk mengevaluasi kedua teknologi (SD-WAN *ZeroTier* dan VPN Konvensional) difokuskan pada aspek *Quality of Service* (QoS) dan *routing*. Parameter ini adalah:

- 1) *End-to-End Delay* merupakan waktu yang dibutuhkan paket data untuk bergerak dari sumber ke tujuan. *End-to-End Delay* diukur dalam milidetik (ms).
- 2) *Delay Variation* merupakan variasi atau fluktuasi waktu tunda antara kedatangan paket yang berurutan. *Delay Variation (Jitter)* dalam satuan milidetik yang diperoleh dari menganalisis perhitungan waktu total variation delay dengan banyak paket (Nadarajah & Ba, 2025).

$$\text{Delay Variation} = \frac{\text{total variation delay} = \sum_{i=1}^n \text{variation delay}(\text{delay}^{i+1} - \text{delay}^i)}{\text{total packet received}} \quad (1)$$

- 3) *Packet loss Rasio* merupakan persentase paket data yang hilang atau gagal mencapai tujuan selama transmisi. Persentase kehilangan dihitung dan dibandingkan dengan ambang batas. *Packet loss Rasio* dapat dirumuskan:

$$\text{Packet Loss Ratio} = \frac{\text{Packet drop}}{\text{Packet send}} \times 100\% \quad (2)$$

- 4) *Hop count* merupakan Jumlah node atau router yang dilewati oleh paket data dari sumber ke tujuan, digunakan untuk menilai jalur terpendek *routing* kedua arsitektur.

- 5) Parameter kinerja yang digunakan untuk mengevaluasi kedua teknologi (SD-WAN *ZeroTier* dan VPN Konvensional) difokuskan pada aspek *Quality of Service* (QoS) dan *routing*. Selain itu, penelitian ini juga mengukur Beban *remote* (*traffic Utilization*) dan Penggunaan CPU (*CPU Utilization*) pada Mikrotik.

3.1.2. Standar Acuan Kinerja

Untuk memberikan penilaian objektif terhadap kinerja yang diukur, hasil penelitian akan dibandingkan dengan standar sebagai berikut:

- 1) Standar *Quality of Service* dengan menggunakan rekomendasi ITU-T Y.1541 (ITU-T, 2019) dengan kriteria Class 0 sebagai standar acuan untuk mengklasifikasikan kinerja layanan. Berdasarkan parameter pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter QoS (ITU-T Y.1541)

Parameter	Hasil Uji	Standar Y.1541	Keterangan
<i>End-to-End Delay</i>	- ms	≤ 100 ms (Class 0)	OK/Tidak OK
<i>Delay Variation</i>	- ms	≤ 50 ms (Class 0)	OK/Tidak OK
<i>Packet loss Ratio</i>	- %	$\leq 0.05\%$ (Class 0)	OK/Tidak OK

- 2) Standar Khusus Hop Count, karena tidak ada standar baku internasional untuk hop count, evaluasi dilakukan secara komparatif dengan membandingkan nilai yang dihasilkan oleh SD-WAN *ZeroTier* dengan VPN Konvensional. Nilai hop count yang lebih rendah dianggap menunjukkan arsitektur *routing* yang lebih pendek.

3.1.3. Alat dan Bahan Sistem *Remote*

Alat dan bahan yang digunakan dalam sistem *remote* dikelompokkan menjadi dua bagian utama: Perangkat Keras (Hardware) sebagai komponen fisik dan Perangkat Lunak (Software) sebagai sistem operasi dan tools pengujian.

3.1.4. Perangkat Keras

Perangkat keras yang digunakan berfungsi sebagai *gateway*, *router* utama RT/RW Net, dan perangkat *client* untuk simulasi akses jarak jauh dan pengujian kinerja.

Tabel 3.2 Perangkat Keras

No	Perangkat	Spesifikasi	Fungsi
1	Gateway SD-WAN	TP-Link TL-WDR4300	Bertindak sebagai gateway jaringan utama yang menjalankan firmware OpenWRT dan <i>ZeroTier</i> One untuk koneksi SD-WAN.
2	Router Utama	MikroTik RB941-2nD	Berfungsi sebagai router utama RT/RW Net untuk mengelola traffic lokal dan pembanding (baseline) VPN Konvensional.
3	Perangkat Klien (PC)	Laptop Dell	Digunakan untuk menjalankan <i>client ZeroTier</i> , <i>client</i> VPN, dan menjalankan <i>tools</i> pengujian QoS (HTTP-Ping, Tracert).
4	Perangkat Klien (Mobile)	Redmi 14C	Digunakan untuk simulasi koneksi <i>remote access</i> melalui jaringan seluler atau Wi-Fi publik.
5	Media Transmisi	Kabel UTP Kategori 5e/6	Media penghubung fisik antar router utama dan Gateway SD-WAN.

3.1.5. Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan mencakup sistem operasi pada gateway, aplikasi SD-WAN, dan tools yang krusial untuk pengukuran metrik kinerja.

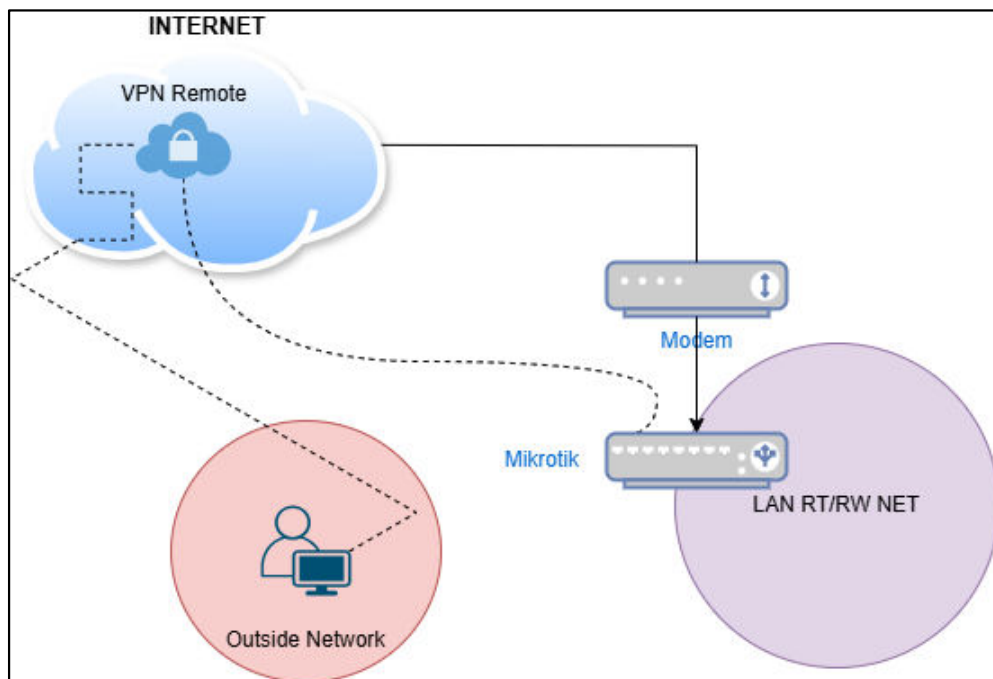
Tabel 3.3 Perangkat Lunak

No	Perangkat Lunak	Spesifikasi	Fungsi
1	Firmware Router	OpenWRT 19.07.10	Firmware dipasang pada <i>Gateway</i> TP-Link WDR4300 untuk mendukung <i>ZeroTier</i> .
2	Akun VPN <i>Remote</i>	FreeDDNS	Akun untuk layanan vpn <i>remote</i> konvensional
2	Platform SD-WAN	<i>ZeroTier</i>	Klien utama yang diinstal pada <i>gateway</i> dan <i>client</i> untuk SD-WAN virtual <i>Peer-to-peer</i> .
3	Pengukur QoS	HTTP-Ping	Digunakan untuk mengukur metrik <i>End-to-End Delay</i> (EED) dan <i>Packet loss Ratio</i> (PLR).
4	Peng analisis Jaringan	Wireshark	Digunakan untuk menganalisis dan menghitung variasi waktu antar paket (<i>Jitter</i>) serta mengamati paket data yang hilang.
5	Pengukur Hop Count	Tracert (<i>Traceroute</i>)	Digunakan untuk membandingkan jalur <i>routing</i> dengan menghitung jumlah <i>hop</i> yang dilewati oleh paket.
6	Management Network	Winbox	Digunakan manajemen jaringan, konfigurasi monitoring cpu, interface dan lain-lain untuk <i>remote</i> sistem operasi RouterOS

7	Sistem Operasi Klien	Windows 11 dan Android/iOS	Platform operasi pada perangkat <i>client</i> yang digunakan untuk koneksi dan pengujian.
---	----------------------	----------------------------	---

3.2. Perancangan Sistem *Remote*

Dalam tahap ini, dilakukan perancangan dua topologi jaringan yang menjadi objek penelitian: topologi jaringan yang sedang beroperasi berbasis Layanan VPN *remote* konvensional dan topologi jaringan usulan dengan implementasi SD-WAN berbasis *ZeroTier*. Kedua desain ini dibuat untuk mencerminkan kondisi nyata jaringan RT/RW Net dan perbandingan mekanisme akses jarak jauhnya.

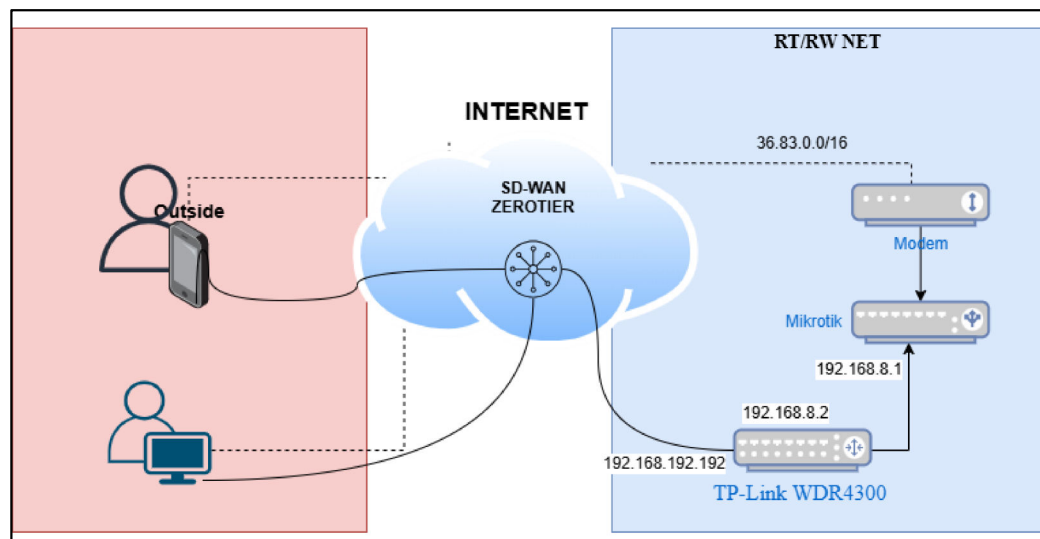


Gambar 3.2 Topologi *Remote* Layanan VPN Konvensional

Pada jaringan RT/RW Net yang sedang beroperasi saat ini, terdapat dua sumber utama layanan internet, yakni satu dari *Internet Service Provider* (ISP) berbasis kabel. Terlihat pada Gambar 3.2 untuk mengakses perangkat jaringan inti secara jarak jauh, jaringan ini memanfaatkan mekanisme *VPN Remote access* menggunakan protokol OpenVPN yang dikonfigurasi pada router utama

(MikroTik). Mekanisme ini digunakan sebagai solusi terhadap keterbatasan akses langsung akibat tidak tersedianya IP Publik Statis dari pihak ISP.

Konfigurasi jaringan ini cukup fleksibel dalam mengakomodasi berbagai kebutuhan pengguna, namun menuntut pengelolaan supaya stabil dan kualitas layanan tetap terjaga. Penggunaan VPN konvensional di sisi lain juga membawa keterbatasan dalam aspek skalabilitas dan kemudahan manajemen, terutama bagi pengelola RT/RW Net dengan sumber daya teknis terbatas.



Gambar 3.3 Topologi SDWAN ZeroTier

Sebagai solusi alternatif terhadap keterbatasan VPN konvensional, penelitian ini mengusulkan desain jaringan baru (Gambar 3.3) dengan implementasi SD-WAN berbasis *ZeroTier*. Dalam desain ini, SD-WAN *Gateway* diinstal pada perangkat TP-Link WDR4300 yang menggunakan sistem operasi OpenWRT dan diintegrasikan langsung ke jaringan lokal. Perangkat SD-WAN *Gateway* dihubungkan dengan *router* utama MikroTik menggunakan satu segmen jaringan, dengan konfigurasi alamat IP sebagai berikut:

- 1) *Router Hotspot* (RB941-2nD): 192.168.8.1/30
- 2) *SD-WAN Gateway* (TP-Link WDR4300): 192.168.8.2/30

Konfigurasi ini memungkinkan pengelola jaringan RT/RW Net untuk mengakses *router* utama tidak hanya dari dalam jaringan lokal, tetapi juga secara *remote* (jarak jauh) melalui jaringan *overlay ZeroTier* tanpa bergantung pada IP publik statis. *ZeroTier* bekerja sebagai jaringan virtual terenkripsi (virtual SD-WAN) yang membentuk konektivitas *peer-to-peer* langsung antar perangkat dengan pengalamatan jaringan privat. Implementasi ini tidak hanya menyederhanakan proses konfigurasi akses jarak jauh, tetapi juga menghadirkan fleksibilitas dalam pengelolaan jaringan, termasuk dari sisi pemantauan performa dan keamanan. Selain itu, desain ini memungkinkan evaluasi langsung terhadap kualitas layanan jaringan melalui parameter QoS, serta perbandingan mekanisme *remote access* terhadap desain Layanan VPN *Remote* yang telah ada.

3.2.1. Tahapan Konfigurasi Sistem *Remote*

3.2.1.1. Konfigurasi VPN Konvensional

Implementasi arsitektur *remote* akses teknologi VPN Konvensional menggunakan akun vpn *remote* seperti OpenVPN dari FreeDDNS, dengan layanan *port forwarding* ke port HTTP. Pada penelitian ini Mikrotik yang digunakan adalah seri RB941-2nD.

3.2.1.2. Konfigurasi SD-WAN *SaaS ZeroTier*

Implementasi arsitektur *remote* akses teknologi SD-WAN *SaaS* menggunakan *custom firmware* pada perangkat TP-Link WDR4300, karena secara bawaan perangkat ini tidak mendukung teknologi *Software-Defined Networking* (SDN).

Oleh karena itu, digunakan OpenWRT sebagai *firmware* alternatif yang memungkinkan penerapan fitur-fitur jaringan yang lebih fleksibel. Firmware yang dipilih untuk implementasi ini adalah OpenWRT versi 19.07.10 r11427-9ce6aa9d8d, yang dipilih karena stabilitasnya serta dukungannya terhadap fitur-fitur yang diperlukan dalam penerapan SD-WAN berbasis *ZeroTier*. Langkah selanjutnya adalah instalasi, konfigurasi, autentikasi dan *routing ZeroTier*. supaya dapat berfungsi sebagai SD-WAN *Gateway* dalam jaringan RT/RW Net

3.2.1.3. Konfigurasi *Client*

Untuk VPN Konvensional tidak memerlukan konfigurasi disisi *Client* dan langsung bisa diakses melalui web browser. Sedangkan SD-WAN *SaaS ZeroTier* memerlukan aplikasi *ZeroTier* atau *ZeroTier One* di smartphone dan pengaturan di sisi *client* terlebih dahulu, supaya terhubung di dalam jaringan SD-WAN *SaaS ZeroTier*.

3.3. Prosedur pengujian dan analisis data

Prosedur pengujian kinerja dalam penelitian ini diimplementasikan melalui pendekatan eksperimental yang dieksekusi pada kondisi jaringan stabil selama masa *off-peak hours* untuk memastikan lingkungan pengujian yang bersifat deterministik dan bebas dari interferensi trafik eksternal. untuk mendapatkan data kuantitatif kinerja. Pengujian dilakukan secara komparatif pada dua arsitektur yang telah diimplementasikan, yaitu SD-WAN *ZeroTier* dan VPN Konvensional.

3.3.1. Skenario Pengujian

1. Titik Pengukuran, data dikumpulkan dari *Client* Jarak Jauh menuju *Router* utama berupa paket data HTTP berkapasitas 7062 *bytes/paket*.

2. Jumlah Pengulangan, setiap metrik kinerja diukur sebanyak 10 kali pengulangan dengan jumlah transmisi 100 paket data untuk setiap arsitektur. Pengulangan ini bertujuan untuk mendapatkan data yang valid dan mewakili variasi kondisi jaringan yang mungkin terjadi.
3. Data Representatif, Hasil dari 10 kali pengulangan akan diolah untuk mendapatkan nilai rata-rata (*mean*) yang digunakan sebagai data representatif akhir.

Prosedur Pengambilan Data *Hop count*

Pengambilan data *Hop count* bertujuan untuk membandingkan jalur *routing* antara teknologi *Peer-to-peer* SD-WAN *ZeroTier* dan *Client-Server* VPN Konvensional.

1. Client dihubungkan ke internet publik dan dikoneksikan ke *ZeroTier* Network (Skenario A).
2. *Tool* Tracert atau Traceroute dijalankan pada *client* dengan tujuan alamat web server RT/RW Net yang diakses melalui koneksi *ZeroTier*.
3. Jumlah lompatan (*hop*) yang dicatat oleh tool dicatat sebagai hasil.
4. Langkah 1 sampai 3 diulangi dengan client terhubung ke VPN Konvensional (Skenario B).
5. Proses ini diulang total 10 kali, 5 kali di PC melalui jaringan publik dan 5 kali di smartphone melalui jaringan seluler untuk mendapatkan nilai rata-rata Hop Count pada kedua arsitektur.

3.3.1.4. Prosedur Pengambilan Data *End-to-End Delay* dan *Packet loss* Rasio

Pengambilan data dilakukan secara simultan menggunakan *tool* HTTP-Ping atau perintah *ping* standar pada *client* PC yang terhubung melalui *remote access*.

1. Koneksi *remote access ZeroTier* diaktifkan pada client.
2. Client menjalankan perintah *http-ping* ke alamat IP Mikrotik di jaringan RT/RW Net. Pengaturan *ping* disesuaikan untuk mengirimkan paket data dalam jumlah yang cukup selama durasi tertentu.
3. Data nilai waktu tunda dan jumlah paket yang hilang (*lost*) dicatat untuk diolah.
4. Langkah 1 sampai 3 diulangi dengan koneksi VPN Konvensional diaktifkan.
5. Proses ini diulang sebanyak 10 kali pada kedua arsitektur untuk mendapatkan nilai rata-rata.

3.3.1.5. Prosedur Pengambilan Data *Delay Variation*

Pengambilan data *Jitter* dilakukan dengan menganalisis waktu kedatangan paket yang berurutan menggunakan *tool* Wireshark untuk akurasi yang lebih tinggi dalam kondisi jaringan berbeban.

1. Wireshark diaktifkan pada perangkat client dan server untuk menangkap paket yang dikirimkan melalui koneksi *remote access* (baik *ZeroTier* maupun VPN).
2. Data atau traffic dari HTTP-ping dikirimkan dari client ke server.
3. Proses *capture* dihentikan, dan diekspor sebagai CSV untuk dianalisis menggunakan spreadsheet lebih lanjut.
4. *Jitter* dihitung berdasarkan selisih waktu tunda antar paket yang berurutan.
5. Pengukuran ini diulang 10 kali untuk setiap arsitektur, dan nilai *Jitter* rata-rata dicatat.

3.3.1.6. Prosedur Pengambilan Data CPU dan *Traffic Winbox*

Pengambilan data *CPU Utilization* dan *Traffic Utilization* diamati selama 30 detik terhitung sejak inisiasi kondisi, dilakukan untuk menganalisis total *Overhead* pemrosesan yang ditimbulkan oleh masing-masing teknologi pada *Router MikroTik*. Pengukuran dilakukan dengan mencatat rata-rata *CPU Load* dan *Traffic* dengan kondisi pengujian pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Kondisi Pengujian CPU dan *Traffic*

No.	Kondisi Pengujian	Tujuan Pengukuran
1.	IDLE (<i>Baseline</i>)	Layanan VPN & SD-WAN dimatikan, tidak ada klien lokal maupun <i>remote</i> aktif. Menentukan CPU <i>Baseline</i> , <i>Overhead</i> minimum sistem operasi.
2.	VPN Aktif (Tidak Ada <i>Traffic</i>)	Layanan VPN Konvensional dihidupkan (<i>listening</i>), tetapi tidak ada klien yang terhubung secara <i>remote</i> . Mengukur <i>Overhead</i> saat service hanya berjalan (<i>running service Overhead</i>).
3.	SD-WAN Aktif (Tidak Ada <i>Traffic</i>)	Layanan SD-WAN <i>ZeroTier</i> dihidupkan (<i>running</i>), tetapi tidak ada klien yang terhubung secara <i>remote</i> . Mengukur <i>Overhead</i> saat service hanya berjalan (<i>running service Overhead</i>).
4.	VPN Aktif & <i>Loaded</i>	Layanan VPN Konvensional aktif, dan klien <i>remote</i> terhubung serta mengirim traffic pengukuran (<i>ping</i>). Mengukur Total <i>Overhead</i> saat pemrosesan <i>remote</i> traffic saja.
5.	SD-WAN Aktif & <i>Loaded</i>	Layanan SD-WAN <i>ZeroTier</i> aktif, dan klien <i>remote</i> terhubung serta mengirim traffic pengukuran (<i>ping</i>). Mengukur Total <i>Overhead</i> saat pemrosesan <i>remote</i> traffic saja.

3.3.2. Metode Analisis Data

Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan Analisis Kuantitatif Komparatif. Data mentah yang dikumpulkan dari 10 kali

pengulangan pengujian pada kedua arsitektur akan diproses melalui tiga tahapan utama: Pengolahan Matematis, Klasifikasi Standar, dan Analisis Komparatif Kritis.

3.3.2.1. Pengolahan Data Kuantitatif

Tahap awal analisis adalah pengolahan data mentah menjadi nilai representatif.

Proses ini meliputi:

1. Perhitungan Nilai Rata-Rata (*Mean*), Untuk setiap metrik kinerja pada setiap arsitektur, data dari 10 kali pengulangan akan dihitung nilai rata-rata (*mean*) untuk mendapatkan angka yang stabil dan representatif. Perhitungan rata-rata ini bertujuan untuk meminimalisir noise atau anomali data yang mungkin terjadi pada satu kali pengujian.

$$Rata - Rata \text{ Metrik} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \text{Nilai Metrik}^{ke-i}}{10} \quad (3)$$

2. Perhitungan *Packet loss Ratio*, Nilainya akan dihitung berdasarkan perbandingan jumlah paket yang hilang dengan jumlah total paket yang dikirimkan, kemudian dikalikan 100% untuk mendapatkan persentase.

3.3.2.2. Analisis Klasifikasi Standar Kinerja

Setelah diperoleh nilai rata-rata dari masing-masing metrik QoS, nilai tersebut akan dianalisis dan diklasifikasikan menggunakan standar acuan kinerja:

1. Klasifikasi ITU-T Y.1541: Nilai rata-rata EED, *Jitter*, dan PLR dari implementasi *ZeroTier* akan dibandingkan dengan kriteria Tabel 3.1 Hasil perbandingan ini akan digunakan untuk menentukan kelas layanan yang dicapai oleh teknologi SD-WAN pada *remote* jaringan.

2. Penentuan Mutu Layanan: Hasil klasifikasi akan mengindikasikan apakah kinerja *ZeroTier* sudah memenuhi persyaratan ketat layanan real-time sesuai standar, atau hanya memenuhi kriteria layanan yang lebih rendah.

3.3.2.3. Analisis Komparatif

Tahap akhir adalah analisis mendalam yang mengintegrasikan semua temuan kuantitatif dan kualitatif untuk menjawab seluruh tujuan penelitian.

1. Perbandingan Kinerja QoS (Kuantitatif): Melakukan perbandingan secara langsung nilai rata-rata metrik kinerja antara arsitektur SD-WAN *ZeroTier* dan VPN Konvensional.
2. Analisis *Routing* (Hop Count): Hasil pengukuran Hop Count akan dibahas secara kritis. Perbedaan Hop Count antara *ZeroTier* dan VPN Konvensional akan dianalisis, menghubungkan temuan jalur dengan prinsip arsitektur *Peer-to-peer* dan Client-Server (VPN).
3. Evaluasi Implementasi Sistem (Kualitatif): Menganalisis temuan selama tahap Implementasi mengenai kemudahan instalasi, kompleksitas konfigurasi, dan fleksibilitas yang ditawarkan oleh kedua teknologi. Hal ini sangat relevan untuk konteks *remote* jaringan yang memerlukan solusi yang mudah dikelola.
4. Sintesis Kesimpulan: Menggabungkan semua hasil dari analisis QoS, Hop Count, dan faktor implementasi untuk menarik kesimpulan akhir mengenai kelayakan dan rekomendasi penggunaan SD-WAN *ZeroTier* untuk *remote* jaringan.