

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Penelitian pertama: Analisis Perbandingan Metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dan Quality of Service (QoS) Queue Tree pada Mikrotik untuk Optimalisasi Bandwidth di PLN UPT Cilegon. Topik ini membahas mengenai strategi optimalisasi bandwidth jaringan komputer dengan cara membandingkan dua pendekatan manajemen trafik, yaitu Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dan Quality of Service (QoS) Queue Tree yang diterapkan pada perangkat Mikrotik di lingkungan kerja PLN UPT Cilegon. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui metode mana yang lebih efektif dalam menjamin kestabilan koneksi internet, mengurangi latensi, serta memastikan distribusi bandwidth yang efisien. Pada pendekatan Load Balancing PCC (Per Connection Classifier), penelitian mengimplementasikan teknik pembagian beban trafik melalui dua jalur ISP berbeda dengan memanfaatkan fitur PCC (Per Connection Classifier) pada Mikrotik. Sementara itu, pada pendekatan QoS, konfigurasi dilakukan menggunakan Queue Tree dan Simple Queue untuk mengatur prioritas trafik. Pengukuran dilakukan terhadap parameter throughput, packet loss, latency, dan jitter. Hasilnya menunjukkan bahwa Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) meningkatkan throughput tetapi kurang menjaga prioritas aplikasi, sedangkan QoS lebih efektif dalam menjaga kualitas layanan aplikasi penting. Penelitian menyarankan kombinasi keduanya untuk hasil optimal di lingkungan kerja seperti PLN.

Penelitian kedua: Comparative Analysis of Network Quality Using QoS Parameters on Mikrotik Routers Using the Queue Tree and Simple Queue Methods. Topik ini membahas pengelolaan bandwidth pada jaringan sekolah melalui perbandingan metode Queue Tree dan Simple Queue pada router Mikrotik. Penelitian dilakukan di SMK Negeri Trienggadeng, dengan tujuan mengatasi distribusi bandwidth yang tidak merata. Metode penelitian menggunakan parameter QoS seperti Delay, Packet Loss, Jitter, dan Throughput. Hasil menunjukkan bahwa Simple Queue memiliki throughput lebih tinggi tetapi Queue Tree lebih stabil dan

cocok untuk distribusi bandwidth yang merata. Penelitian menyarankan penggunaan metode berdasarkan kebutuhan jaringan.

Penelitian ketiga: Implementation of Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) Per Connection Classifier on Mikrotik for Internet Services at Private Vocational Schools. Topik ini membahas implementasi metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) PCC pada perangkat Mikrotik di SMK dengan tiga ISP berbeda. Tujuan utamanya adalah memastikan semua pengguna mendapat layanan internet yang merata. Metode penelitian mencakup eksperimen langsung, dengan konfigurasi failover dan routing PCC. Hasilnya menunjukkan distribusi trafik yang seimbang dan nilai fairness index tinggi, menandakan bahwa semua pengguna mendapat alokasi bandwidth yang adil.

Penelitian keempat: Comparative Analysis of Performance Between ECMP and NTH Methods in Implementation of Mikrotik-Based Dual Link Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) Techniques. Penelitian ini membandingkan metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) ECMP dan NTH dengan dua jalur ISP menggunakan Mikrotik. Parameter yang diuji meliputi throughput, delay, jitter, dan packet loss. Hasilnya menunjukkan bahwa ECMP lebih stabil dalam delay dan throughput serta memiliki failover yang lebih cepat dibandingkan NTH. Meskipun demikian, NTH tetap dapat digunakan untuk sistem yang toleran terhadap variasi performa jaringan.

Penelitian kelima: Quality Analysis of Service Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) Using PCC, ECMP and NTH Methods. Penelitian ini menganalisis perbandingan performa QoS dari tiga metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) yaitu PCC, ECMP, dan NTH pada Mikrotik Router. Pengujian dilakukan menggunakan parameter throughput, delay, jitter, dan packet loss, serta uji failover. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode ECMP unggul dalam throughput dan delay, PCC unggul dalam packet loss (nilai terkecil), sedangkan NTH menghasilkan jitter dan packet loss tertinggi. ECMP juga menunjukkan waktu failover paling stabil. Penelitian menyimpulkan bahwa kombinasi teknik dapat meningkatkan kualitas layanan jaringan.

Penelitian keenam: Implementation of Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) With PCC Method And Failover Using Mikrotik At PT.

Maxpower Indonesia. Topik ini membahas penerapan metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) PCC dengan failover untuk menjaga stabilitas jaringan di PT. Maxpower Indonesia. Jaringan semula hanya menggunakan satu ISP, namun setelah diimplementasikan dua ISP dengan PCC dan failover, performa jaringan meningkat. Penelitian menunjukkan bahwa trafik terbagi merata antara kedua ISP dan jika salah satu ISP gagal, koneksi tetap berjalan menggunakan ISP cadangan. Konfigurasi dilakukan dengan metode PPDIIO dan diuji menggunakan Microsoft Teams sebagai simulasi trafik nyata.

Penelitian ketujuh: Computer Network Design and Implementation Using Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) Technique with PCC Method Based on Mikrotik Router. Penelitian ini membahas perancangan dan implementasi jaringan komputer menggunakan metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) PCC pada Mikrotik. Tujuan utamanya adalah memaksimalkan bandwidth dan mempercepat akses internet dalam jaringan dengan dua ISP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode PCC berhasil membagi koneksi pengguna ke dua jalur ISP secara merata, menurunkan latensi rata-rata hingga 30%, serta meningkatkan efisiensi bandwidth yang digunakan. Teknik ini dinilai cocok untuk institusi pendidikan maupun kantor kecil menengah.

Penelitian kedelapan: Simulasi Perbandingan Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dengan Metode PCC, ECMP, dan NTH Menggunakan GNS3. Penelitian ini menyimulasikan tiga metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) (PCC, ECMP, NTH) menggunakan perangkat lunak GNS3 untuk menganalisis performa QoS. Pengujian melibatkan parameter delay, jitter, packet loss, dan throughput. Dari hasil simulasi, PCC unggul secara keseluruhan terutama pada distribusi trafik dan konsistensi bandwidth. ECMP mengalami gangguan distribusi ketika salah satu ISP down, sementara NTH menghasilkan jitter dan delay yang tidak stabil. Penelitian ini merekomendasikan PCC untuk lingkungan dengan trafik tinggi dan kebutuhan stabilitas tinggi.

Penelitian kesembilan: Analisis Perbandingan Kinerja Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dengan Metode PCC dan ECMP pada Mikrotik Routers. Penelitian ini bertujuan membandingkan performa Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) menggunakan metode PCC dan ECMP pada Mikrotik

Router. Parameter yang diuji adalah delay, jitter, throughput, dan packet loss. Hasil pengujian menunjukkan PCC memiliki nilai packet loss lebih rendah dan delay yang lebih stabil dibandingkan ECMP. Namun, ECMP unggul dalam throughput dan lebih cepat dalam failover. Rekomendasi penelitian menyarankan penggunaan PCC di jaringan dengan kebutuhan stabilitas trafik tinggi dan ECMP untuk kecepatan transfer data.

Penelitian kesepuluh: Komparasi QoS Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) pada 4 Line Internet dengan Metode PCC, ECMP, dan NTH. Penelitian ini menguji performa tiga metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) (PCC, ECMP, dan NTH) dalam skenario jaringan dengan empat jalur ISP. Parameter yang digunakan yaitu ping, download/upload speed, delay, dan jitter. Hasil menunjukkan metode NTH memberikan performa paling optimal dalam aspek throughput, sedangkan PCC unggul dalam distribusi trafik dan ECMP stabil dalam failover. Kesimpulannya, NTH cocok untuk lingkungan multi-ISP, sedangkan PCC dan ECMP efektif untuk sistem dua jalur.

Penelitian kesebelas: Simulasi Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dengan Metode PCC, ECMP, dan NTH Menggunakan GNS3. Penelitian ini melakukan simulasi tiga metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) menggunakan perangkat lunak GNS3 untuk menguji performa jaringan secara visual dan statistik. Pengujian difokuskan pada stabilitas trafik saat satu atau lebih ISP gagal. PCC dan NTH menunjukkan performa stabil dalam distribusi trafik, sementara ECMP cenderung kehilangan trafik saat jalur ISP terganggu. Penelitian ini menunjukkan keunggulan PCC dalam pengaturan koneksi jangka panjang.

Penelitian kedua belas: Implementasi Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dengan Metode NTH Menggunakan Mikrotik di SMKN 2 Kuripan. Penelitian ini mengimplementasikan metode NTH untuk distribusi trafik pada jaringan internet di lingkungan sekolah menengah kejuruan. Metode NTH dibuktikan efektif dalam meratakan beban koneksi dan meningkatkan indeks kualitas layanan (QoS). Setelah implementasi, hasil pengujian QoS menunjukkan peningkatan pada seluruh parameter: delay menurun, throughput meningkat, dan

packet loss berkurang. Kesimpulannya, NTH cocok digunakan di lingkungan pendidikan dengan trafik intensitas menengah.

Penelitian ketiga belas: Implementasi Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dan Failover Menggunakan Metode NTH. Penelitian ini fokus pada konfigurasi metode NTH untuk kebutuhan Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dan failover di lingkungan korporat. Peneliti melakukan konfigurasi mangle, NAT, dan policy routing untuk mengaktifkan pemisahan trafik berdasarkan koneksi ke-n. Hasil pengujian menunjukkan sistem tetap aktif meskipun salah satu jalur ISP mengalami gangguan. Failover terjadi dengan waktu rerata di bawah 5 detik, dan tidak ada kehilangan data saat perpindahan jalur terjadi. NTH terbukti handal untuk sistem redundancy.

Penelitian keempat belas: Perancangan Sistem Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dan Monitoring Bandwidth Menggunakan Mikrotik dan Telegram API. Penelitian ini tidak hanya menerapkan Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) menggunakan metode PCC, tetapi juga mengembangkan sistem monitoring bandwidth real-time dengan integrasi Telegram API. Hasilnya memungkinkan administrator memantau status jaringan dan trafik ISP langsung dari Telegram bot. Penelitian ini menunjukkan efisiensi manajemen jaringan meningkat dan reaktivitas terhadap masalah koneksi menjadi lebih cepat.

Penelitian kelima belas: Development of Network Infrastructure Monitoring System at Vocational High School Using Mikrotik and Telegram Integration. Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan jaringan berbasis Mikrotik dengan integrasi Telegram untuk lingkungan sekolah. Selain pemantauan bandwidth dan trafik, sistem juga mencakup notifikasi otomatis jika salah satu ISP down. Hasil evaluasi menunjukkan sistem ini efektif membantu pengelola jaringan dalam mengambil keputusan cepat, terutama saat diperlukan tindakan failover atau pembatasan bandwidth pengguna tertentu secara real-time.

2.1.1 Matriks Penelitian

Matriks penelitian berikut disusun untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan implementasi Load Balancing dan Quality of Service (QoS) pada jaringan komputer. Matriks ini memuat informasi mengenai judul penelitian, peneliti,

metode yang digunakan, parameter evaluasi, serta hasil utama yang diperoleh. Melalui analisis terhadap matriks tersebut, dapat diidentifikasi persamaan, perbedaan, serta celah penelitian (research gap) yang menjadi dasar dilakukannya penelitian ini.

Tabel 2.1 Matrik Penelitian

No	Judul	Peneliti	Metode	Parameter	Hasil
1.	<i>Implementasi Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dan Failover Menggunakan Metode ECMP dan PCC Dengan Pengujian QoS Melalui Aplikasi PRTG (Studi Kasus: PT XYZ)</i>	Nurdin, Hanif Abizal, Finaldi, Ida Nurhaid a	ECMP, PCC, Failover, Monitoring PRTG	Throughput, Delay, Jitter, Packet Loss	PCC unggul dalam stabilitas trafik, ECMP efektif untuk failover otomatis
2.	<i>Comparative Analysis of Network Quality Using QoS Parameters on Mikrotik Routers</i>	Anni Zulfia, dkk	Queue Tree, Simple Queue	Throughput, Delay, Packet Loss, Jitter	Simple Queue unggul dalam throughput; Queue Tree lebih stabil
3.	<i>Implementation of Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) Per Connection Classifier on Mikrotik</i>	Dinar Mustofa, dkk	PCC + Failover	Throughput, Fairness Index, Packet Loss	Distribusi trafik merata dan stabil
4.	<i>Comparative Analysis of Performance Between ECMP and NTH Methods</i>	Dian Novianto, Yohanes S. Japriadi	ECMP, NTH	Throughput, Delay, Jitter, Packet Loss	ECMP lebih stabil, NTH lebih fleksibel

Tabel 2.2 Matrik Penelitian (lanjutan)

No	Judul	Peneliti	Metode	Parameter	Hasil
5.	<i>Quality Analysis of Service Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) Using PCC, ECMP and NTH</i>	Kurniant o T. Nugroho , dkk	PCC, ECMP, NTH	Throughput, Delay, Jitter, Packet Loss, Failover	ECMP unggul overall, PCC unggul packet loss, NTH tinggi jitter
6.	<i>Implementation of Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) With PCC Method And Failover</i>	Maxpow er IT Team	PCC + Failover	Stabilitas koneksi (real-time)	Stabil dan mendukung redundancy ISP
7.	<i>Computer Network Design and Implementation Using PCC</i>	Randy Pratama	PCC	Throughput, Delay	Latensi turun 30%, efisiensi bandwidth meningkat
8.	<i>Simulasi Perbandingan Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dengan GNS3</i>	Reza Pakiding , dkk	PCC, ECMP, NTH	Throughput, Jitter, Delay, Packet Loss	PCC paling konsisten
9.	<i>Analisis Perbandingan Kinerja Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dengan PCC dan ECMP</i>	Ibnu Asyhar Pratama	PCC, ECMP	Throughput, Delay, Packet Loss	PCC lebih stabil, ECMP unggul throughput
10.	<i>Komparasi QoS Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) pada 4 Line Internet</i>	Ahmad Tantoni, dkk	PCC, ECMP, NTH	Ping, Upload/Dow nload Speed	NTH terbaik di throughput, ECMP stabil

Tabel 2.3 Matrik Penelitian (*lanjutan*)

No	Judul	Peneliti	Metode	Parameter	Hasil
11.	<i>Simulasi Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) Menggunakan GNS3</i>	Reza Pakiding, Catur Iswahyudi	PCC, ECMP, NTH	Stabilitas trafik	PCC unggul stabilitas koneksi
12.	<i>Implementasi Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dengan Metode NTH di SMKN 2 Kuripan</i>	Ahmad Tantoni, Sofiansyah Fadli	NTH	QoS (Index)	Peningkatan kualitas layanan
13.	<i>Implementasi Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dan Failover Menggunakan Metode NTH</i>	Danang Febrian	NTH + Failover	Waktu Failover, Packet Loss	Failover <5s, data tetap aman
14.	<i>Perancangan Sistem Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dan Monitoring Bandwidth</i>	Wiwik Setiyawati	PCC + Telegram API	Monitoring Realtime	Efisiensi dan responsifitas meningkat
15.	<i>Development of Network Monitoring System Using Telegram</i>	Ahmad Fauzi, Dwi Yuni Utami	PCC + Monitoring + Failover	Delay, Bandwidth, Notifikasi	Tanggapan cepat dan notifikasi real-time
16	<i>Analisis Kinerja Load Balancing PCC pada Jaringan Multi-ISP</i>	Nugroho et al.	Eksperimen	Throughput, Delay, Packet Loss	PCC meningkatkan pemanfaatan bandwidth dan distribusi trafik

Tabel 2.4 Matrik Penelitian (*lanjutan*)

No	Judul	Peneliti	Metode	Parameter	Hasil
17	<i>mplementasi QoS Queue Tree pada Jaringan MikroTik</i>	Siregar, A.	Eksperimen	Delay, Jitter, Packet Loss	QoS efektif menjaga kestabilan latency dan prioritas trafik
18	<i>Perbandingan Metode Manajemen Bandwidth pada Router MikroTik</i>	Hasanah et al.	Eksperimen Komparatif	Throughput, Delay, Jitter	Perbandingan berbasis QoS menghasilkan evaluasi objektif performa jaringan

Berdasarkan hasil review terhadap 18 jurnal penelitian yang mencakup kajian manajemen bandwidth dan Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) pada Mikrotik serta penerapan metode Eksperimen Kuantitatif Komparatif dalam analisis data, dapat disimpulkan beberapa temuan utama sebagai berikut.:

1. Metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) yang paling banyak digunakan. Dari 15 penelitian pertama yang berfokus pada manajemen bandwidth dan load balancing jaringan, terdapat tiga metode utama yang dominan digunakan, yaitu:

- a. PCC (Per Connection Classifier)

Metode PCC merupakan pendekatan yang paling banyak digunakan, muncul pada lebih dari 10 penelitian. Metode ini secara konsisten menunjukkan kinerja terbaik dalam pemerataan distribusi trafik, stabilitas koneksi, serta penurunan packet loss. PCC juga terbukti mampu menjaga konsistensi sesi koneksi, sehingga sangat sesuai untuk jaringan dengan trafik tinggi dan jumlah pengguna yang besar.

- b. ECMP (Equal Cost Multi-Path)

Metode ECMP unggul dalam aspek failover otomatis, throughput tinggi, serta efisiensi pembagian jalur ketika terjadi gangguan pada salah satu ISP. Namun, beberapa penelitian menunjukkan bahwa ECMP kurang optimal pada kondisi trafik yang sangat dinamis karena distribusi paket yang tidak mempertahankan konsistensi sesi koneksi.

- c. NTH

Metode NTH efektif untuk sistem dengan kebutuhan distribusi trafik yang bersifat statis dan terjadwal. Meskipun mampu meningkatkan throughput pada skenario tertentu, NTH cenderung menghasilkan nilai jitter dan packet loss yang lebih tinggi dibandingkan PCC dan ECMP, sehingga kurang ideal untuk aplikasi real-time dan layanan kritikal.

2. Efektivitas QoS (Queue Tree vs Simple Queue)

Beberapa penelitian dalam matriks juga menyoroti efektivitas mekanisme QoS pada Mikrotik, khususnya perbandingan antara Queue Tree dan Simple Queue.

- a. Queue Tree dinilai lebih stabil dalam pengaturan distribusi bandwidth, terutama pada jaringan yang kompleks dan multi-layanan. Mekanisme hierarkis pada Queue Tree memungkinkan pengaturan prioritas trafik secara lebih granular, sehingga cocok digunakan pada lingkungan dengan aplikasi kritikal seperti SCADA, VoIP, dan sistem monitoring.
- b. Simple Queue menghasilkan throughput yang relatif lebih tinggi pada jaringan kecil hingga menengah dengan konfigurasi sederhana. Namun, metode ini memiliki keterbatasan dalam fleksibilitas pengelolaan trafik yang kompleks dan kurang optimal untuk jaringan berskala besar atau multi-layanan.

3. Penerapan Monitoring dan Otomatisasi Jaringan

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penggabungan Load Balancing PCC dengan sistem monitoring dan otomatisasi, seperti PRTG atau integrasi Telegram Bot, mampu meningkatkan efisiensi pengawasan jaringan. Pendekatan ini mempercepat deteksi gangguan, meningkatkan respons terhadap kegagalan koneksi, serta membantu administrator jaringan dalam pengambilan keputusan secara real-time.

4. Kesesuaian Metode dengan Kebutuhan Jaringan

Hasil sintesis menunjukkan bahwa setiap metode memiliki konteks penggunaan yang berbeda:

- a. PCC paling sesuai untuk jaringan dengan trafik tinggi dan kebutuhan stabilitas koneksi jangka panjang.

- b. ECMP ideal untuk jaringan yang membutuhkan *failover* cepat dan skema *redundancy* antar-ISP.
 - c. NTH lebih sesuai untuk jaringan yang memerlukan segmentasi trafik berdasarkan urutan koneksi, bukan berdasarkan karakteristik atau prioritas layanan.
5. Kombinasi Metode Memberikan Hasil Terbaik
- Beberapa penelitian merekomendasikan penggunaan kombinasi metode, seperti PCC yang dipadukan dengan failover atau mekanisme monitoring, sebagai pendekatan paling efektif dalam menghadapi dinamika trafik dan gangguan koneksi. Pendekatan hibrida ini dinilai mampu menyeimbangkan antara efisiensi pemanfaatan bandwidth, stabilitas koneksi, dan keandalan layanan.
6. Peran metode eksperimen kuantitatif komparatif dalam Penelitian

Tiga penelitian terakhir (nomor 16–18) dalam matriks penelitian terdahulu menunjukkan bahwa evaluasi kinerja jaringan umumnya dilakukan menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Penelitian-penelitian tersebut tidak berfokus pada pemodelan data mining, melainkan pada pengujian langsung terhadap performa sistem jaringan dalam kondisi yang terkontrol.

Metode eksperimen memungkinkan peneliti untuk menerapkan konfigurasi tertentu, kemudian mengamati dan mengukur pengaruhnya terhadap parameter kinerja jaringan. Sementara itu, pendekatan kuantitatif digunakan karena data yang dianalisis berupa nilai numerik seperti throughput, delay, jitter, dan packet loss yang dapat diukur secara objektif.

Pendekatan komparatif dalam penelitian jaringan juga banyak digunakan untuk membandingkan dua atau lebih metode manajemen bandwidth berdasarkan hasil performa yang dihasilkan. Hal ini bertujuan untuk menentukan metode yang paling sesuai dengan kebutuhan sistem berdasarkan indikator Quality of Service (QoS).

Dengan demikian, penggunaan metode eksperimen kuantitatif komparatif dalam penelitian ini memiliki landasan teoritis yang kuat dan relevan dengan studi evaluasi kinerja jaringan, sehingga mampu

menghasilkan analisis yang sistematis, terukur, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah

.

2.1.2 Kesenjangan Penelitian (Gap Research)

Berdasarkan tinjauan pustaka terhadap 15 penelitian yang relevan, teridentifikasi adanya beberapa kesenjangan (research gap) yang menjadi landasan bagi penelitian ini. Meskipun implementasi Load Balancing dan QoS pada Mikrotik telah banyak dikaji, beberapa aspek penting masih belum dieksplorasi secara mendalam, antara lain:

1. Kesenjangan Metodologi: Sejumlah penelitian sebelumnya telah menerapkan berbagai metode Load Balancing seperti PCC, ECMP, dan NTH untuk distribusi trafik, serta metode QoS seperti Simple Queue dan Queue Tree untuk pengaturan prioritas. Di sisi lain, beberapa penelitian memang membandingkan metode-metode Load Balancing di antara sendiri (PCC vs ECMP vs NTH) atau membandingkan metode QoS (Simple Queue vs Queue Tree). Kesenjangan yang ada adalah kurangnya analisis perbandingan secara langsung antara pendekatan Load Balancing PCC dengan QoS Queue Tree, yang merupakan dua metode dengan pendekatan fundamental berbeda satu berfokus pada distribusi beban trafik ke jalur ISP, dan satu berfokus pada pengaturan prioritas berdasarkan jenis layanan. Perbandingan ini penting untuk memahami keunggulan masing-masing dalam konteks optimalisasi bandwidth.
2. Kesenjangan Kontekstual (Lokasi): Penelitian-penelitian yang ada seringkali berfokus pada wilayah atau institusi yang berbeda, seperti SMK Negeri Trienggadeng, SMKN 2 Kuripan, PT. Maxpower Indonesia, atau institusi pendidikan lainnya. Studi yang secara spesifik melakukan analisis komparatif metode Load Balancing PCC dan QoS Queue Tree di lingkungan PLN UPT Cilegon, yang memiliki kebutuhan operasional khusus seperti sistem SCADA, ERP, HMI, dan monitoring berbasis web serta pola trafik jaringan yang unik untuk mendukung ketenagalistrikan kawasan industri strategis, masih belum ditemukan.

3. Kesenjangan Fokus Analisis: Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk memvalidasi dan membandingkan secara langsung metode Load Balancing PCC dengan QoS Queue Tree dalam konteks jaringan operasional PLN. Fokus ini memberikan nilai kebaruan yang praktis, yaitu mencari kombinasi strategi manajemen bandwidth yang paling efektif dengan menggunakan parameter evaluasi yang komprehensif (throughput, delay, jitter, packet loss, dan stabilitas koneksi) untuk mengoptimalkan penggunaan dua jalur ISP sekaligus menjaga kualitas layanan aplikasi prioritas. Penelitian ini juga memberikan rekomendasi implementasi hibrida untuk mencapai efisiensi dan kualitas jaringan secara simultan.

2.2 Landasan Teori

Dalam penelitian ini, terdapat sejumlah teori dan konsep fundamental yang menjadi landasan dalam memahami sekaligus mengevaluasi implementasi manajemen bandwidth menggunakan metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dan Quality of Service (QoS) Queue Tree pada perangkat MikroTik. Teori-teori ini mencakup prinsip dasar arsitektur jaringan, teknik pengelolaan trafik, serta mekanisme pengaturan prioritas yang diperlukan untuk memastikan distribusi bandwidth berlangsung secara optimal pada lingkungan multi-user. Pemahaman terhadap konsep-konsep tersebut penting agar metode yang diterapkan tidak hanya sekadar berfungsi secara teknis, tetapi juga mampu memberikan peningkatan performa jaringan yang signifikan sesuai dengan kebutuhan operasional, seperti pada lingkungan kerja PLN UPT Cilegon yang memiliki intensitas konektivitas tinggi.

Selain itu, teori dan konsep yang menjadi dasar penelitian ini juga berperan sebagai pedoman untuk merumuskan parameter evaluasi yang tepat, seperti throughput, latency, jitter, packet loss, pemerataan beban trafik, serta efektivitas mekanisme prioritas layanan. Baik PCC maupun QoS Queue Tree memiliki karakteristik teknis yang berbeda, sehingga pemahaman teoretis yang mendalam sangat diperlukan untuk menilai performa masing-masing metode secara objektif. Dengan mengacu pada berbagai referensi studi terdahulu, konsep manajemen bandwidth, load balancing, dan QoS dapat dipetakan secara sistematis untuk

mendukung analisis yang komprehensif dalam penelitian ini. Penjelasan teori-teori tersebut dijabarkan sebagai berikut:

2.2.1 Mikrotik RouterOS

Mikrotik RouterOS merupakan sistem operasi jaringan berbasis Linux yang dikembangkan khusus untuk perangkat router Mikrotik. RouterOS menyediakan berbagai layanan inti jaringan seperti routing statis maupun dinamis, firewall, Network Address Translation (NAT), manajemen bandwidth, Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP), Virtual Private Network (VPN), hingga bridge dan wireless access point dalam satu platform terintegrasi. Sejumlah studi menunjukkan bahwa konfigurasi fitur-fitur tersebut mulai dari ip route, firewall filter, NAT, mangle, hingga queue dapat diimplementasikan secara komprehensif pada RouterOS untuk membangun infrastruktur jaringan skala kecil hingga menengah dengan biaya yang relatif terjangkau dibanding perangkat proprietary kelas enterprise (Rahman et al., 2020).

Dalam konteks manajemen bandwidth, RouterOS menyediakan beragam mekanisme Quality of Service (QoS) seperti simple queue, queue tree, dan per connection queue (PCQ) yang memungkinkan pengaturan alokasi bandwidth secara granular per pengguna, per aplikasi, maupun per interface. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penerapan queue tree dan simple queue pada router Mikrotik mampu mengoptimalkan pemanfaatan bandwidth sekaligus memperbaiki parameter QoS (throughput, delay, jitter, dan packet loss) pada jaringan pendidikan maupun perkantoran (Nasution et al., 2022). Fitur QoS inilah yang menjadikan Mikrotik RouterOS banyak digunakan sebagai platform uji coba manajemen trafik dalam berbagai penelitian akademik.

Mikrotik juga banyak diadopsi pada lingkungan nyata seperti sekolah, kampus, dan kantor karena kemudahan konfigurasi melalui antarmuka Winbox maupun CLI, serta dukungan perangkat keras yang beragam. Implementasi jaringan lokal berbasis Mikrotik di lingkungan pendidikan dan usaha kecil, misalnya, terbukti meningkatkan efisiensi dan stabilitas jaringan serta mempermudah pengelolaan akses internet bagi pengguna yang banyak dan heterogen (Rifai & Amsir, 2024). Hal ini menunjukkan bahwa RouterOS tidak hanya relevan sebagai objek penelitian, tetapi juga aplikatif sebagai solusi jaringan produksi.

Di luar manajemen bandwidth, RouterOS juga menyediakan fitur keamanan jaringan seperti stateful firewall, filter rule, address list, dan berbagai mekanisme proteksi terhadap serangan umum (misalnya port scanning, DDoS, dan brute force). Penelitian mutakhir menegaskan bahwa penerapan firewall dan manajemen bandwidth berbasis Mikrotik mampu meningkatkan keamanan sekaligus mengurangi kepadatan trafik pada jaringan institusi, sementara pemanfaatan aplikasi monitoring seperti The Dude memperkuat kemampuan deteksi dan respons terhadap gangguan (Lienardy et al., 2025). Kombinasi kemampuan routing, QoS, dan keamanan inilah yang menjadikan Mikrotik RouterOS sebagai platform yang fleksibel dan ekonomis untuk berbagai skenario penelitian dan implementasi jaringan modern.

Selain itu, RouterOS mendukung skema multi-WAN dan teknik load balancing seperti Per Connection Classifier (PCC) dan Equal-Cost Multi-Path (ECMP) yang sangat relevan dengan penelitian ini. Berbagai studi terkini menunjukkan bahwa penerapan load balancing berbasis Mikrotik, khususnya metode PCC, dapat meningkatkan ketersediaan layanan, menyeimbangkan beban trafik antarkoneksi ISP, serta memperbaiki parameter QoS pada jaringan dengan banyak pengguna (Putra & Razaq, 2025). Dengan demikian, pemilihan Mikrotik RouterOS sebagai platform penelitian perbandingan metode Load Balancing PCC dan QoS Queue Tree memiliki dasar teoritis dan empiris yang kuat.

2.2.2 Load Balancing PCC (Per Connection Classifier)

Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) merupakan salah satu mekanisme multi-WAN load balancing pada Mikrotik yang bekerja dengan membagi koneksi berdasarkan identitas koneksi seperti src-address, dst-address, port sumber, port tujuan, dan protokol. Pada pendekatan ini, setiap koneksi baru akan dipetakan secara konsisten ke salah satu jalur ISP sehingga satu sesi aplikasi (misalnya web, streaming, atau komunikasi real-time) tidak berubah jalur di tengah proses. Karena bersifat connection-based, metode PCC dinilai lebih stabil dan kompatibel dengan aplikasi modern yang sensitif terhadap perubahan jalur. Temuan ini diperkuat oleh penelitian Hendrawan et al. (2025), yang menunjukkan bahwa PCC menjaga kestabilan sesi dan mengurangi kemungkinan session timeout pada jaringan sekolah.

Metode PCC biasanya dibandingkan dengan metode load balancing lain seperti ECMP (Equal Cost Multi-Path) dan NTH (Nth Packet). ECMP melakukan pembagian rute berdasarkan metric yang sama, sementara NTH membagi trafik berdasarkan paket ke-n (packet-based), sehingga aliran trafik dapat berpindah antar-jalur secara dinamis. Pada penelitian (Pragasta & Yunanri, 2025), PCC terbukti lebih stabil dan merata dalam mendistribusikan trafik dibandingkan NTH, terutama pada jaringan multi-pengguna dengan trafik dinamis. Mereka juga mencatat bahwa NTH menghasilkan jitter yang lebih tinggi akibat pendekatan berbasis paket, sedangkan PCC lebih konsisten karena setiap koneksi dipetakan pada satu jalur sepanjang sesi berlangsung.

Penelitian komparatif lain oleh (K. T. Nugroho et al., 2023) memperlihatkan bahwa PCC unggul dalam parameter QoS seperti throughput, packet loss, serta kestabilan latency dalam skenario multi-WAN. Dalam uji 3 metode (PCC, ECMP, NTH), PCC memiliki distribusi beban yang paling konsisten dan packet loss paling rendah, sementara ECMP unggul dalam kecepatan failover dan NTH menghasilkan variasi jitter yang signifikan. Hasil tersebut memperkuat posisi PCC sebagai metode yang paling seimbang antara performa dan kestabilan koneksi, khususnya pada jaringan yang membutuhkan konsistensi trafik jangka panjang.

Implementasi PCC juga umum dilakukan pada jaringan institusi karena memberikan peningkatan nyata terhadap kualitas pengalaman pengguna (Quality of Experience). Dalam penelitian Diponegoro et al. (2025), metode ini terbukti mampu mengelola trafik secara lebih efisien pada lingkungan jaringan kampus yang memiliki tingkat kepadatan akses tinggi pada jam-jam tertentu. PCC membagi koneksi berdasarkan karakteristik sesi, sehingga setiap pengguna memperoleh jalur transmisi yang lebih stabil dan tidak saling bertumpukan pada satu gateway. Hal ini sangat penting pada jaringan pendidikan, di mana penggunaan layanan e-learning, streaming materi kuliah, dan akses aplikasi akademik bergantung pada koneksi yang konsisten.

Selain itu, penelitian Diponegoro et al. (2025) juga menunjukkan bahwa PCC mampu meningkatkan throughput total jaringan hingga 35% karena jalur ISP digunakan secara lebih optimal. Ketika trafik dibagi secara merata, setiap link ISP dapat beroperasi pada kapasitas yang lebih seimbang, sehingga mengurangi

bottleneck pada satu jalur tertentu. Distribusi ini bukan hanya meningkatkan kecepatan rata-rata, tetapi juga mengurangi waktu tunggu (delay) yang diakibatkan oleh antrean paket berlebih pada router. Efisiensi tersebut berdampak langsung pada kenyamanan pengguna dalam melakukan aktivitas bandwidth-intensif.

Selanjutnya, PCC juga berkontribusi pada penurunan beban CPU router, sebagaimana dicatat Diponegoro et al. (2025). Ketika trafik terbagi rata melalui dua link ISP, proses penanganan paket pada router berjalan lebih ringan karena sistem tidak harus menangani antrean padat dalam satu gateway. Penurunan beban CPU ini sangat krusial bagi router kelas menengah yang umum digunakan pada institusi pendidikan maupun organisasi kecil, sehingga umur pakai perangkat dan stabilitas operasional dapat meningkat. Hal ini memperlihatkan bahwa manfaat PCC tidak hanya pada performa jaringan, tetapi juga pada efisiensi penggunaan perangkat keras.

Di sisi lain, penelitian yang sama juga menekankan bahwa PCC memberikan stabilitas koneksi yang lebih baik pada saat beban trafik meningkat, terutama pada jam sibuk penggunaan internet kampus. Pengguna yang terhubung pada sesi berbeda tidak saling memengaruhi jalur koneksi satu sama lain karena PCC menjaga agar setiap sesi tetap berada pada gateway yang sama sepanjang koneksi berlangsung. Pendekatan ini mencegah terjadinya session-breaking, packet loss, serta fluktuasi delay ketika terjadi perpindahan jalur secara tidak terkendali.

Secara keseluruhan, literatur terbaru menunjukkan bahwa PCC adalah metode load balancing yang paling optimal untuk jaringan institusi, pendidikan, dan organisasi berskala kecil hingga menengah. Dengan kemampuan mempertahankan sesi koneksi, pemerataan beban, serta efisiensi pemanfaatan multi-ISP, PCC menjadi dasar yang kuat untuk dijadikan objek penelitian dalam analisis manajemen bandwidth dan optimasi performa jaringan. Pengalaman empiris dari berbagai lingkungan jaringan memperlihatkan bahwa metode ini memberikan keseimbangan antara performa, stabilitas, dan kemudahan implementasi, sehingga relevan untuk diterapkan pada kasus manajemen trafik modern.

2.2.3 Quality of Service (QoS) Queue Tree

Quality of Service (QoS) merupakan seperangkat mekanisme pengelolaan trafik jaringan yang dirancang untuk memastikan bahwa jenis layanan tertentu

terutama layanan sensitif terhadap keterlambatan seperti VoIP, video conference, streaming real-time, serta aplikasi monitoring industri mendapatkan kualitas koneksi yang memadai. Dalam praktiknya, QoS bekerja dengan mengatur prioritas trafik, mengalokasikan bandwidth, hingga memberikan pembatasan tertentu agar tidak terjadi dominasi bandwidth oleh trafik berprioritas rendah. Konsep ini penting karena jaringan modern memadukan berbagai jenis layanan dengan karakteristik kebutuhan yang berbeda-beda, sehingga perlu adanya sistem yang mampu menjamin bahwa trafik kritis tetap mendapatkan alokasi sumber daya yang stabil. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penerapan QoS secara tepat dapat meningkatkan kualitas pengalaman pengguna secara signifikan terutama pada skenario layanan real-time (Zulfia et al., 2023).

Untuk mengevaluasi keberhasilan implementasi QoS, digunakan parameter-parameter teknis seperti throughput, delay, jitter, dan packet loss. Throughput menunjukkan kapasitas aliran data yang dapat ditransmisikan, delay mengindikasikan waktu tempuh paket dari pengirim ke penerima, sedangkan jitter mencerminkan variasi delay yang terjadi secara acak, dan packet loss menghitung jumlah paket yang hilang selama transmisi. Standar kualitas seperti ITU-T G.1010 dan TIPHON memberikan kategorisasi performa masing-masing parameter sehingga administrator jaringan dapat menilai kualitas layanan secara objektif. Dalam konteks jaringan real-time, delay yang rendah, jitter stabil, serta packet loss minimal menjadi indikator utama keberhasilan QoS. Temuan terbaru menunjukkan bahwa konfigurasi QoS pada Mikrotik RouterOS secara signifikan dapat menurunkan delay dan jitter, sehingga throughput tetap berada pada kategori “baik” (Zulfia et al., 2023).

Pada platform Mikrotik RouterOS, QoS dapat diimplementasikan melalui beberapa mekanisme antrian (queue). Mikrotik menyediakan simple queue, Per Connection Queue (PCQ), Hierarchical Token Bucket (HTB), dan queue tree sebagai komponen inti manajemen bandwidth. Simple queue biasanya digunakan untuk pembatasan bandwidth per pengguna secara manual, sedangkan PCQ bekerja otomatis dengan membagi bandwidth secara merata kepada banyak pengguna tanpa konfigurasi rumit. PCQ sangat efektif digunakan pada lingkungan multi-user karena setiap pengguna mendapatkan jatah bandwidth yang sama, sehingga

mengurangi risiko dominasi bandwidth oleh satu pengguna saja (Prambudi & Rofiq, 2023).

Sementara itu, queue tree merupakan mekanisme yang lebih canggih karena bekerja secara hierarkis dan memungkinkan administrator membuat antrian parent–child berdasarkan jenis layanan, protokol, port tertentu, atau bahkan jalur ISP. Queue tree membutuhkan proses packet marking melalui firewall mangle sebelum trafik dapat diklasifikasikan ke dalam antrian tertentu. Metode ini memberikan kontrol dan fleksibilitas tinggi dalam menentukan prioritas, serta mengatur alokasi dan pembatasan bandwidth pada level yang lebih granular. Fleksibilitas inilah yang menjadikan queue tree cocok digunakan pada jaringan kompleks yang melibatkan berbagai jenis layanan dan perangkat (Prambudi & Rofiq, 2023).

Penelitian terkini memperlihatkan bahwa kombinasi PCQ dan queue tree sangat efektif dalam meningkatkan kualitas jaringan pada berbagai lingkungan, termasuk sekolah, kampus, dan kantor. Dwilaksono et al. (2025) melaporkan bahwa penggunaan PCQ dan queue tree secara bersamaan mampu meningkatkan throughput, menurunkan delay, serta menstabilkan jitter pada jaringan pendidikan. Hal tersebut berdampak pada peningkatan kualitas koneksi selama aktivitas pembelajaran daring di mana banyak perangkat aktif secara bersamaan. Selain itu, distribusi bandwidth antar pengguna menjadi lebih merata sehingga pengalaman akses internet di seluruh klien menjadi lebih konsisten (Dwilaksono et al., 2025).

Dalam studi lain, penerapan queue tree pada sistem hotspot berbasis voucher terbukti mampu mengatur bandwidth dengan ketat tanpa mengorbankan stabilitas koneksi, bahkan pada kondisi akses serentak pada jam sibuk. Syah & Sutanto (2025) menemukan bahwa queue tree membantu menjaga koneksi tetap stabil meskipun jumlah klien meningkat drastis, sehingga layanan tetap responsif (Syah & Sutanto, 2025). Konfigurasi yang memungkinkan pemisahan antrian berdasarkan kelompok pengguna, jenis layanan, dan kebijakan limitasi tertentu membuat metode ini sangat adaptif untuk berbagai skenario operasi jaringan.

Kajian komparatif antara simple queue, PCQ, dan queue tree juga memberikan gambaran mengenai keunggulan masing-masing metode. Lestari et al. (2025) menunjukkan bahwa simple queue dapat menghasilkan throughput rata-rata yang lebih tinggi pada jaringan sederhana dengan jumlah pengguna terbatas

(Lestari et al., 2025). Namun, pada jaringan yang lebih besar dan kompleks, queue tree memberikan performa yang lebih stabil, terutama dalam menangani banyak jenis trafik sekaligus. Kemampuan queue tree untuk melakukan pengaturan bandwidth secara hierarkis membuatnya lebih unggul dalam skenario yang membutuhkan penanganan prioritas trafik secara ketat.

Queue tree juga dinilai unggul dalam hal skalabilitas. Ketika trafik meningkat dan jumlah pengguna bertambah, metode ini tetap mampu menjaga stabilitas jaringan karena pembagian bandwidth dilakukan dengan mempertimbangkan hierarki layanan. Hal ini membantu menghindari bottleneck dan menjaga kualitas layanan utama seperti video conference atau akses aplikasi korporat tetap optimal. Temuan ini relevan bagi organisasi besar yang memiliki beragam kebutuhan layanan, seperti PLN yang mengoperasikan sistem monitoring, SCADA, aplikasi internal, serta akses internet umum (Lestari et al., 2025).

Dalam konteks operasional jaringan perusahaan, queue tree memberikan keuntungan tambahan karena memungkinkan proses troubleshooting dan pemantauan trafik menjadi lebih mudah. Dengan adanya pemisahan trafik berdasarkan kelas-kelas tertentu, administrator dapat mengidentifikasi layanan yang mengonsumsi bandwidth besar atau menyebabkan kongesti. Pendekatan ini juga memudahkan penerapan kebijakan keamanan seperti pembatasan trafik tertentu untuk mencegah serangan flood atau penggunaan bandwidth berlebihan oleh aplikasi non-prioritas. Ini memperkuat alasan pemilihan queue tree dalam penelitian yang membutuhkan kontrol ketat terhadap pola trafik.

Secara keseluruhan, queue tree terbukti menjadi mekanisme QoS yang lebih fleksibel, stabil, dan efektif untuk jaringan multi-layanan yang kompleks. Kombinasi antara PCQ dan queue tree memungkinkan jaringan mempertahankan kualitas layanan meskipun trafik meningkat dan pengguna bertambah. Dengan mempertimbangkan berbagai temuan penelitian terkini (Zulfia et al., 2023; Prambudi & Rofiq, 2023; Dwilaksono et al., 2025; Syah & Sutanto, 2025; Lestari et al., 2025), queue tree sangat relevan digunakan dalam penelitian ini karena mampu mengelola trafik berbasis prioritas serta menjaga stabilitas jaringan operasional yang bersifat kritis, seperti pada lingkungan PLN.

2.2.4 Bandwidth dan Trafik Jaringan

Bandwidth dalam konteks jaringan komputer didefinisikan sebagai kapasitas maksimum kanal komunikasi untuk mentransmisikan data per satuan waktu (misalnya Mbps), sedangkan trafik jaringan merujuk pada volume dan pola aliran paket data yang melewati media transmisi pada periode tertentu. Kualitas jaringan umumnya digambarkan melalui parameter performa seperti throughput, delay, jitter, dan packet loss, yang seluruhnya sangat dipengaruhi oleh kecukupan bandwidth terhadap beban trafik yang ada. Sejumlah studi terbaru menegaskan bahwa ketercukupan dan kualitas pemanfaatan bandwidth menjadi faktor kunci untuk menjamin Quality of Service (QoS) yang andal pada berbagai layanan, mulai dari komunikasi waktu nyata hingga aplikasi berbasis data besar (Mazhar et al., 2023).

Pengelolaan bandwidth (bandwidth management) bertujuan untuk memastikan distribusi sumber daya jaringan yang adil (fair) dan efisien di antara berbagai aliran trafik yang bersaing. Pendekatan ini dapat berupa pembagian kapasitas secara statis maupun dinamis, penerapan antrian berbobot, hingga algoritme alokasi adaptif yang menyeimbangkan antara pemakaian maksimum link dan keadilan antar pengguna. Penelitian mutakhir di jaringan 5G dan IoT, misalnya, menunjukkan bahwa teknik alokasi bandwidth yang sadar QoS mampu meningkatkan throughput jaringan sekaligus mempertahankan fairness dan menurunkan risiko kemacetan, sehingga tiap kelas layanan tetap memperoleh sumber daya sesuai kebutuhannya (Ibrahim et al., 2025).

Karakteristik trafik jaringan modern cenderung sangat dinamis, ditandai dengan adanya elephant flows (aliran besar dan panjang) serta mice flows (aliran kecil dan singkat) yang berjalan secara bersamaan. Ketidakseimbangan ini dapat memicu kemacetan, penurunan throughput, dan peningkatan delay jika tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, banyak penelitian terbaru mengembangkan teknik prediksi trafik dan manajemen lalu lintas berbasis pembelajaran mendalam untuk mengidentifikasi aliran yang berpotensi membebani jaringan sehingga tindakan pengendalian (seperti rate limiting atau pengalihan rute) dapat dilakukan sebelum terjadi kemacetan. Pendekatan berbasis prediksi ini terbukti efektif dalam menjaga stabilitas QoS di lingkungan jaringan berskala besar (Wassie et al., 2023).

Dalam implementasi praktis, pengelolaan bandwidth yang efektif membutuhkan dukungan mekanisme pemantauan trafik secara real-time. Pada ekosistem Mikrotik RouterOS, kebutuhan ini difasilitasi oleh beberapa tool bawaan, terutama Torch dan Graphing. Torch merupakan traffic analyzer real-time yang menampilkan aliran data berdasarkan alamat sumber/tujuan, port, protokol, serta nilai TX/RX dalam bentuk bitrate dan jumlah paket, sehingga administrator dapat mengidentifikasi pengguna atau aplikasi yang paling banyak mengonsumsi bandwidth. Sementara itu, fitur Graphing memungkinkan perekaman dan visualisasi tren pemakaian bandwidth pada interface maupun queue dalam rentang waktu tertentu untuk kepentingan analisis kapasitas dan perencanaan jaringan. Berbagai publikasi teknis dan pengabdian masyarakat menunjukkan bahwa pemanfaatan Torch dan Graphing pada Mikrotik membantu institusi pendidikan maupun perusahaan dalam memantau trafik, mendeteksi lonjakan beban, dan mengevaluasi efektivitas kebijakan manajemen bandwidth yang diterapkan.

2.2.5 Jitter

Jitter adalah variasi dalam waktu antar-pengiriman paket dalam jaringan, yang berarti bahwa meskipun sebuah paket dikirim dalam interval tetap, paket berikutnya tidak selalu tiba sesuai interval tersebut. Perubahan waktu tiba ini dapat disebabkan oleh antrian, proses routing, kemacetan, atau fluktuasi trafik yang terjadi pada jalur transmisi. Variasi ini menimbulkan ketidakstabilan pada aliran data dan menjadi faktor penting dalam menentukan kualitas koneksi. Dalam konteks aplikasi real-time seperti SCADA, VoIP, video streaming, atau sistem kendali jarak jauh, jitter sangat kritis karena jeda kecil sekalipun dapat menghasilkan gangguan signifikan dalam performa layanan (Ramadhani et al., 2022).

Dalam literatur Quality of Service (QoS), jitter secara konsisten disebut sebagai salah satu parameter inti yang harus dievaluasi bersama throughput, delay, dan packet loss untuk menilai kualitas jaringan secara komprehensif. Penelitian-penelitian dalam bidang jaringan menekankan bahwa jitter tidak boleh dianggap sekadar fluktuasi kecil, karena pada aplikasi sensitif waktu, akumulasi variasi delay dapat menyebabkan distorsi audio, freeze video, atau bahkan kegagalan komunikasi antar-sistem otomatisasi industri. Oleh karena itu, pengukuran jitter menjadi

instrumen penting untuk menguji kestabilan layanan jaringan (Ramadhani et al., 2022).

Penyebab jitter umumnya berkaitan langsung dengan panjang antrian paket (queue length), kemacetan (congestion), dan pola kedatangan paket yang tidak merata. Ketika banyak paket tiba secara bersamaan, atau ketika terjadi sudden burst of traffic, waktu pemrosesan meningkat dan interval antar-paket menjadi tidak konsisten. Kondisi ini membuat jitter semakin besar karena paket tidak lagi berjalan pada ritme yang stabil. Prinsip ini telah dijelaskan dalam studi fundamental tentang jitter control pada jaringan QoS, di mana pengaturan antrean dan mekanisme buffering berperan penting dalam menstabilkan delay-jitter (Mansour & Patt-shamir, 2001).

Dalam skenario lain, jitter juga dapat muncul akibat ketidakseimbangan pemetaan jalur, penggunaan gateway yang berbeda, atau perbedaan prioritas trafik. Jika paket dengan jenis layanan berbeda berada dalam antrian yang sama, maka paket berprioritas rendah dapat menghambat paket berprioritas tinggi. Hal ini semakin memperburuk jitter, terutama pada jaringan dengan tingkat penggunaan tinggi. Oleh sebab itu, pemisahan trafik dan prioritas antrian menjadi langkah utama dalam mengontrol jitter (Mansour & Patt-shamir, 2001).

Dalam konteks implementasi jaringan menggunakan MikroTik RouterOS, metode Queue Tree memberikan kerangka teknis untuk melakukan traffic shaping dan bandwidth management secara lebih detail. Queue Tree memungkinkan administrator untuk membuat hierarki antrian berdasarkan aturan tertentu seperti tipe trafik, sumber, tujuan, atau layanan sehingga paket real-time dapat diprioritaskan. Dengan memisahkan trafik real-time dari trafik bulk, paket-paket sensitif waktu tidak perlu bersaing dalam antrean yang sama, dan hal ini secara teori menurunkan variasi delay (jitter). Pendekatan ini terbukti efektif pada jaringan dengan trafik padat atau lingkungan multi-user.

Beberapa penelitian empiris memperkuat temuan tersebut. Implementasi Queue Tree pada jaringan hotspot, sekolah, dan institusi menunjukkan bahwa mekanisme ini dapat menurunkan nilai jitter secara signifikan dan menjaga kestabilan jitter dalam rentang yang aman. Selain itu, Queue Tree juga membantu memperbaiki parameter QoS lainnya seperti throughput, latency, dan packet loss,

menjadikannya solusi manajemen bandwidth yang komprehensif (Rudiyanto & Asri, 2025).

Sebagai contoh, studi di lingkungan sekolah menggunakan MikroTik RB450Gx4 menunjukkan hasil yang sangat jelas setelah konfigurasi QoS berbasis Queue Tree diterapkan. Nilai jitter berhasil distabilkan di bawah 5 ms, sementara latency dan packet loss juga menurun dibanding kondisi sebelum QoS diaktifkan. Temuan ini relevan karena lingkungan sekolah memiliki banyak pengguna simultan, pola penggunaan yang padat, dan variasi trafik yang tinggi kondisi yang juga umum terjadi di jaringan institusi seperti kantor atau unit operasional industri (Rudiyanto & Asri, 2025).

Efektivitas penurunan jitter tersebut menunjukkan bahwa Queue Tree dapat menjaga kondisi jaringan tetap stabil meskipun beban trafik meningkat. Dengan memberikan bandwidth minimum dan maksimum untuk setiap kategori trafik, Queue Tree mampu mencegah terjadinya burst trafik yang dapat mengganggu aliran data real-time. Pada jaringan yang membutuhkan tingkat reliabilitas tinggi, kemampuan ini sangat berharga untuk memastikan kontinuitas layanan.

Berdasarkan bukti empiris dan tinjauan teoritis tersebut, jitter dalam penelitian ini diperlakukan sebagai salah satu variabel utama QoS yang harus diukur untuk menilai performa jaringan secara menyeluruh. Karena jitter secara langsung mempengaruhi pengalaman pengguna pada layanan real-time, maka parameter ini menjadi indikator utama dalam evaluasi kualitas jaringan pada implementasi metode PCC maupun QoS Queue Tree.

Dengan mempertimbangkan bahwa jaringan PLN digunakan untuk mendukung aplikasi sensitif waktu seperti SCADA, monitoring real-time, telemetry, dan komunikasi operasional, maka stabilitas jitter menjadi aspek yang sangat penting. Implementasi Queue Tree pada MikroTik diasumsikan dapat menekan fluktuasi waktu antar paket sehingga koneksi jaringan menjadi lebih stabil dan andal. Pendekatan ini menjadi prasyarat penting agar layanan kritis dapat berjalan dengan performa optimal tanpa terganggu oleh ketidakstabilan delay yang diakibatkan oleh jitter.

2.2.6 Packet Loss

Packet loss adalah kondisi ketika sebagian paket data yang dikirim dari sumber tidak berhasil tiba di tujuan, sehingga terjadi kehilangan informasi pada proses transmisi. Secara praktis, packet loss menimbulkan gejala seperti suara terputus-putus pada VoIP, video yang tersendat, hingga timeout pada layanan berbasis web. Berbagai penelitian kualitas layanan jaringan menunjukkan bahwa packet loss merupakan salah satu parameter utama Quality of Service (QoS) di samping throughput, delay, dan jitter, karena peningkatan kecil pada nilai packet loss saja sudah cukup menurunkan kualitas pengalaman pengguna secara signifikan (H. A. S. A. Nugroho et al., 2024).

Dalam evaluasi performa jaringan, banyak studi di Indonesia menggunakan standar TIPHON untuk mengklasifikasikan kualitas packet loss ke dalam kategori sangat baik, baik, cukup, dan buruk. Secara umum, nilai packet loss di bawah 3% masih dikategorikan baik hingga sangat baik, sedangkan nilai yang lebih tinggi mengindikasikan adanya masalah serius seperti kongesti, kesalahan konfigurasi perangkat, atau kualitas media transmisi yang rendah. Hasil pengukuran pada berbagai lingkungan—kampus, kantor pemerintahan, hingga penyedia layanan lokal—menunjukkan bahwa jaringan dengan packet loss 0–2% cenderung memberikan layanan internet yang stabil, sedangkan nilai di atas ambang tersebut sering berkorelasi dengan keluhan pengguna terkait gangguan akses dan penurunan kualitas layanan digital (Rosid et al., 2023).

Dalam konteks manajemen bandwidth multi-gateway, metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) menjadi salah satu pendekatan yang banyak diteliti untuk menekan packet loss. PCC membagi koneksi ke beberapa jalur ISP berdasarkan parameter tertentu (misalnya alamat sumber, tujuan, atau port), sehingga beban trafik dapat terdistribusi lebih merata dan mengurangi risiko kongesti pada satu link saja. Berbagai studi implementasi PCC pada router Mikrotik di lingkungan sekolah, kampus, dan kantor melaporkan bahwa skema load balancing multi-gateway ini tidak hanya meningkatkan throughput, tetapi juga menurunkan nilai packet loss serta memperbaiki stabilitas koneksi dibandingkan konfigurasi single gateway konvensional.

2.2.7 Latency (Delay)

Latency, atau yang sering disebut delay, merupakan salah satu parameter paling fundamental dalam pengukuran kualitas kinerja jaringan komputer. Secara sederhana, latency menggambarkan waktu yang dibutuhkan oleh sebuah paket data untuk berpindah dari pengirim (sender) menuju penerima (receiver). Dalam jaringan modern, pengukuran latency umumnya dilakukan menggunakan metode round-trip time (RTT) yang menghitung waktu pulang-pergi paket, atau one-way delay yang menghitung waktu satu arah perjalanan paket. Semakin rendah nilai latency, semakin baik kualitas koneksi jaringan, terutama untuk sistem yang membutuhkan komunikasi cepat dan responsif seperti layanan sensor, sistem monitoring kelistrikan, atau aplikasi terdistribusi.

Dalam konteks Quality of Service (QoS), latency menjadi parameter yang sangat diperhatikan karena secara langsung mempengaruhi performa aplikasi real-time. Aplikasi seperti VoIP, video conference, streaming multimedia, dan layanan data kritis sangat sensitif terhadap peningkatan delay. Keterlambatan kecil sekalipun dapat menyebabkan penurunan kualitas suara, video patah-patah, atau bahkan terjadinya timeout koneksi. Oleh sebab itu, pengendalian latency sering kali menjadi prioritas dalam implementasi manajemen trafik jaringan dalam skala besar maupun kecil.

Pada jaringan yang memiliki banyak pengguna, masalah latency tidak hanya disebabkan oleh jarak atau kualitas fisik jaringan, tetapi dapat timbul akibat penumpukan antrian pada router akibat trafik yang padat. Ketika packet forwarding tidak ditata dengan baik, router akan menumpuk paket di buffer, sehingga waktu tunggu meningkat dan latency bertambah. Permasalahan ini paling sering terjadi pada jaringan publik, hotspot, atau perkantoran di mana penggunaan bandwidth bersifat simultan dan kompetitif antar pengguna. Dalam kondisi seperti ini, penerapan mekanisme QoS menjadi sangat penting untuk mengendalikan efek peningkatan antrian.

Salah satu mekanisme yang terbukti efektif dalam mengelola keterlambatan paket adalah penerapan Queue Tree pada MikroTik RouterOS. Queue Tree memungkinkan administrator mengelompokkan trafik berdasarkan prioritas dan alokasi bandwidth tertentu, sehingga paket yang memiliki prioritas lebih tinggi

diproses lebih cepat daripada trafik umum. Sebuah studi terbaru oleh Rudiyanto dkk. (2025) mengonfirmasi hal ini dengan menunjukkan bahwa implementasi Queue Tree pada perangkat MikroTik RB450Gx4 berhasil menurunkan latency rata-rata dari 60 ms menjadi 40 ms setelah konfigurasi QoS diterapkan, serta menurunkan packet loss di bawah 1% dan membuat jitter lebih stabil (Rudiyanto & Asri, 2025).

Selain itu, penelitian pada lingkungan hotspot kos/indekos dengan banyak pengguna menunjukkan hasil serupa. Pada kondisi awal, trafik sering kali didominasi oleh beberapa pengguna berat seperti pengunduh file besar atau pemutar konten video beresolusi tinggi. Setelah penerapan Queue Tree, distribusi bandwidth menjadi lebih seimbang sehingga tidak terjadi dominasi bandwidth oleh sebagian kecil pengguna. Penelitian tersebut mencatat bahwa meskipun jumlah klien sangat tinggi, latency tetap berada pada batas yang dapat diterima sehingga akses internet menjadi lebih merata untuk seluruh penghuni (Syah & Sutanto, 2025). Temuan ini memperkuat bahwa QoS tidak hanya diperlukan di lingkungan perusahaan besar, namun juga sangat relevan untuk jaringan padat lainnya.

Dari sudut pandang teori jaringan, peningkatan kinerja latency melalui QoS dijelaskan oleh mekanisme prioritization dan traffic shaping. Ketika trafik dikelompokkan berdasarkan jenis layanan, router dapat memutuskan paket mana yang harus diproses lebih dahulu. Hal ini selaras dengan model antrean rendah-latensi seperti Low-Latency Queuing (LLQ) dan Priority Queuing (PQ), di mana paket real-time ditempatkan pada kelas prioritas tertinggi sehingga tidak perlu menunggu terlalu lama di buffer. Temuan-teori ini sesuai dengan kajian Yousif et al. (2018) yang menyatakan bahwa algoritma antrean prioritas signifikan menurunkan delay terutama bagi trafik sensitif waktu (Yousif et al., 2018).

Pada level implementasi, Queue Tree bekerja dengan sangat fleksibel karena mendukung pembagian bandwidth berdasarkan parent-child queue structure, sehingga administrator dapat membuat hirarki antrian yang kompleks sesuai kebutuhan. Struktur ini mampu menahan lonjakan bandwidth yang sering menjadi pemicu utama terjadinya latency tinggi. Dengan demikian, Queue Tree tidak hanya berfungsi sebagai pembagi bandwidth, tetapi juga sebagai pengendali

delay dengan melakukan shaping pada trafik tertentu yang berpotensi mengganggu layanan real-time.

Penelitian terbaru pada jaringan next-generation seperti Wireless Sensor Network (WSN) dan Internet of Things (IoT) turut menguatkan relevansi manajemen delay. Pada jaringan generasi baru tersebut, trafik bersifat heterogen dan sering kali berjalan bersamaan, sehingga membutuhkan algoritma antrian adaptif untuk mempertahankan latensi yang rendah. Studi oleh Mazhar et al. (2023) menunjukkan bahwa penjadwalan antrian adaptif pada sistem IoT mampu mempertahankan latensi dalam batas acceptable meskipun beban jaringan tinggi (Mazhar et al., 2023). Temuan ini menegaskan kembali bahwa strategi QoS yang baik bukan hanya menguntungkan jaringan konvensional, tetapi juga penting untuk aplikasi future network.

Selain menjaga latency tetap rendah, QoS juga berdampak pada stabilitas jitter, yaitu variasi waktu antar pengiriman paket. Ketika jitter terlalu tinggi, aplikasi real-time menjadi tidak konsisten. Dengan menerapkan Queue Tree, jitter dapat ditekan karena paket diproses secara teratur sesuai struktur antrian yang sudah ditentukan. Ini berarti bahwa bukan hanya waktu tunda yang terkontrol, tetapi juga konsistensinya tetap terjaga.

Secara keseluruhan, bukti empiris dan teori jaringan modern menunjukkan bahwa penerapan QoS, khususnya melalui Queue Tree pada MikroTik RouterOS, mampu memberikan pengaruh besar terhadap penurunan latency, pengurangan jitter, dan peningkatan stabilitas jaringan. Hal ini menjadikan parameter latency sebagai salah satu indikator paling penting dalam penelitian ini, terutama karena jaringan PLN sangat bergantung pada kestabilan akses data, monitoring SCADA, layanan internal, dan komunikasi operasional yang tidak boleh terganggu oleh keterlambatan paket yang tinggi.

Dengan demikian, baik dari sisi teori maupun bukti eksperimental, mekanisme antrian dan QoS terbukti menjadi instrumen penting dalam menjaga latency tetap rendah pada jaringan padat pengguna. Temuan dari penelitian-penelitian tersebut memperkuat alasan pemilihan metode QoS Queue Tree dan Load Balancing PCC dalam penelitian ini sebagai strategi utama untuk

memaksimalkan kualitas layanan jaringan PLN yang memerlukan performa stabil sepanjang waktu.

2.2.8 Throughput

Throughput adalah ukuran kinerja jaringan yang menggambarkan jumlah data yang berhasil dikirim dan diterima dalam periode waktu tertentu, misalnya dalam bit per detik (bps) atau Mbps. Throughput merefleksikan kapasitas efektif jaringan di dunia nyata, setelah mempertimbangkan faktor-faktor seperti overhead protokol, antrian, dan kemacetan, berbeda dengan bandwidth teoritik. Sebagai parameter QoS, throughput sering dipakai untuk mengevaluasi kualitas layanan jaringan, terutama ketika trafik padat dan banyak pengguna. Penelitian dan literatur terkini menekankan bahwa throughput stabil dan tinggi adalah indikator penting dalam evaluasi performa jaringan, khususnya pada jaringan multi-ISP atau jaringan dengan distribusi trafik dinamis (Amalia et al., 2023).

Dalam skenario jaringan dengan lebih dari satu jalur ISP (multi-WAN), teknik load balancing menjadi sangat relevan untuk memaksimalkan throughput agregat. Dengan mendistribusikan koneksi atau aliran data ke beberapa link ISP secara bersamaan, beban trafik tidak menumpuk pada satu jalur saja, yang biasanya menjadi bottleneck. Metode PCC, yang mengelompokkan koneksi berdasarkan atribut seperti alamat sumber/destinasi, port, dan protokol, terbukti efektif dalam mendistribusikan aliran data ke dua atau lebih ISP secara seimbang, sehingga total throughput jaringan meningkat dibanding hanya menggunakan satu jalur saja (Frihadi et al., 2025).

Sebagai contoh empiris: dalam penelitian “Analisis Performa Load Balancing Menggunakan PCC pada MikroTik” yang diterbitkan tahun 2025, hasil pengujian menunjukkan bahwa metode PCC mencapai throughput hingga 26,4 Mbps meningkat dibanding konfigurasi tanpa PCC disertai latency dan jitter yang menurun (Frihadi et al., 2025). Penelitian lain, yang membandingkan metode load balancing pada jaringan sekolah menggunakan MikroTik, melaporkan bahwa implementasi PCC berhasil meningkatkan performa jaringan, dengan throughput dan stabilitas koneksi yang lebih baik dibanding sebelum konfigurasi (Pragasta & Yunanri, 2025).

Selain itu, analisis kuantitatif dalam studi “Quality Analysis of Service Load Balancing using PCC, ECMP and NTH Methods” menunjukkan bahwa ketika load balancing dan traffic shaping dikelola dengan benar (misalnya melalui manajemen paket dan queueing), throughput serta parameter QoS lainnya — seperti packet loss dan delay — dapat dipertahankan pada level optimal meskipun trafik padat atau terjadi failover salah satu jalur ISP (K. T. Nugroho et al., 2023).

Berdasarkan luasnya bukti empiris dan konsistensi hasil di berbagai konteks (perkantoran, institusi pendidikan, multi-WAN enterprise), pernyataan bahwa “Load Balancing PCC meningkatkan throughput secara nyata dalam jaringan dengan dua ISP” memiliki landasan teori dan bukti empiris yang kuat. Oleh karena itu, dalam penelitian ini throughput dijadikan sebagai salah satu parameter utama untuk mengukur keberhasilan implementasi metode PCC maupun metode perbandingan lainnya.

2.2.9 Failover

Failover adalah mekanisme cadangan otomatis yang dirancang untuk menjaga ketersediaan layanan jaringan ketika salah satu jalur ISP mengalami gangguan. Dalam konteks operasional jaringan modern yang menuntut uptime tinggi, failover berfungsi sebagai pengalihan jalur trafik secara instan tanpa memerlukan intervensi administrator, sehingga layanan tetap beroperasi normal walaupun jalur utama mengalami kegagalan. Mekanisme ini bertumpu pada pemantauan kondisi jalur secara real time untuk menentukan kapan perpindahan harus dilakukan, sehingga pengguna akhir tidak merasakan gangguan yang signifikan pada layanan yang sedang digunakan (Hoesiin & Yuliandi, 2025).

Dalam implementasinya pada perangkat MikroTik RouterOS, failover sering dikombinasikan dengan teknik Per Connection Classifier (PCC) untuk memastikan distribusi trafik tetap seimbang ketika seluruh jalur ISP aktif, sekaligus menyediakan jalur cadangan jika salah satu ISP terputus. Pengaturan ini biasanya melibatkan konfigurasi routing berbasis distance metric, pemantauan koneksi melalui fitur Netwatch, atau ping check otomatis untuk mendeteksi kegagalan jalur. Kombinasi PCC + Failover telah terbukti memberikan fleksibilitas sekaligus ketahanan jaringan yang lebih tinggi dibanding penggunaan satu koneksi ISP saja (Irman & Anton, 2024).

Temuan empiris dari penelitian di lingkungan perusahaan menunjukkan bahwa konfigurasi dual-ISP dengan mekanisme load balancing PCC dan failover otomatis secara signifikan meningkatkan tingkat ketersediaan (availability) jaringan. Dengan adanya jalur cadangan, risiko downtime yang dapat mengganggu aktivitas operasional perusahaan dapat diminimalkan, terutama pada layanan yang bergantung pada konektivitas berkelanjutan, seperti sistem informasi internal, server email, maupun aplikasi berbasis cloud. Implementasi failover pada MikroTik juga dinilai lebih efisien karena proses perpindahan jalur terjadi otomatis dan tidak membutuhkan prosedur manual (Irman & Anton, 2024).

Selain itu, studi perbandingan menunjukkan bahwa failover mampu mengalihkan trafik ke jalur cadangan dengan switchover time yang relatif rendah sehingga tidak mengakibatkan gangguan berarti pada sesi aktif yang sedang berlangsung. Ini menjadi sangat penting untuk aplikasi real-time seperti VoIP, video conference, monitoring operasional, dan SCADA, yang membutuhkan koneksi stabil tanpa jeda atau pemutusan sesi. Pengalihan yang cepat memastikan bahwa aliran data tetap berjalan meskipun terjadi gangguan pada salah satu ISP, sehingga kualitas layanan tetap terjaga (Hoesiin & Yuliandi, 2025).

Dari perspektif network resilience, failover tidak hanya dipandang sebagai mekanisme perlindungan cadangan, melainkan bagian integral dari strategi mitigasi risiko dalam desain jaringan yang andal. Ketika digabungkan dengan metode manajemen bandwidth seperti PCC atau Queue Tree, failover membantu memastikan bahwa jaringan tetap memiliki kapasitas berfungsi optimal baik dalam kondisi normal maupun ketika salah satu jalur mengalami masalah. Dengan demikian, failover memainkan peran penting dalam menjaga keandalan jangka panjang dari sistem multi-WAN.

Pada jaringan dengan kebutuhan operasional kritis seperti lingkungan perusahaan energi, perbankan, atau instansi pemerintahan peran failover menjadi semakin esensial. Konektivitas yang terputus, meski hanya beberapa menit, dapat berdampak pada keseluruhan proses bisnis. Oleh karena itu, implementasi failover berbasis MikroTik menyediakan alternatif yang efektif dan ekonomis untuk mendukung keberlanjutan layanan. Pendekatan ini juga memberikan fleksibilitas

untuk memperluas kapasitas jaringan tanpa menambah kompleksitas manajemen yang signifikan.

Secara keseluruhan, failover yang dikombinasikan dengan teknik load balancing seperti PCC memberikan fondasi yang kuat bagi jaringan multi-WAN yang stabil, adaptif, dan selalu siap menghadapi gangguan koneksi. Dengan kemampuan memonitor jalur secara otomatis dan mengalihkan trafik dalam hitungan detik, mekanisme ini memastikan bahwa layanan jaringan tetap tersedia dan dapat diandalkan dalam berbagai skenario operasional. Hal ini sangat relevan bagi penelitian ini, karena penggunaan lebih dari satu ISP merupakan strategi utama dalam meningkatkan efisiensi, ketahanan, dan kontinuitas layanan jaringan.

2.2.10 Multi-user Environment

Lingkungan jaringan dengan banyak pengguna (multi-user), seperti kantor, kampus, laboratorium komputer, atau instansi pemerintahan, memiliki karakteristik penggunaan bersamaan (concurrent) dan beragam aktivitas (download, upload, streaming, VoIP, akses aplikasi internal, dan sebagainya). Kompleksitas ini menciptakan dinamika trafik yang fluktuatif serta sering kali tidak dapat diprediksi, terutama ketika banyak pengguna aktif pada waktu yang sama. Dalam kondisi demikian, tanpa adanya manajemen bandwidth yang terencana dengan baik, jaringan akan rentan mengalami kepadatan yang berujung pada penurunan kualitas layanan. Risiko dominasi trafik oleh pengguna tertentu semakin memperburuk kualitas akses bagi pengguna lain sehingga produktivitas maupun stabilitas layanan digital dapat terganggu.

Pada jaringan multi-user, salah satu tantangan terbesar adalah fenomena bandwidth monopolization, yaitu ketika pengguna tertentu, baik secara sengaja maupun tidak, mengonsumsi bandwidth secara berlebihan. Aktivitas seperti pengunduhan file besar, streaming video beresolusi tinggi, atau penggunaan aplikasi real-time dapat dengan cepat memenuhi kapasitas koneksi yang tersedia. Ketika tidak ada aturan atau mekanisme pembatasan, pengguna lain akan mengalami penurunan throughput, meningkatnya delay, dan jitter yang tidak stabil. Kondisi inilah yang menekankan pentingnya manajemen bandwidth dalam memastikan pembagian sumber daya jaringan berjalan secara adil.

Sejumlah penelitian empiris memberikan bukti kuat mengenai urgensi penerapan manajemen bandwidth pada jaringan multi-user. Salah satu studi yang dilakukan di lingkungan sekolah menunjukkan bahwa kombinasi PCQ dan Queue Tree pada Mikrotik mampu mendistribusikan bandwidth secara lebih merata sehingga throughput rata-rata per klien meningkat, dan variasi kecepatan antar-klien semakin kecil (Prasetyo et al., 2024). Kondisi ini membuktikan bahwa metode manajemen trafik yang tepat dapat mengurangi ketimpangan kualitas layanan antar pengguna dan memastikan setiap pengguna tetap dapat mengakses internet dalam batas wajar.

Temuan penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa tanpa manajemen bandwidth, pengguna yang masuk lebih awal atau melakukan aktivitas berat seperti download file besar dapat menyedot bandwidth secara tidak proporsional. Akibatnya, pengguna lainnya yang terkoneksi pada waktu bersamaan memperoleh alokasi bandwidth jauh lebih rendah dan tidak stabil (Prasetyo et al., 2024). Hal ini semakin mempertegas bahwa jaringan multi-user memerlukan sistem kontrol yang tidak hanya menata distribusi bandwidth tetapi juga memastikan keadilan akses antarpengguna.

Dalam konteks teknis, metode Per Connection Queue (PCQ) berfungsi dengan cara membagi bandwidth berdasarkan jumlah koneksi, bukan berdasarkan total penggunaan perangkat secara keseluruhan. Hal ini berarti setiap koneksi yang dibuat oleh sebuah perangkat akan diperlakukan sebagai entitas yang memiliki antriannya sendiri, sehingga tidak terjadi penumpukan trafik dalam satu saluran besar. Mekanisme ini membantu mencegah dominasi penggunaan bandwidth oleh satu perangkat saja, sehingga bandwidth dapat terbagi lebih merata dalam lingkungan multi-user.

Sementara itu, Queue Tree menawarkan cara yang lebih terstruktur untuk mengelola aliran trafik melalui pembuatan antrian hierarkis. Queue Tree memungkinkan administrator jaringan untuk menetapkan batas kecepatan berdasarkan jenis trafik (download atau upload), segmentasi divisi, atau prioritas layanan tertentu. Kombinasi penggunaan PCQ dan Queue Tree menjadi sangat strategis karena kedua metode saling melengkapi: PCQ mendistribusikan bandwidth secara merata pada level pengguna, sedangkan Queue Tree mengelola

aliran trafik dengan prioritas dan kebijakan tertentu pada level jaringan yang lebih luas (Sapriyadi et al., 2024).

Hasil penelitian empiris terbaru menguatkan efektivitas kombinasi PCQ dan Queue Tree. Studi yang dilakukan pada jaringan institusional dengan jumlah pengguna besar menunjukkan bahwa konfigurasi gabungan ini mampu mengurangi variabilitas kecepatan antar pengguna, menurunkan jitter, menekan latency, serta menjaga throughput tetap konsisten meskipun jaringan berada pada kondisi beban tinggi (Elisama et al., 2025). Dampak positif ini menunjukkan bahwa PCQ + Queue Tree tidak hanya efektif dalam teori, tetapi juga terbukti memberikan stabilitas performa dalam aplikasi nyata.

Keunggulan lain dari metode PCQ + Queue Tree adalah kemampuannya dalam menjaga kualitas layanan secara keseluruhan. Dalam jaringan multi-user, kualitas layanan sangat dipengaruhi oleh bagaimana prioritas trafik diatur. Layanan-layanan kritis seperti komunikasi internal, aplikasi monitoring, atau sistem operasional perusahaan memerlukan bandwidth minimum yang stabil agar dapat berjalan dengan baik. PCQ + Queue Tree memungkinkan pengaturan prioritas trafik yang memastikan aplikasi-aplikasi penting tersebut tetap mendapat akses optimal meskipun trafik jaringan secara keseluruhan padat.

Berdasarkan temuan beragam penelitian tersebut, jelas bahwa penerapan Mikrotik dengan PCQ + Queue Tree sangat relevan untuk lingkungan seperti kantor PLN yang memiliki jumlah pengguna banyak, perangkat beragam, serta kebutuhan layanan yang kompleks. Kemampuan sistem untuk membagi bandwidth secara adil, mencegah dominasi pengguna tertentu, menjaga QoS pada trafik padat, dan menyediakan fleksibilitas konfigurasi menjadikan metode ini solusi ideal bagi jaringan operasional skala institusional.

Dengan demikian, dalam konteks penelitian ini, di mana jaringan di PLN harus melayani banyak pengguna secara simultan, kombinasi PCQ dan Queue Tree pada Mikrotik RouterOS merupakan pendekatan metodologis yang sangat tepat. Pendekatan ini tidak hanya dibenarkan secara teoritis, tetapi juga memiliki dukungan empiris yang kuat dari berbagai penelitian mutakhir. Oleh karena itu, pemilihan metode ini menjadi fondasi yang kuat dalam merancang manajemen bandwidth yang optimal untuk lingkungan multi-user dalam penelitian ini.

2.2.11 Metode Penelitian Eksperimen Kuantitatif Komparatif

Metode eksperimen merupakan pendekatan penelitian yang digunakan untuk mengetahui pengaruh suatu perlakuan terhadap variabel tertentu dalam kondisi yang terkendali (Sugiyono, 2019). Dalam penelitian eksperimen, peneliti melakukan manipulasi terhadap variabel bebas dan mengamati perubahan yang terjadi pada variabel terikat guna memperoleh hubungan sebab-akibat yang dapat diuji secara empiris.

Pendekatan kuantitatif digunakan karena data yang dianalisis berupa nilai numerik yang diperoleh dari hasil pengukuran parameter kinerja jaringan. Menurut Creswell (2014), penelitian kuantitatif berfokus pada pengukuran variabel secara objektif dan analisis data menggunakan prosedur statistik untuk menghasilkan kesimpulan yang dapat diuji secara ilmiah.

Dalam konteks penelitian ini, metode eksperimen kuantitatif komparatif digunakan untuk membandingkan kinerja jaringan yang dihasilkan dari dua konfigurasi yang berbeda, yaitu metode Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) dan Quality of Service (QoS) Queue Tree pada perangkat MikroTik. Perbandingan dilakukan berdasarkan parameter Quality of Service (QoS) yang meliputi throughput, delay, jitter, dan packet loss dalam kondisi pengujian yang sama.

Pendekatan komparatif memungkinkan evaluasi terhadap perbedaan performa antar metode berdasarkan data empiris yang terukur (Arikunto, 2018). Dengan demikian, penelitian ini tidak membandingkan mekanisme internal masing-masing metode, melainkan membandingkan hasil kinerja jaringan yang dihasilkan setelah implementasi konfigurasi.

Penggunaan metode eksperimen kuantitatif komparatif dalam penelitian jaringan komputer juga banyak diterapkan dalam studi evaluasi performa sistem jaringan, khususnya dalam analisis Quality of Service (QoS) sebagai indikator utama kinerja jaringan (Tanenbaum & Wetherall, 2021).

2.2.12 Flowchart Diagram

Flowchart atau diagram alir merupakan representasi visual dari suatu proses atau sistem yang menggambarkan urutan langkah-langkah secara sistematis menggunakan simbol-simbol standar seperti terminator (Start/End), process,

decision, dan flowline (panah alur). Flowchart digunakan untuk mempermudah pemahaman terhadap alur kerja, logika proses, serta hubungan antar tahapan dalam suatu sistem (Pressman & Maxim, 2020).

Menurut Kendall & Kendall (2014), flowchart membantu dalam mendokumentasikan prosedur, menganalisis sistem, serta mengidentifikasi potensi permasalahan sebelum implementasi dilakukan. Dalam penelitian kuantitatif eksperimental, flowchart berfungsi sebagai panduan visual untuk memastikan setiap tahapan penelitian berjalan secara terstruktur dan sistematis.

Secara umum, simbol-simbol utama dalam flowchart meliputi:

1. Terminator (Start/End)

Digunakan untuk menunjukkan awal dan akhir proses.

2. Process (Proses)

Menunjukkan aktivitas atau langkah kerja yang dilakukan.

3. Decision (Keputusan)

Digunakan untuk percabangan berdasarkan kondisi tertentu.

4. Flowline (Garis Alir/Panah)

Menunjukkan arah alur proses.

Dalam konteks penelitian ini, flowchart digunakan untuk menggambarkan tahapan eksperimen komparatif antara metode Load Balancing PCC dan Quality of Service (QoS) Queue Tree. Diagram alir tersebut menjelaskan proses mulai dari tahap persiapan, pengujian awal, pelaksanaan dua skenario eksperimen, pengambilan data parameter jaringan (throughput, latency, jitter, dan packet loss), hingga tahap analisis data dan penarikan kesimpulan.

Penggunaan flowchart dalam penelitian ini bertujuan untuk:

- a. Memberikan gambaran sistematis alur penelitian
- b. Memudahkan validasi tahapan eksperimen
- c. Menghindari kesalahan prosedural
- d. Meningkatkan kejelasan metodologi penelitian

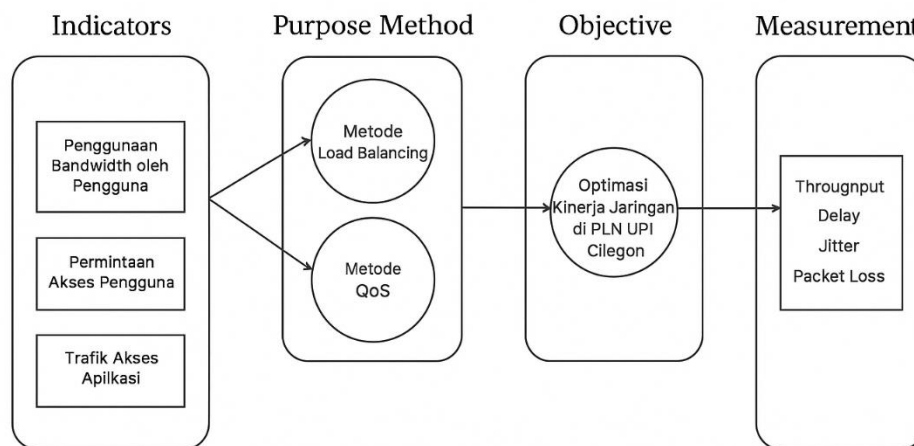
Dengan adanya flowchart, proses penelitian menjadi lebih terstruktur dan mudah dipahami baik oleh peneliti maupun pembaca laporan ilmiah

2.3 Kerangka Pemikiran

Penelitian ini berangkat dari permasalahan manajemen bandwidth dan kestabilan koneksi jaringan yang menjadi tantangan utama di lingkungan PLN UPT Cilegon. Dengan tingginya kebutuhan akses terhadap aplikasi korporat, sistem monitoring, serta penggunaan internet oleh banyak user secara simultan, maka diperlukan strategi pengelolaan trafik jaringan yang efektif.

Dua pendekatan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah **Load Balancing PCC (Per Connection Classifier)** dan **Quality of Service (QoS) Queue Tree**. Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) bertujuan untuk membagi beban trafik internet ke lebih dari satu jalur koneksi atau ISP secara merata agar tidak terjadi bottleneck pada satu koneksi saja. Sedangkan QoS bertujuan untuk mengatur prioritas lalu lintas jaringan berdasarkan jenis layanan (seperti VoIP, video streaming, atau browsing), sehingga trafik penting mendapatkan alokasi bandwidth yang sesuai.

Penelitian ini membandingkan efektivitas dari masing-masing metode tersebut pada perangkat Mikrotik, dengan melakukan berbagai pengujian seperti throughput, delay, jitter, packet loss, serta stabilitas koneksi dari sisi pengguna.



Gambar 2.1 Kerangka Pemikiran

Pada Gambar 2.1 menunjukkan kerangka pemikiran bagaimana penelitian ini dilakukan. Kerangka pemikiran menunjukkan keterkaitan antara satu komponen dengan komponen lainnya. Berikut adalah penjelasan dari masing-masing komponen pada gambar:

1. Indicators (Indikator)

Komponen ini menggambarkan faktor-faktor penting yang menjadi latar belakang dilakukannya penelitian:

- a. Kebutuhan Bandwidth Tinggi: Di lingkungan PLN UPT Cilegon , banyak perangkat, user, dan sistem aplikasi korporat yang membutuhkan akses internet yang stabil dan cepat.
- b. Permasalahan Jaringan: Terjadinya bottleneck, latency, jitter, dan ketidakseimbangan distribusi trafik akibat penggunaan bandwidth yang tidak terkendali.

2. Purpose Method (Metode Tujuan)

Bagian ini menjelaskan dua pendekatan utama yang dibandingkan dalam penelitian:

- a. Load Balancing PCC (Per Connection Classifier) (Per Connection Classifier / ECMP): Digunakan untuk membagi trafik jaringan ke beberapa jalur atau gateway dengan tujuan menghindari overload dan memaksimalkan kecepatan akses.
- b. Quality of Service (QoS - Queue Tree / PCQ): Digunakan untuk mengatur dan memprioritaskan trafik berdasarkan jenis layanan serta memberikan limitasi bandwidth untuk menghindari dominasi oleh user tertentu.

3. Objective (Tujuan Penelitian)

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Menganalisis dan Membandingkan efektivitas kedua metode dalam meningkatkan performa jaringan.
- b. Menentukan Metode yang Paling Optimal untuk diterapkan di lingkungan kerja PLN UPT Cilegon berdasarkan indikator performa seperti throughput, delay, jitter, dan packet loss.

4. Measurement (Pengukuran)

Evaluasi kinerja jaringan dilakukan berdasarkan beberapa parameter utama:

- a. Throughput: Mengukur kecepatan data yang berhasil dikirimkan.
- b. Delay: Mengukur waktu tunda pengiriman paket.
- c. Jitter: Mengukur variasi delay antar paket.
- d. Packet Loss: Mengukur kehilangan paket selama transmisi.

- e. Stabilitas & Efisiensi Penggunaan Bandwidth: Berdasarkan data dari tools seperti Torch, Speedtest, dan Graph Interface Mikrotik.