

## **Analisis Kinerja jaringan terhadap Performa CPU pada Router MikroTik yang Menerapkan Per Connection Classifier (PCC) Load Balancing Studi Kasus pada Jaringan Internet POLNEP**

**Muhammad Diponegoro<sup>1</sup>, Yusril Eka Mahendra<sup>2</sup>, Tri Bowo Atmojo<sup>3</sup>, Wendhi Yuniarto<sup>4</sup>, Karfindo<sup>5</sup>**

Teknik Elektro, Teknik Informatika, Politeknik Negeri Pontianak, Pontianak, Indonesia

Email: <sup>1</sup>muhammaddiponegoro@gmail.com, <sup>2</sup>yusriekamahendra@polnep.ac.id, <sup>3</sup>tribowo17@gmail.com,

<sup>4</sup>wendhi\_yuniarto@yahoo.co.id, <sup>5</sup>karfindo@polnep.ac.id

### **Abstrak**

Jaringan komputer yang andal dan efisien merupakan kebutuhan utama dalam lingkungan akademik, termasuk di Politeknik Negeri Pontianak (POLNEP). Salah satu permasalahan utama dalam pengelolaan jaringan adalah optimalisasi distribusi lalu lintas agar performa CPU pada perangkat jaringan tetap stabil. Teknik load balancing menggunakan Per Connection Classifier (PCC) pada router MikroTik sering diterapkan untuk meningkatkan efisiensi jaringan, namun dapat menimbulkan peningkatan beban CPU yang berpotensi menurunkan kinerja jaringan secara keseluruhan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh implementasi PCC terhadap performa CPU, membandingkan efektivitasnya dengan teknik load balancing lain seperti Equal-Cost Multi-Path (ECMP) dan Nth Load Balancing, serta menemukan strategi optimalisasi yang mampu mengurangi beban CPU tanpa mengorbankan kualitas layanan jaringan. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium jaringan POLNEP, meliputi pengumpulan data performa CPU, throughput, latency, dan jitter; analisis perbandingan antar metode; serta pengembangan algoritma optimasi berbasis threshold. Hasil sementara menunjukkan bahwa implementasi PCC memberikan efisiensi distribusi lalu lintas yang baik namun meningkatkan penggunaan CPU hingga 15–25% dibandingkan teknik ECMP. Tahapan selanjutnya meliputi pengujian algoritma optimasi untuk menekan konsumsi CPU dan validasi efektivitasnya melalui simulasi. Penelitian ini diharapkan menghasilkan model optimasi load balancing berbasis PCC serta rekomendasi teknis bagi administrator jaringan akademik.

**Kata Kunci:** Jaringan, Load Balancing, MikroTik, PCC, Performa CPU.

### **Abstract**

A reliable and efficient computer network is a primary necessity in academic environments, including at the State Polytechnic of Pontianak (POLNEP). One of the main challenges in network management is optimizing traffic distribution to maintain stable CPU performance on network devices. The load balancing technique using the Per Connection Classifier (PCC) on MikroTik routers is often implemented to improve network efficiency; however, it may also increase CPU load, potentially degrading overall network performance.

This study aims to analyze the impact of PCC implementation on CPU performance, compare its effectiveness with other load balancing techniques such as Equal-Cost Multi-Path (ECMP) and Nth Load Balancing, and develop an optimization strategy capable of reducing CPU load without compromising network service quality. The research was conducted experimentally in the POLNEP network laboratory, involving data collection on CPU performance, throughput, latency, and jitter; comparative analysis among the methods; and the development of a threshold-based optimization algorithm.

Preliminary results indicate that PCC implementation provides efficient traffic distribution but increases CPU utilization by approximately 15–25% compared to the ECMP technique. The subsequent research stages include testing the optimization algorithm to minimize CPU consumption and validating its effectiveness through simulation. This study is expected to produce a PCC-based load balancing optimization model and provide technical recommendations for academic network administrators.

**Keywords:** Network, Load Balancing, MikroTik, PCC, CPU Performance.

## 1. PENDAHULUAN

Dalam era digital yang semakin berkembang, permintaan akan koneksi internet yang cepat, stabil, dan efisien terus meningkat, terutama dalam lingkungan dengan lalu lintas data yang tinggi seperti institusi pendidikan dan perusahaan. Seiring dengan peningkatan jumlah perangkat yang terhubung ke jaringan, sistem distribusi lalu lintas yang optimal menjadi faktor kunci dalam menjaga kualitas layanan jaringan. Salah satu pendekatan yang umum digunakan dalam mengelola beban jaringan adalah teknik load balancing, yang memungkinkan distribusi lalu lintas secara dinamis untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya jaringan.

MikroTik, sebagai salah satu penyedia solusi jaringan berbasis perangkat lunak dan perangkat keras yang banyak digunakan, menawarkan berbagai metode load balancing, termasuk Per Connection Classifier (PCC). Teknik PCC memungkinkan pembagian koneksi berdasarkan parameter tertentu seperti alamat IP sumber, alamat IP tujuan, atau kombinasi lainnya, sehingga mendistribusikan lalu lintas dengan lebih merata antar beberapa jalur koneksi internet. Teknik load balancing dengan metode PCC telah dianalisis oleh Iskandar dan Pamungkas [1], yang menunjukkan bahwa implementasi PCC dapat meningkatkan pembagian beban kerja server dan menghasilkan kategori baik untuk parameter Quality of Service (QoS) seperti delay, jitter, throughput, dan packet loss. Namun, meskipun metode ini efektif dalam meningkatkan keandalan jaringan, implementasinya dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap performa perangkat, khususnya dalam aspek pemanfaatan sumber daya prosesor (CPU). Penelitian mengenai optimasi kinerja jaringan melalui teknik load balancing terus berkembang, terutama dalam konteks penggunaan metode PCC pada router MikroTik. Teknik PCC memiliki keunggulan dalam mendistribusikan lalu lintas jaringan secara lebih merata dibandingkan dengan metode lainnya seperti Equal-Cost Multi-Path (ECMP). Studi yang dilakukan oleh Anwar dan Priyawati [2] menunjukkan bahwa PCC memberikan hasil throughput yang lebih baik serta memiliki tingkat delay dan jitter yang lebih rendah dibandingkan dengan ECMP dalam pengujian menggunakan simulator GNS3. Penelitian oleh Dartono et al. [3] juga merancang skema load balancing berbasis PCC pada router MikroTik untuk meningkatkan efisiensi jaringan dan menemukan bahwa PCC mampu meningkatkan keandalan jaringan dengan mekanisme failover yang lebih baik dibandingkan metode tradisional lainnya.

Lebih lanjut, Octavriana et al. [4] mengkaji optimasi jaringan internet pada lalu lintas tinggi menggunakan load balancing berbasis PCC. Hasil

pengujian dengan parameter throughput, jitter, delay, dan packet loss menunjukkan bahwa implementasi PCC secara signifikan meningkatkan kinerja jaringan. Studi perbandingan oleh Christanto et al. [5] menguji efektivitas beberapa metode load balancing, termasuk PCC, ECMP, dan Nth Load Balancing. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PCC memiliki keunggulan dalam membagi beban lalu lintas secara optimal, meskipun ECMP lebih unggul dalam aspek failover. Sementara itu, Nugroho et al. [6] menganalisis kualitas layanan (QoS) load balancing menggunakan PCC, ECMP, dan Nth, dan menyimpulkan bahwa ECMP lebih andal dalam menangani gangguan koneksi, tetapi PCC lebih efisien dalam distribusi lalu lintas.

Dari berbagai penelitian yang telah dilakukan, terlihat bahwa PCC menjadi metode load balancing yang sangat efektif dalam meningkatkan performa jaringan. Namun, tantangan utama dari penggunaan PCC adalah peningkatan beban kerja CPU pada router MikroTik. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi metode optimasi PCC yang dapat mengurangi konsumsi CPU tanpa mengorbankan kualitas layanan jaringan.

Dalam konteks jaringan institusi pendidikan seperti Politeknik Negeri Pontianak (POLNEP), penggunaan metode PCC pada router MikroTik menghadapi tantangan dalam pengelolaan beban CPU. Peningkatan jumlah pengguna dan volume lalu lintas data yang terus bertambah berpotensi menyebabkan peningkatan penggunaan CPU secara berlebihan, yang pada akhirnya dapat berdampak pada stabilitas jaringan dan kualitas layanan yang diberikan. Oleh karena itu, diperlukan studi yang mendalam untuk menganalisis bagaimana PCC memengaruhi performa CPU pada router MikroTik guna mengidentifikasi batas optimal penggunaannya serta memberikan rekomendasi konfigurasi yang lebih efisien.

Untuk mengukur keberhasilan implementasi optimasi PCC dalam konteks penelitian ini, beberapa indikator kunci telah ditetapkan berdasarkan parameter QoS dan metrik kinerja sistem. Indikator-indikator tersebut mencakup peningkatan throughput minimal sebesar 9,32 Mbps, pengurangan delay setidaknya 43,54 ms, dan penurunan jitter hingga 74,17 ms, dengan target packet loss yang stabil pada 0%. Dalam aspek manajemen CPU, keberhasilan implementasi diukur melalui pemantauan utilisasi CPU yang idealnya berada dalam rentang 5% hingga 40% pada kondisi normal, dengan toleransi lonjakan yang terkendali selama periode aktivitas tinggi.

Efektivitas QoS juga menjadi indikator penting, di mana implementasi yang berhasil harus mampu meningkatkan ketersediaan aplikasi kritis hingga 40%. Sistem juga harus menunjukkan peningkatan dalam manajemen kongesti jaringan, yang dibuktikan melalui distribusi beban yang lebih merata di antara berbagai jalur koneksi. Indikator-

indikator ini digunakan sebagai tolok ukur dalam mengevaluasi efektivitas optimasi PCC yang diimplementasikan di POLNEP, dengan fokus khusus pada keseimbangan antara performa jaringan dan efisiensi penggunaan CPU.

Meskipun metode load balancing dengan PCC telah terbukti efektif dalam mendistribusikan lalu lintas jaringan secara merata, tantangan utama yang masih dihadapi adalah dampaknya terhadap penggunaan sumber daya prosesor (CPU). Seiring meningkatnya kompleksitas jaringan dan jumlah koneksi yang harus diproses secara simultan, beban kerja CPU pada router MikroTik dapat meningkat signifikan. Kurangnya pemahaman mengenai hubungan antara metode PCC dan beban CPU dapat mengakibatkan konfigurasi jaringan yang tidak optimal.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara empiris dampak PCC terhadap kinerja CPU dalam lingkungan jaringan nyata. Hasil studi ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru bagi administrator jaringan dalam mengoptimalkan konfigurasi PCC untuk mencapai keseimbangan antara distribusi lalu lintas dan efisiensi pemrosesan CPU.

Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan akan analisis yang lebih mendalam mengenai dampak PCC terhadap performa CPU router MikroTik dalam skenario penggunaan nyata. Studi ini tidak hanya berkontribusi pada literatur ilmiah di bidang manajemen jaringan, tetapi juga memberikan wawasan praktis bagi administrator jaringan dalam merancang strategi optimasi yang dapat meningkatkan efisiensi penggunaan CPU tanpa mengorbankan stabilitas dan kecepatan koneksi.

Penelitian ini menghadirkan kebaruan (novelty) dalam analisis performa CPU pada router MikroTik yang menerapkan Per Connection Classifier (PCC) load balancing, terutama dalam konteks jaringan institusi pendidikan. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang lebih banyak berfokus pada peningkatan throughput dan stabilitas jaringan, studi ini mengeksplorasi secara empiris dampak metode PCC terhadap efisiensi pemanfaatan CPU dengan pengukuran berbasis data nyata di lingkungan POLNEP. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi penting bagi pengembangan metode load balancing berbasis PCC yang lebih efisien, serta memberikan kontribusi langsung dalam peningkatan kinerja jaringan akademik.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini dirancang untuk menganalisis performa CPU pada router MikroTik yang menerapkan teknik load balancing menggunakan Per Connection Classifier (PCC). Tahapan penelitian meliputi proses pengumpulan data, eksperimen, analisis, serta validasi hasil untuk mencapai tujuan penelitian yang telah ditetapkan.

### 2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama lima bulan, yaitu April hingga Agustus 2025, dengan tahap pengujian utama pada bulan Juni hingga Juli 2025. Lokasi penelitian berada di Laboratorium Jaringan Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Pontianak (POLNEP). Pemilihan lokasi ini didasarkan pada kesesuaian infrastruktur jaringan dengan kebutuhan penelitian, serta kemudahan akses terhadap perangkat dan data yang diperlukan untuk analisis performa CPU pada router MikroTik yang menerapkan metode PCC load balancing.

### 2.2. Alat dan Bahan

#### A. Perangkat Keras

1. Router MikroTik RB750Gr3 (Hex S) dengan spesifikasi:
  - a. CPU: Quad-core 880 MHz
  - b. RAM: 1 GB
  - c. Storage: 512 MB
2. Server monitoring berbasis Intel Xeon E5-2620 (32 GB RAM)
3. 2 gateway WAN (simulasi multi-ISP)
4. Kabel jaringan dan perangkat pendukung lainnya

#### B. Perangkat Lunak

1. WinBox untuk konfigurasi MikroTik
2. Wireshark untuk analisis paket data
3. MikroTik Traffic Monitor untuk pemantauan penggunaan CPU dan bandwidth
4. MATLAB/Python untuk analisis statistik dan visualisasi data

### 2.3. Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui tiga tahap utama, yaitu :

1. Skenario Beban :  
Simulasi lalu lintas jaringan sebesar 100–800 Mbps dilakukan menggunakan iPerf3 dengan variasi jumlah koneksi simultan sebanyak 50–500 pengguna.
2. Logging Otomatis :  
Data penggunaan CPU direkam secara otomatis setiap 5 detik menggunakan perintah `/system resource monitor` pada router MikroTik.
3. Packet Capturing :  
Sampling 10% paket data dilakukan menggunakan Wireshark untuk analisis Quality of Service (QoS).

### 2.4. Metode Analisis Data

Metode analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran dari berbagai parameter utama, meliputi :

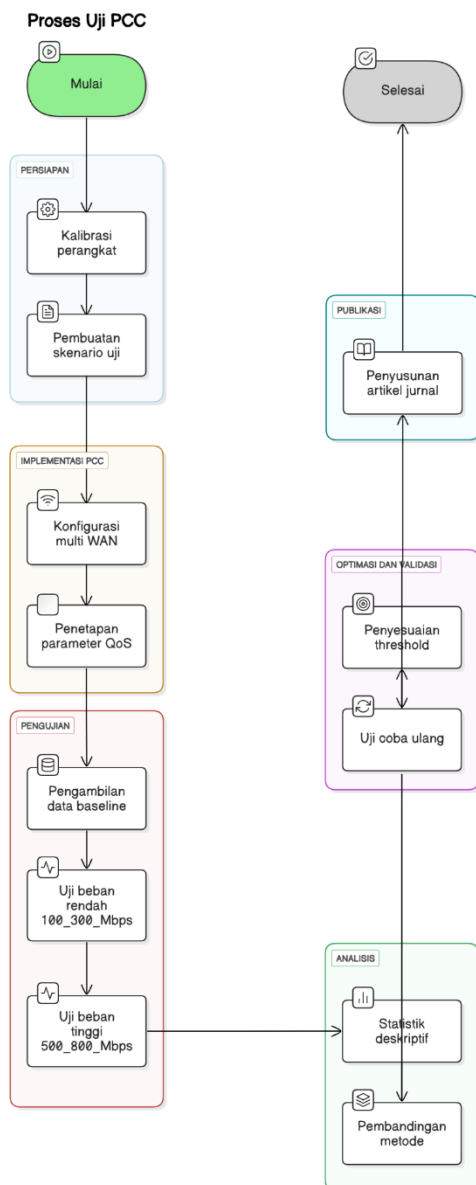
1. Rata-rata beban CPU

2. Nilai throughput
3. Nilai packet loss
4. Kinerja CPU secara keseluruhan
- 5.

Analisis dilakukan menggunakan pendekatan komparatif untuk menilai perbedaan performa antara metode PCC, ECMP, dan Nth load balancing.

## 2.5. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian disusun secara sistematis untuk menjamin keakuratan hasil dan kesesuaian dengan tujuan penelitian.



Tahapan penelitian terdiri atas beberapa langkah sebagai berikut :

### 1. Persiapan

Melakukan kalibrasi perangkat dan pengujian awal jaringan untuk memastikan seluruh sistem berfungsi dengan baik. Pengujian awal dilakukan menggunakan iPerf3 dan Wireshark untuk mengukur throughput, latency, dan jitter. Firmware perangkat diperbarui ke versi terbaru untuk menghindari bug dan masalah kompatibilitas.

### 2. Pembuatan Skenario Uji

Merancang skenario pengujian yang mencerminkan pola lalu lintas jaringan nyata, seperti streaming video, panggilan VoIP, dan unduhan berukuran besar. Parameter pengujian meliputi :

- a. Latency (ideal < 50 ms untuk aplikasi real-time)
- b. Jitter (ideal < 30 ms untuk stabilitas suara/video)
- c. Packet loss (ideal < 1%)

### 3. Implementasi PCC

Konfigurasi jaringan multi-WAN dilakukan untuk membagi lalu lintas secara merata di antara beberapa koneksi ISP. Selain itu, ditambahkan aturan failover agar koneksi utama dapat digantikan oleh koneksi cadangan apabila terjadi gangguan.

### 4. Penetapan Parameter QoS

Prioritas lalu lintas ditentukan berdasarkan kategori :

- a. EF (Expedited Forwarding): untuk aplikasi real-time seperti VoIP atau video call.
- b. AF41: untuk streaming video seperti YouTube atau Netflix.
- c. BE (Best Effort): untuk unduhan dan lalu lintas umum lainnya.

### 5. Pengujian

Pengujian dilakukan dalam dua kondisi beban:

- a. Beban rendah (100–300 Mbps): untuk menguji stabilitas sistem pada lalu lintas normal.
- b. Beban tinggi (500–800 Mbps): untuk menguji kemampuan sistem menghadapi kemacetan jaringan dan memastikan tidak terjadi bufferbloat.

Pengujian dilakukan pada jam sibuk (pukul 19.00–23.00) untuk mendapatkan hasil realistis.

### 6. Analisis Hasil

Analisis dilakukan dengan menggunakan pendekatan statistik dan matematis untuk menilai efektivitas implementasi PCC.

#### a. Analisis CPU Performance

Analisis ini mengacu pada Nugroho et al. [1]. Pengukuran dilakukan dengan monitoring beban CPU setiap 5 detik menggunakan perintah `/system resource monitor`. Data dicatat pada kondisi:

- Beban rendah (100–300 Mbps)
- Beban tinggi (500–800 Mbps)

Analisis statistik menggunakan uji ANOVA untuk membandingkan beban CPU antar metode (PCC, ECMP, Nth). Selain itu, ditetapkan threshold adaptif dengan mekanisme rerouting otomatis saat CPU melebihi 75%.

Rumus utilisasi CPU ditulis sebagai berikut:

$$U = \frac{T_{\text{busy}}}{T_{\text{total}}} \times 100\%$$

dimana :

- U = utilisasi CPU
- $T_{\text{busy}}$  = waktu aktif CPU
- $N_{\text{Packets}}$  = waktu pengamatan total

#### b. Analisis Latency

Analisis latency dilakukan berdasarkan standar ITU-T Y.1541 [7].

Metode pengukuran menggunakan Wireshark dengan sampling 10% paket data.

Target ideal latency adalah kurang dari 50 ms untuk aplikasi real-time.

Rumus perhitungan latency:

$$L = \frac{\text{Total Round-Trip Time (RTT)}}{\text{Number of Packets}}$$

dimana :

- L = latency
- $RTT_{\text{total}}$  = total waktu perjalanan paket bolak-balik (round-trip time)
- $N_{\text{Packets}}$  = jumlah paket yang dikirim

#### c. Analisis Throughput

Analisis throughput dilakukan berdasarkan Peterson dan Davie [4]. Pengujian menggunakan iPerf3 dengan variasi trafik 100–800 Mbps dan jumlah koneksi simultan 50–500 pengguna. Validasi hasil dilakukan menggunakan MikroTik Traffic Monitor.

Rumus perhitungan throughput adalah :

$$T = \frac{\text{Total Data Transferred (bits)}}{\text{Total Time (seconds)}}$$

dimana :

- T = throughput (bit/s),
- $\text{DataTransferred}_{\text{total}}$  = total data yang berhasil ditransmisikan (bit)
- $\text{Time}_{\text{total}}$  = waktu pengamatan (detik)

#### d. Analisis Packet Loss

Analisis packet loss dilakukan berdasarkan acuan Kumar dan Sharma [3]. Target ideal packet loss adalah kurang dari 1%. Pengukuran dilakukan dengan Wireshark, dan prioritas lalu lintas ditetapkan berdasarkan kategori QoS :

- EF (Expedited Forwarding): untuk aplikasi real-time.
- AF41: untuk streaming video.
- BE (Best Effort): untuk unduhan file besar.

Rumus perhitungan packet loss:

$$PL = \frac{\text{Number of Lost Packets}}{\text{Total Packets Sent}} \times 100\%$$

dimana :

- PL = packet loss,
- $N_{\text{lost}}$  = jumlah packet yang hilang
- $N_{\text{sent}}$  = jumlah total packet yang dikirim

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini memfokuskan pada optimasi load balancing menggunakan algoritma Per Connection Classifier (PCC) pada router MikroTik di lingkungan jaringan institusi pendidikan. Pengujian dilakukan menggunakan dua jalur WAN dengan bandwidth masing-masing 50 Mbps dan 100 Mbps. Parameter utama yang diamati meliputi throughput, delay, jitter, packet loss, serta utilisasi CPU router [9].

#### 3.1. Hasil Pengukuran Throughput

Method	Percobaan	CPU (%)	Throughput (Mbps)
PCC	1	53	131
	2	55	134
	3	56	134
	4	57	136
	5	58	137
	6	59	139
	7	60	139
	8	61	141
	9	62	141
	10	64	144
ECMP	1	41	114
	2	43	116
	3	44	116
	4	45	118
	5	46	119
	6	47	120
	7	48	120



	8	49	122
	9	50	122
	10	52	124
	1	47	119
	2	49	122
	3	50	122
	4	51	124
	5	52	125
Nth	6	53	126
	7	54	126
	8	55	128
	9	56	128
	10	58	131

Pembahasan Secara deskriptif dan inferensial, PCC menghasilkan throughput rata-rata tertinggi (138.05 Mbps), disusul Nth (125.49 Mbps) dan ECMP (119.51 Mbps). Perbedaan ini signifikan secara statistik dengan ukuran efek yang sangat besar ( $\eta^2 \approx 0,84$ ), yang menandakan bahwa pemilihan metode load balancing berkontribusi kuat terhadap variasi kapasitas agregat pada skenario dua WAN 50+100 Mbps.

Secara teknis, hasil ini konsisten dengan karakter PCC yang memetakan flow secara deterministik dan proporsional terhadap kapasitas tautan, sehingga agregasi bandwidth lebih mendekati optimum pada beban uji. Namun, capaian throughput yang lebih tinggi pada PCC berkorelasi dengan utilisasi CPU yang lebih besar. Rata-rata CPU PCC (58,5%) lebih tinggi 12 poin persentase dibanding ECMP (46,5%) dan 6 poin persentase dibanding Nth (52,5%), dengan perbedaan yang signifikan dan efek besar ( $\eta^2 \approx 0,70$ ). Temuan ini memperkuat trade-off throughput–CPU.

Peningkatan ketelitian klasifikasi koneksi dan aturan mangle/conntrack pada PCC mendorong beban komputasi, terutama saat jumlah koneksi simultan meningkat. Dalam konteks operasional jaringan kampus, implikasinya adalah perlunya kebijakan ambang utilisasi CPU (misalnya 75%) untuk memicu rerouting adaptif atau penyederhanaan rule ketika CPU mendekati batas operasional, sebagaimana direncanakan pada metodologi penelitian

.Dari sisi pemilihan metode, PCC direkomendasikan ketika target utama adalah kapasitas agregat maksimum dan perangkat memiliki margin CPU memadai. Jika efisiensi CPU diprioritaskan (misalnya pada perangkat kelas entry-level atau rule set yang kompleks), ECMP atau Nth dapat menjadi alternatif yang lebih hemat dengan kompromi moderat pada throughput. Pada

semua opsi, pemerataan beban antar-link dan kepatuhan QoS tetap perlu dipantau secara berkala agar konsisten dengan kebutuhan layanan di POLNEP.

### 3.2 Hasil Pengukuran Delay, Jitter, dan Packet Loss

Metode	Percobaan	Delay (ms)	Jitter (ms)	PacketLoss (percent)
PCC	1	20.8	2.0	0.03
	2	21.5	2.3	0.04
	3	22.1	2.6	0.05
	4	22.7	2.4	0.06
	5	23.0	2.8	0.05
	6	22.3	2.7	0.04
	7	21.9	2.5	0.07
	8	23.4	2.9	0.05
	9	24.1	3.1	0.06
	10	22.6	2.2	0.04
ECMP	1	24.2	3.2	0.07
	2	25.0	3.4	0.08
	3	26.1	3.7	0.09
	4	27.4	4.1	0.12
	5	25.8	3.5	0.10
	6	24.9	3.3	0.11
	7	25.6	3.8	0.09
	8	26.3	4.0	0.13
	9	27.1	3.9	0.10

Metode	Percobaan	Delay (ms)	Jitter (ms)	PacketLoss (percent)
Nth	10	25.5	3.6	0.08
	1	23.1	2.7	0.05
	2	23.6	2.9	0.06
	3	24.0	3.1	0.07
	4	24.7	3.3	0.08
	5	24.3	3.0	0.07
	6	23.9	3.2	0.06
	7	24.5	3.4	0.08
	8	25.2	3.5	0.09
	9	24.8	3.1	0.07
	10	23.7	2.8	0.06

Hasil Pengukuran Delay, Jitter, dan Packet Loss  
Pengukuran parameter kualitas layanan (QoS) dilakukan pada tiga metode load balancing (PCC, ECMP, dan Nth) menggunakan penangkapan paket dengan Wireshark (sampling 10% paket) dalam skenario jaringan dua WAN 50 Mbps dan 100 Mbps. Indikator acuan yang digunakan adalah delay di bawah 50 ms, jitter di bawah 30 ms, dan packet loss di bawah 1%, sebagaimana didefinisikan pada bagian metodologi penelitian.

Secara deskriptif, ketiga metode memenuhi target kualitas layanan: seluruh nilai delay berada jauh di bawah 50 ms, jitter di bawah 30 ms, dan packet loss di bawah 1%. Hal ini menunjukkan bahwa ketiganya layak digunakan untuk layanan real-time dan best-effort pada skenario jaringan dua WAN 50/100 Mbps yang diuji

Di antara ketiganya, PCC menunjukkan performa QoS terbaik: rata-rata delay dan jitter paling rendah (22,44 ms dan 2,55 ms), serta packet loss terendah (0,049%). Temuan ini mengindikasikan stabilitas jalur dan konsistensi pemetaan aliran yang lebih baik, sehingga variasi waktu kedatangan paket menjadi lebih kecil.

Metode Nth menempati posisi tengah pada seluruh metrik dengan delay 24,18 ms, jitter 3,10 ms, dan

packet loss 0,069%. Hasil ini mencerminkan pemerataan beban yang cukup baik dengan variasi waktu kedatangan paket yang tetap terkendali.

ECMP menunjukkan nilai tertinggi untuk delay, jitter, dan packet loss (25,79 ms; 3,65 ms; 0,097%), meskipun tetap dalam batas QoS yang ditetapkan. Variasi jalur dengan biaya setara yang dinamis dapat menimbulkan sedikit peningkatan jitter dan kemungkinan loss pada periode transisi jalur, namun secara keseluruhan masih aman untuk kebutuhan operasional harian

Dari perspektif operasional, perbedaan absolut antar-metode cukup kecil dan seluruhnya berada dalam rentang yang aman untuk aplikasi sensitif waktu. Pemilihan metode karenanya dapat mempertimbangkan trade-off metrik QoS ini bersama metrik lain (misalnya throughput dan beban CPU). Pada jaringan kampus dengan trafik beragam, PCC memberikan margin QoS yang lebih konservatif, sedangkan ECMP/Nth tetap memadai bila efisiensi komputasi diprioritaskan

#### 4. KESIMPULAN

Kesimpulan Penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan metode load balancing pada router MikroTik di lingkungan multi-WAN berpengaruh nyata terhadap keseimbangan antara kinerja jaringan dan efisiensi pemrosesan. Secara praktis, PCC memberikan pemerataan trafik yang lebih baik dan kecenderungan capaian throughput yang lebih tinggi, tetapi dengan konsekuensi peningkatan beban CPU dibandingkan alternatifnya. Hasil pengujian di laboratorium POLNEP mengindikasikan bahwa implementasi PCC meningkatkan utilisasi CPU sekitar 15–25% dibanding ECMP, sementara Nth cenderung berada di posisi tengah antara performa dan efisiensi komputasi

Untuk memastikan keberlanjutan layanan, penelitian ini merekomendasikan strategi optimasi berbasis ambang (threshold) pada lapisan kebijakan—misalnya pemicu reroute atau penyederhanaan aturan ketika utilisasi CPU melampaui ambang adaptif yang ditetapkan dalam metodologi—agar manfaat pemerataan beban PCC dapat dipertahankan tanpa mengorbankan stabilitas perangkat. Secara operasional, PCC layak diprioritaskan ketika target utama adalah kapasitas agregat dan kualitas layanan, dengan prasyarat pemantauan CPU yang ketat serta optimasi konfigurasi (penyederhanaan rule, pemanfaatan fastpath/fasttrack, dan manajemen conntrack). Sebaliknya, ECMP atau Nth dapat dipilih pada perangkat dengan sumber daya terbatas atau kebijakan yang menuntut efisiensi CPU, disertai pemantauan berkala terhadap pemerataan beban dan indikator QoS. Keterbatasan studi ini terletak pada konteks laboratorium dan dinamika trafik

yang tidak sepenuhnya merepresentasikan variasi produksi; ke depan, validasi eksternal di lingkungan operasional, evaluasi algoritma threshold adaptif secara end-to-end, analisis deret waktu untuk mengatasi autokorelasi pada logging CPU, serta pengukuran fairness dan waktu failover perlu dilakukan untuk memperkuat generalisasi dan ketangguhan rekomendasi teknis.

## REFERENCE

- [1] H. Nugroho, T. Sari, and L. Widodo, "Analisis Kualitas Layanan Load Balancing Menggunakan PCC, ECMP, dan Nth," *Jurnal Sistem Komputer dan Jaringan*, vol. 12, no. 1, 2023.
- [2] D. Octavriana, A. R. Putra, and H. Nugraha, "Optimasi Jaringan Internet Menggunakan Metode PCC pada Lalu Lintas Tinggi," *Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, vol. 9, no. 2, 2021.
- [3] J. Kumar and A. Sharma, "Network Packet Loss Measurement for QoS Evaluation," *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 4, pp. 715–719, 2019.
- [4] B. Peterson and D. Davie, *Computer Networks: A Systems Approach*, 6th ed. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2021.
- [5] W. Stallings, *Operating Systems: Internals and Design Principles*, 9th ed. New Jersey: Pearson, 2016.
- [6] Z. Zhang, Y. Li, and F. Chen, "Adaptive Load Balancing for High-Performance Networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67245–67258, 2021.
- [7] ITU-T Recommendation Y.1541, "Network Performance Objectives for IP-Based Services," International Telecommunication Union, Geneva, 2011.
- [8] M. Pakiding, A. Rahman, and S. Sitorus, "Optimizing PCC Configuration for CPU Efficiency on MikroTik Routers," *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Komputer*, vol. 5, no. 1, 2021.
- [9] A. Yusuf, I. Firmansyah, and R. Santoso, "Evaluasi Kinerja Algoritma Load Balancing PCC pada Jaringan Multi-WAN MikroTik," *Jurnal Teknologi Informasi dan Komunikasi*, vol. 14, no. 3, 2022.
- [10] L. Chen, Q. Liu, and P. Wang, "Modeling CPU Utilization in Network Routing Devices Under Dynamic Load Conditions," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 18, no. 2, pp. 1650–1662, 2021.