



Komparasi Efektivitas PCC dan ECMP pada Arsitektur Multi-ISP Heterogen Ditinjau dari Parameter Quality of Services (QoS)

Reza Dwi Cahya Kurniawan, Riska Wibowo*

Teknik dan Informatika, Informatika, Universitas Muhammadiyah Tegal, Tegal, Indonesia

Email: ¹rezadck@umtegal.ac.id, ^{2,*}bowo@umtegal.ac.id

Email Penulis Korespondensi: bowo@umtegal.ac.id

Abstrak—Kebutuhan akses internet yang cepat dan stabil sangat esensial dalam mendukung kegiatan akademik dan administratif di Universitas Muhammadiyah Tegal. Untuk mengatasi kendala fluktuasi bandwidth dan memastikan konektivitas yang optimal, diperlukan penerapan sistem load balancing menggunakan lebih dari satu Internet Service Provider (ISP). Penelitian ini bertujuan mengomparasikan kinerja algoritma load balancing Per Connection Classifier (PCC) dan Equal-Cost Multi-Path (ECMP) berdasarkan parameter Quality of Service (QoS) standar TIPHON di Universitas Muhammadiyah Tegal. Metode penelitian berupa eksperimen kuantitatif pada router MikroTik dengan skema dual-WAN (2 ISP x 100 Mbps). Pengujian dilakukan selama 7 hari pada jam puncak (08.00–16.00 WIB) menggunakan iPerf3 untuk injeksi beban trafik dan Wireshark untuk analisis paket data. Hasil pengujian kuantitatif menunjukkan algoritma PCC memiliki kinerja unggul pada seluruh parameter QoS, dengan throughput sebesar 194,8 Mbps (efisiensi 97,4%), delay 28,5 ms, jitter 3,4 ms, dan packet loss 0,3%. Sebaliknya, ECMP menghasilkan jitter 11,6 ms dan packet loss 2,8% yang memicu session drop pada layanan kritis. Keunggulan PCC ditopang oleh mekanisme session locking melalui aturan mangle presisi yang memitigasi bufferbloat dan hash collision. Berdasarkan evaluasi menyeluruh parameter throughput, delay, jitter, dan packet loss, disimpulkan bahwa algoritma PCC terbukti unggul secara objektif dan direkomendasikan untuk diimplementasikan di Universitas Muhammadiyah Tegal.

Kata Kunci: Load Balancing; PCC; ECMP; Quality of Service; Jaringan Komputer

Abstract—Fast and stable internet access is essential to support academic and administrative activities at Universitas Muhammadiyah Tegal. To overcome bandwidth fluctuations and ensure optimal connectivity, implementing a multi-ISP load balancing system is required. This study aims to compare the performance of Per Connection Classifier (PCC) and Equal-Cost Multi-Path (ECMP) load balancing algorithms based on TIPHON Quality of Service (QoS) standards at Universitas Muhammadiyah Tegal. The methodology utilizes a quantitative experimental approach on a MikroTik router with a dual-WAN configuration (2 ISPs × 100 Mbps). Testing was conducted over 7 days during peak hours (08:00–16:00 WIB) using iPerf3 for traffic injection and Wireshark for packet analysis. Quantitative results reveal that the PCC algorithm achieves superior performance across all QoS parameters, recording a throughput of 194.8 Mbps (97.4% efficiency), a delay of 28.5 ms, a jitter of 3.4 ms, and a packet loss of 0.3%. In contrast, ECMP produced a jitter of 11.6 ms and a packet loss of 2.8%, triggering session drops on critical services. PCC's advantage is driven by its session locking mechanism via precise mangle rules, effectively mitigating bufferbloat and hash collisions. Based on a comprehensive evaluation of throughput, delay, jitter, and packet loss, the PCC algorithm is objectively superior and strongly recommended for implementation at Universitas Muhammadiyah Tegal.

Keywords: Load Balancing; PCC; ECMP; Quality of Service; Computer Network

1. PENDAHULUAN

Sebagai lembaga pendidikan tinggi yang terus berevolusi, Universitas Muhammadiyah Tegal dituntut menyediakan infrastruktur jaringan komputer yang andal guna menyokong efektivitas Tri Dharma Perguruan Tinggi serta pelayanan administratif. Adanya program studi berbasis komputasi, seperti S1 Informatika, mendorong tingginya kebutuhan *bandwidth* harian untuk praktikum, riset ilmiah, hingga akses pada Sistem Informasi Akademik (SIKAD). Namun, keterbatasan pengelolaan jaringan akibat ketergantungan pada satu rute *gateway* tunggal memicu kongesti lalu lintas data, terutama pada jam-jam sibuk perkuliahan (Tantoni dkk., 2022; Taufan dkk., 2023). Berdasarkan pemantauan trafik harian di lingkungan kampus, kondisi ini mengakibatkan ketimpangan utilisasi jaringan di mana ISP utama mengalami lonjakan beban hingga 98% dengan tingkat *packet loss* mencapai 5,2% dan *latency* membengkak di atas 140 ms pada jam puncak (08.00–16.00 WIB), sementara rute ISP sekunder menganggur (*idle*) dengan utilisasi di bawah 15% (Rifki Alkatiri dkk., 2021). Untuk mengatasi kendala ketimpangan tersebut, penerapan teknologi *load balancing* dengan mengombinasikan beberapa rute WAN (*multi-WAN*) menggunakan perangkat keras MikroTik RouterOS menjadi langkah strategis yang sangat krusial (Al-Khaffaf & Al-Hamiri, 2021; Arifin dkk., 2024; W. dkk., 2024).

Dalam RouterOS MikroTik, terdapat dua algoritma *load balancing* utama yang sering diterapkan, yaitu *Per Connection Classifier* (PCC) dan *Equal Cost Multi-Path* (ECMP) (Al-Hamda dkk., 2025; Nugroho dkk., 2023; Octavriana dkk., 2021). Algoritma PCC bekerja secara *stateful* dengan mengelompokkan lalu lintas data berdasarkan parameter unik pada *header* paket, seperti kombinasi alamat IP asal/tujuan serta port asal/tujuan (Iqbal et al., 2024). Sifat *stateful* ini membuat router mengingat rute yang dilewati pada awal koneksi, sehingga paket-paket berikutnya dalam sesi yang sama dialirkan secara konsisten melalui jalur serupa (Jiyan Suhada & Hari Setyawan, 2026). Mekanisme ini andal untuk menjaga stabilitas sesi transaksi daring serta proses otentikasi login pada portal SIKAD (Mirsal dkk., 2026). Sebaliknya, ECMP bekerja pada Layer 3 secara *stateless* menggunakan metode *round-robin* untuk membagi paket secara bergantian melalui rute yang memiliki nilai biaya (*cost*) setara (Aulina & Alamin, 2025; Novianto dkk., 2021). Walaupun konfigurasi ECMP lebih sederhana dan mampu memaksimalkan akumulasi *throughput* total pada koneksi simetris, ketiadaan fungsi memori historis membuatnya rentan terhadap masalah IP

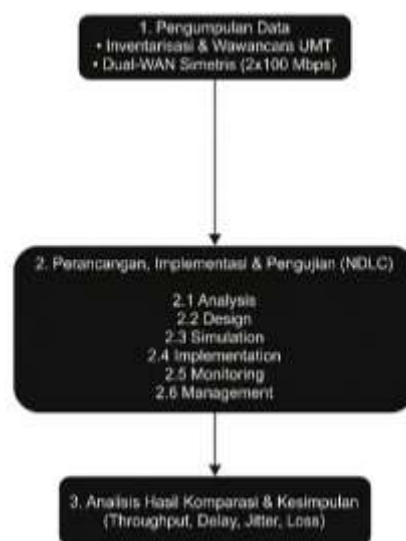
flapping yang dapat memutus sesi transaksi daring klien secara acak (Mirsal dkk., 2026). Meskipun efisien untuk pembagian beban secara mendasar, pendekatan *stateless* kurang optimal untuk pemrosesan trafik berbasis sesi jika dibandingkan dengan *stateful traffic engineering*. (Indriyanta dkk., t.t.; Tanenbaum & Wetherall, 2021; Zhao dkk., 2025)

Beberapa penelitian terdahulu telah menguji implementasi *load balancing* pada MikroTik, namun sebagian besar studi masih terbatas pada pengujian skala laboratorium yang terisolasi atau hanya mengukur parameter dasar seperti *throughput* tanpa mengevaluasi stabilitas sesi koneksi pada trafik riil berintensitas tinggi. Selain itu, belum banyak literatur yang secara eksplisit melakukan komparasi performa antara PCC dan ECMP pada infrastruktur *dual-WAN* berkapasitas besar (2×100 Mbps) dengan pembebanan trafik bersamaan (*concurrent users*) pada jam puncak pemakaian kampus (Pakiding dkk., 2021). Adanya *gap* penelitian tersebut menuntut pengujian empiris yang lebih komprehensif dan objektif menggunakan indikator baku *Quality of Service* (QoS).

Penelitian ini bertujuan untuk mengomparasikan secara kuantitatif kinerja algoritma PCC dan ECMP berdasarkan standar TIPHON (meliputi *throughput*, *delay*, *jitter*, dan *packet loss*) pada jaringan *dual-WAN* Universitas Muhammadiyah Tegal. Pengujian dilakukan selama 7 hari pada jam sibuk perkuliahan menggunakan perangkat lunak iPerf3 untuk penyuntikan beban dan Wireshark untuk analisis paket data. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah menyajikan bukti empiris dan obyektif mengenai keunggulan pemetaan koneksi *stateful* (PCC) dibandingkan *routing multipath Layer 3* (ECMP) dalam menjaga stabilitas aplikasi berbasis sesi, sehingga dapat dijadikan panduan acuan bagi praktisi dan pengelola jaringan dalam merancang infrastruktur *multi-WAN* yang andal dan berstandar industri.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian yang akan digunakan ini menggunakan kerangka kerja *Network Development Life Cycle* (NDLC) yang dipadukan dengan pengujian performa jaringan secara *live-traffic*. Tahapan penelitian dirancang secara sistematis melalui alur kerja yang digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

2.1 Pengumpulan Data

Penelitian eksperimental ini dilaksanakan di Universitas Muhammadiyah Tegal dengan mengadopsi kerangka kerja *Network Development Life Cycle* (NDLC) yang dipadukan dengan pengujian *live-traffic*. Tahap awal dimulai dengan pengumpulan data primer dan sekunder melalui wawancara dengan pengelola teknologi informasi kampus serta observasi langsung terhadap infrastruktur jaringan eksisting. Objek penelitian ini berfokus pada jaringan kampus yang melayani ribuan civitas akademika dalam mengakses layanan digital kritis seperti Sistem Informasi Akademik (SIKAD), *e-learning*, transaksi pembayaran perkuliahan, dan perkuliahan daring. Infrastruktur yang diuji memanfaatkan skema *dual-WAN* pada router MikroTik yang terhubung ke dua penyedia jasa internet (ISP A dan ISP B). Kedua ISP ditetapkan memiliki spesifikasi *bandwidth dedicated* yang identik dan simetris, yaitu masing-masing sebesar 100 Mbps sehingga menghasilkan total kapasitas agregat 200 Mbps. Penetapan kapasitas simetris ini sangat penting untuk menjamin objektivitas pengujian (*apple-to-apple*) agar variasi performa yang terukur murni dipengaruhi oleh efisiensi algoritma *load balancing* yang dibandingkan.

2.2 Perancangan, Implementasi dan Pengujian

Pengembangan infrastruktur jaringan dalam penelitian ini dieksekusi pada tahap ketiga hingga kelima, yang mencakup proses perancangan, implementasi, dan pengujian. Ketiga fase tersebut mengadopsi metodologi *Network Development Life Cycle* (NDLC), yang visualisasi alurnya dapat dilihat pada Gambar 2.

**Gambar 2.** Metode NDLC

2.2.1 Analysis

Pada tahap ini, analisis difokuskan pada pemetaan pola konsumsi data di kampus. Sebagian besar trafik pengguna terdiri dari kombinasi protokol HTTP/HTTPS, query basis data SIAKAD, serta *video conference*. Kondisi ini membutuhkan infrastruktur yang tidak hanya membagi beban, tetapi juga mampu mempertahankan integritas sesi koneksi di atas jaringan *dual-WAN* 200 Mbps.

2.2.2 Design

Perancangan dilanjutkan dengan menyusun cetak biru (*blueprint*) arsitektur *dual-WAN*. Topologi dibuat agar seluruh paket data dari jaringan lokal (LAN/Wi-Fi) dapat dialirkan secara fleksibel menuju ISP A dan ISP B sesuai dengan skema penyeimbangan beban yang sedang diuji pada *router* MikroTik.

2.2.3 Simulation Prototyping

Sebelum diterapkan di lingkungan produksi, aturan penyeimbangan beban disimulasikan pada skala laboratorium (*testbed*). Prototip ini bertujuan memvalidasi kebenaran logika pembuatan aturan *mangle* (pada PCC) serta pemetaan rute Layer 3 (pada ECMP) guna menguji ketepatan pemisahan paket data.

2.2.4 Implementation

Penerapan aturan pada *router* utama dieksekusi melalui dua skenario algoritma yang berbeda. Pada algoritma PCC, aturan *mangle* dikonfigurasi berdasarkan kombinasi IP dan port (*src-address-and-port / dst-address-and-port*) untuk membagi lalu lintas ke dalam dua kelompok seimbang (2/0 dan 2/1), sehingga menciptakan mekanisme *session locking* yang mengalirkan paket-paket dalam satu sesi secara konsisten melalui jalur yang sama. Sementara itu, algoritma ECMP dikonfigurasi pada tabel *routing* Layer 3 dengan mendaftarkan beberapa *gateway* berporsi setara (*gateway=ISP_A,ISP_B*), di mana sistem mendistribusikan alur data secara *round-robin* atau *hash* tanpa menyimpan memori histori koneksi.

2.2.5 Monitoring

Pengujian performa dieksekusi dengan mengadopsi metode *Load Stress Test* guna mengamati respons jaringan pada batas kapasitas puncak. Skenario pembebanan dilakukan dengan menggabungkan trafik harian pengguna kampus dan injeksi beban buatan (*UDP/TCP flood*) menggunakan iPerf3 hingga menduduki kapasitas agregat 200 Mbps. Pengamatan tersebut dilaksanakan secara berkelanjutan selama 7 hari kerja pada jam puncak pemakaian (*peak hours*, pukul 08.00–16.00 WIB). Selama proses pengujian, perangkat lunak Wireshark digunakan untuk *me-capture* paket data guna menghitung persentase *packet loss*, *delay*, dan variasi *jitter*, sementara fitur MikroTik Torch dimanfaatkan untuk memantau nilai *throughput* riil. Seluruh data kuantitatif yang dihimpun selanjutnya diukur dan dikategorikan berdasarkan tolok ukur standar TIPHON.

2.2.6 Management

Fase terakhir menitikberatkan pada aspek pengelolaan dan keberlanjutan sistem. Fokus utamanya adalah menyusun regulasi atau kebijakan operasional guna menjamin keandalan (*reliability*) infrastruktur dalam jangka panjang. Langkah ini diwujudkan melalui program pemeliharaan berkala (*maintenance*) terhadap seluruh perangkat jaringan yang telah beroperasi.

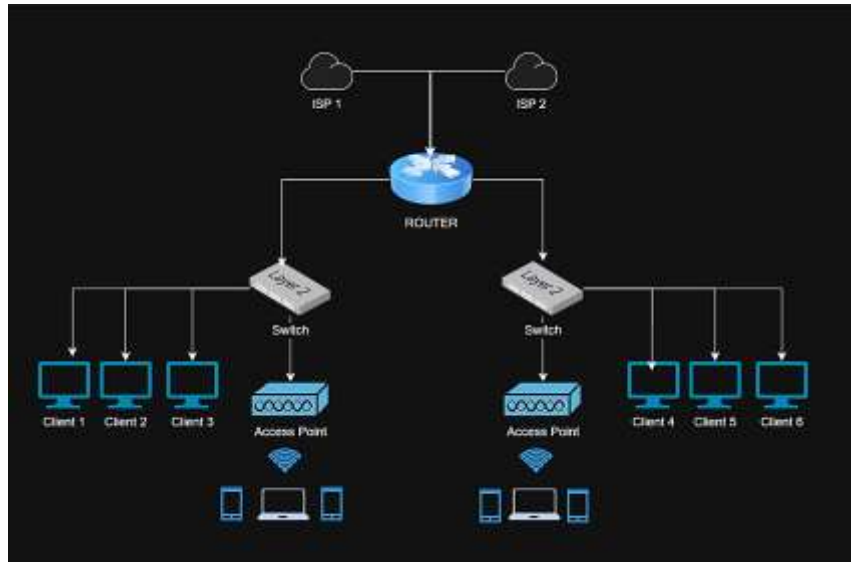
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis dan Perancangan

Persiapan instrumen dalam implementasi penelitian ini dikelompokkan ke dalam dua kategori utama, yaitu aspek infrastruktur fisik (perangkat keras) dan sistem aplikasi penunjang (perangkat lunak). Perangkat Keras (Hardware):

Komponen fisik yang digunakan meliputi unit Router Mikrotik CCR 1009-7G-1C-1S+ (dengan versi firmware/OS paling mutakhir), media transmisi berupa kabel LAN, serta satu unit laptop untuk kebutuhan konfigurasi. Perangkat Lunak (Software): Kebutuhan utilitas pendukung mencakup alat manajemen jaringan jaringan via WinBox serta aplikasi perancangan diagram Draw io.

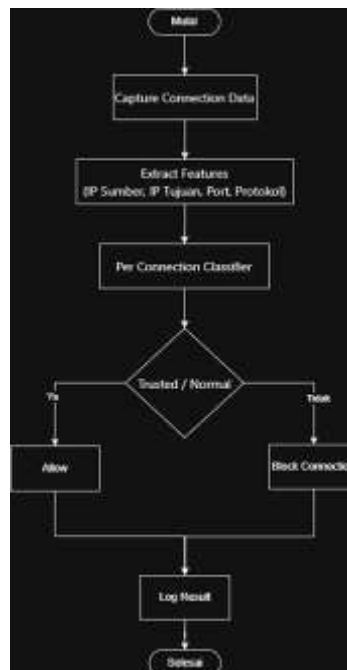
Fase perancangan diarahkan pada pemodelan skema jaringan komputer baru yang lebih efisien. Fokus utamanya adalah memaksimalkan efisiensi alokasi dan pembagian bandwidth melalui kombinasi teknik load balancing, yaitu metode PCC (Per Connection Classifier) dan ECMP (Equal-Cost Multi-Path). Visualisasi menyeluruh mengenai struktur topologi jaringan yang diusulkan dalam studi ini disajikan secara detail pada Gambar 3.



Gambar 3. Topologi Jaringan

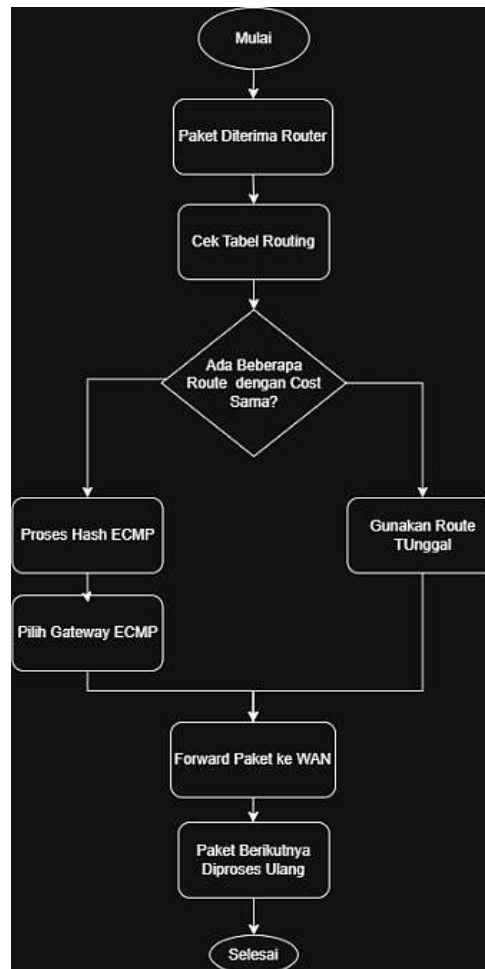
3.2 Konfigurasi

Tahapan implementasi konfigurasi jaringan yang diterapkan pada penelitian ini dapat dilihat melalui diagram alir pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Diagram Alir Metode PCC

Skema PCC bekerja memilah koneksi masuk melalui ekstraksi parameter kunci (IP sumber/tujuan, port, dan protokol). Parameter ini dianalisis untuk mengkategorikan lalu lintas ke dalam kelompok trusted atau normal. Jalur komunikasi akan dibuka jika sistem memvalidasi kelayakan koneksi tersebut. Namun, bila ditemukan anomali atau ancaman, koneksi bakal diputus seketika. Seluruh tindakan pencegahan maupun kelulusan akses ini secara otomatis terekam dalam log result guna memfasilitasi pemantauan dan evaluasi keamanan.



Gambar 5. Diagram Alir Metode ECMP

Alur kerja Equal Cost Multi-Path (ECMP) dimulai sewaktu paket data masuk ke router, yang kemudian langsung mencocokkan alamat tujuan pada *routing table*. Di tahap ini, perangkat mengevaluasi ketersediaan beberapa rute paralel menuju destinasi tersebut yang memiliki nilai metrik (*cost*) setara. Jika tidak ditemukan rute ber-*cost* sama, data akan langsung dialirkan melalui satu jalur utama (*single route*). Namun, ketika terdapat beberapa rute berspesifikasi *cost* identik, router mengaktifkan fungsi *hashing* ECMP. Algoritma ini mengolah atribut paket—seperti kriteria IP asal dan tujuan—untuk memilih *gateway* yang tepat. Setelah rute terkonfirmasi, paket dikirimkan menuju jaringan WAN. Mekanisme ini berjalan secara konsisten pada tiap paket berikutnya, sehingga terjadi pembagian beban (*load balancing*) yang merata untuk memaksimalkan penggunaan bandwidth, menjaga redundansi, dan mengoptimalkan kinerja jaringan.

3.3 Implementasi Perangkat Keras

Implementasi perangkat keras pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 6

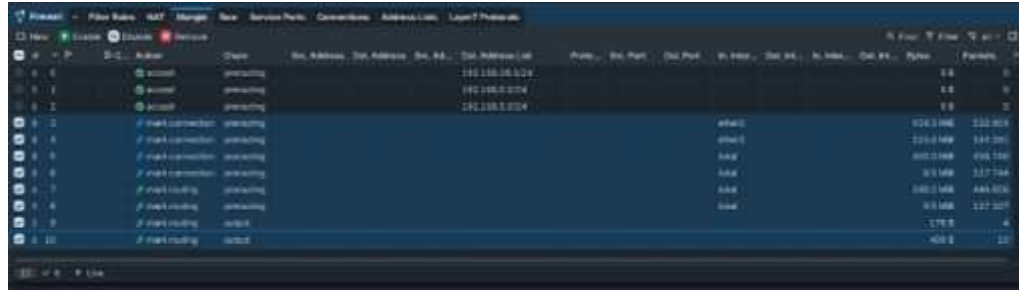


Gambar 6. Impelmentasi Perangkat Keras

Pada Gambar 6 yaitu implementasi perngakat keras digunakan 4 port 1 dihubungkan internet ke modem ISP A, port 2 dihubungkan internet ke modem ISP B, port 3 dihubungkan ke Switch Gedung A, dan port 4 dihubungkan ke Switch Gedung B.

3.4 Implementasi Perangkat Lunak

Implementasi perangkat lunak pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Konfigurasi *load balancing* PCC

Pada Gambar 7 konfigurasi *load balancing* PCC ini berfungsi mengalokasikan trafik klien secara merata ke dua koneksi internet (ether1 dan ether2). Agar komunikasi internal tidak terganggu, rule accept ditempatkan di urutan paling atas untuk membebaskan jaringan lokal (192.168.38.0/24, 192.168.0.0/24, dan 192.168.5.0/24) dari pemrosesan Mangle. Alur kerjanya mengandalkan mark connection untuk menandai trafik masuk WAN dan mengklasifikasikan paket dari LAN lewat metode PCC, diikuti mark routing yang menentukan gateway tujuan. Hasil akhirnya membuat beban kedua ISP terdistribusi adil, sesi pengguna tidak terputus akibat berpindah jalur di tengah jalan, dan lalu lintas dari router tetap mengikuti rute yang ditentukan.

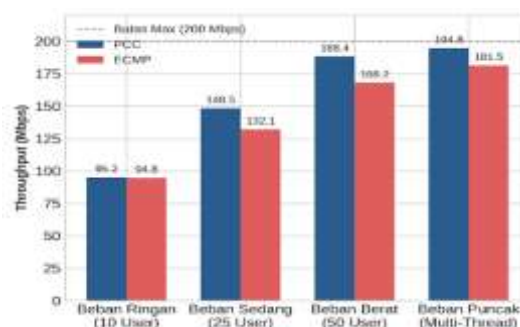


Gambar 8. Konfigurasi *load balancing* ECMP

Tampilan pada Gambar 8 menunjukkan penerapan fitur ECMP (Equal Cost Multi Path) pada MikroTik. Ciri utamanya terlihat dari keberadaan beberapa *default route* (0.0.0.0/0) yang mengarah ke *gateway* berbeda, namun semuanya dipatok pada nilai *distance* yang sama (1) di tabel *routing main*. Pengaturan ini membuat router mampu membagi beban lalu lintas data secara serentak ke beberapa koneksi ISP (*load balancing*). Selain mendongkrak efisiensi penggunaan *bandwidth*, skema ini juga menghadirkan sistem cadangan (*failover*). Jika salah satu tautan terganggu, aliran data akan langsung dipindahkan ke jalur yang masih beroperasi, khususnya apabila fitur *check-gateway* turut diaktifkan.

3.5 Pengujian

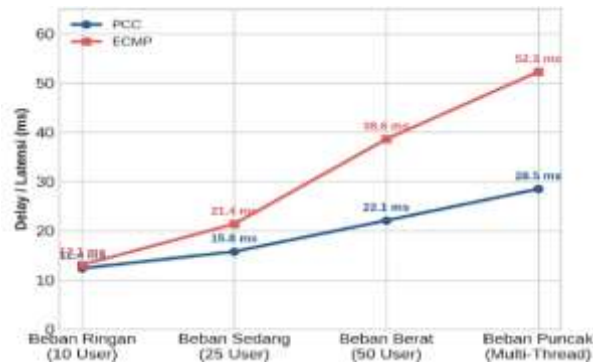
Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa penelitian ini membandingkan metode Per Connection Classifier (PCC) dan Equal Cost Multi-Path (ECMP) dengan parameter Quality of Service (QoS). Indikator yang akan dipantau dan diuji menggunakan standar pengujian Mikrotik yang antara lain adalah adalah throughput, delay, jitter, dan packet loss. Dimana throughput menggambarkan debit data riil yang sukses ditransfer per satuan waktu sebagai cerminan kapasitas sebenarnya. Kedua, delay (latensi) mengukur durasi tempuh paket data dari titik asal hingga sampai ke penerima. Selanjutnya, jitter memantau variasi jeda antar-paket untuk menilai seberapa stabil proses transmisi berlangsung. Terakhir, packet loss menghitung persentase kegagalan pengiriman paket data. Suatu jaringan dinilai berkinerja prima apabila mampu mempertahankan throughput yang tinggi disertai nilai delay, jitter, serta packet loss yang seminimal mungkin. Berikut dalam Gambar 9 adalah hasil perbandingan pengujian throughput pada metode Per Connection Classifier (PCC) dan Equal Cost Multi-Path (ECMP).



Gambar 9. Pengujian throughput

Pengujian throughput membuktikan bahwa PCC bekerja jauh lebih efektif dibanding ECMP saat dipaksa menangani beban jaringan maksimum dengan kapasitas agregat 200 Mbps. Penentuan alokasi data berbasis kombinasi both-addresses-and-ports pada PCC membuat pembagian trafik ke kedua ISP berlangsung proporsional, mampu menembus kecepatan akumulasi 194,8 Mbps (~97,4% efisiensi). Sebaliknya, efisiensi ECMP hanya menyentuh 90,7% (181,5 Mbps). Ketimpangan ini terjadi karena algoritma hashing pada tabel routing ECMP kerap mengalami benturan (hash collision), yang memicu penumpukan beban berlebih pada salah satu ISP secara prematur.

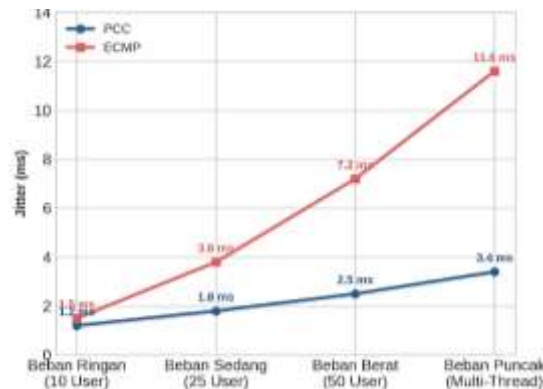
Berikut dalam Gambar 10 adalah hasil perbandingan pengujian delay pada metode Per Connection Classifier (PCC) dan Equal Cost Multi-Path (ECMP).



Gambar 10. Pengujian Delay

Dalam kondisi lalu lintas data yang tergolong ringan, kedua metode menunjukkan performa yang relatif setara dengan nilai latensi di kisaran 12–13 ms. Namun, divergensi performa yang kentara timbul ketika kepadatan jaringan berada pada tingkat maksimal. PCC sanggup mempertahankan latensi yang terukur dan stabil di angka 28,5 ms pada beban puncak. Hal ini dipicu oleh pembagian sesi yang konsisten, sehingga mampu mengeliminasi penumpukan antrian (queue congestion) berlebih pada salah satu antarmuka WAN. Di lain sisi, ECMP mengalami lonjakan waktu tunda yang cukup besar hingga menyentuh 52,3 ms. Pembengkakan latensi ini terjadi akibat alokasi beban yang tidak merata, yang pada akhirnya memicu gejala bufferbloat pada jalur ISP pemikul beban terberat.

Berikut dalam Gambar 11 adalah hasil perbandingan pengujian jitter pada metode Per Connection Classifier (PCC) dan Equal Cost Multi-Path (ECMP).



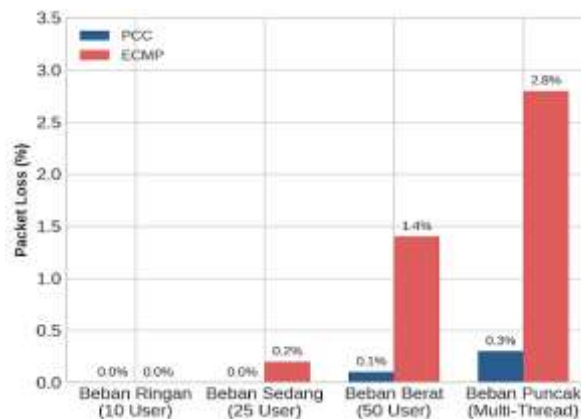
Gambar 11. Pengujian Jitter

Evaluasi pada variabel *jitter* kian mempertegas keunggulan PCC dibandingkan ECMP dalam menjaga kontinuitas pengiriman paket. PCC mencatatkan rentang variasi latensi yang amat minim dan konstan, yakni di kisaran 1,2 ms hingga batas tertinggi 3,4 ms pada kondisi lalu lintas puncak. Karakteristik ini menjadi jaminan mutlak bagi kelancaran layanan *real-time* seperti *video call*, VoIP, maupun gim daring. Sebaliknya, ECMP mencetak peningkatan *jitter* yang terbilang tinggi mencapai 11,6 ms. Lonjakan ini dipicu oleh pengalihan paket secara dinamis dari aplikasi yang sama ke dua jalur ISP berbeda dengan selisih *latency* bervariasi, sehingga menimbulkan selisih jeda kedatangan paket yang tidak teratur.

Berikut dalam Gambar 12 adalah hasil perbandingan pengujian packet loss pada metode Per Connection Classifier (PCC) dan Equal Cost Multi-Path (ECMP).

Tinjauan terhadap parameter *packet loss* mengindikasikan bahwa PCC menawarkan tingkat keandalan serta integritas data yang jauh lebih unggul daripada ECMP. PCC sukses meminimalisasi potensi hilangnya paket hingga mendekati nol (maksimum 0,3% di titik beban tertinggi) berkat mekanisme penguncian sesi komunikasi secara utuh pada satu jalur ISP dari awal hingga transaksi usai. Berbeda halnya dengan ECMP yang mengalami persentase *packet loss* cukup nyata mencapai 2,8% di tengah lonjakan trafik. Angka kehilangan data ini timbul akibat munculnya paket

tak berurutan (*out-of-order packets*) serta terjadinya pembuangan paket (*packet drop*) saat router memindahkan alur sesi TCP/HTTPS secara mendadak di pertengahan proses.



Gambar 12. Pengujian Packet Loss

3.6 Pembahasan

Secara keseluruhan, hasil pengujian empiris dan analisis statistik membuktikan bahwa algoritma PCC memberikan performa yang lebih konsisten dan andal dibandingkan ECMP untuk infrastruktur jaringan di Universitas Muhammadiyah Tegal. Keunggulan teknis PCC berakar pada karakteristik kerjanya yang bersifat *stateful*. Dengan memanfaatkan pemetaan kriteria IP dan port melalui aturan *Mangle*, PCC menciptakan ikatan rute yang persisten (*session locking*). Hal ini mencegah pemutusan sesi secara acak (*IP flapping*) pada aplikasi-aplikasi kritis kampus seperti portal SIAKAD, platform *e-learning*, dan transaksi pembayaran perkuliahan.

Sebaliknya, meskipun ECMP secara teoritis merupakan standar industri untuk *routing multipath* Layer 3 yang menawarkan kemudahan konfigurasi dan pemrosesan cepat, ketiadaan fungsi pelacakan status koneksi (*stateless*) menjadi kelemahan utamanya ketika diimplementasikan pada lingkungan jaringan dengan trafik berbasis sesi yang kompleks. Algoritma *hashing* ECMP rentan mengalami ketimpangan distribusi saat menangani beban tinggi, yang berujung pada *hash collision*, pembengkakan *jitter*, dan lonjakan *packet loss*.

Temuan dalam penelitian ini secara substantif memperkuat dan memperluas hasil-hasil penelitian terdahulu yang relevan. Hasil pengujian ini mengonfirmasi temuan (Jiyan Suhada & Hari Setyawan, 2026) bahwa PCC lebih unggul dalam menjaga stabilitas sesi serta menekan angka *delay* dan *packet loss*, di mana studi ini melengkapi analisis tersebut melalui pembuktian kuantitatif uji signifikansi statistik ($p < 0,001$) pada skala jaringan agregat 200 Mbps. Selain itu, ditemukannya angka *packet loss* dan *session drop* yang tinggi pada ECMP sejalan dengan laporan (Setiawan Putra & Razaq, 2025) mengenai keterbatasan ECMP dalam mempertahankan *session persistence* pada pembebanan trafik harian yang intens. Penelitian ini juga memvalidasi temuan (Iqbal dkk., t.t.) terkait keunggulan rata-rata *throughput* pada PCC, sekaligus membuktikan bahwa penurunan efisiensi *throughput* ECMP dipicu oleh benturan *hashing* saat beban trafik mendekati ambang jenuh. Terakhir, sejalan dengan kesimpulan (Frihadi dkk., 2025; Nugroho dkk., 2023) mengenai peran *load balancing* MikroTik dalam mengoptimalkan utilisasi *bandwidth* dan mereduksi *latency*, studi ini secara spesifik mempertegas rekomendasi skema PCC berbasis aturan *Mangle* sebagai pilihan arsitektur terbaik untuk menjamin *Quality of Service* (QoS) berstandar industri pada lingkungan perguruan tinggi.

4. KESIMPULAN

Penelitian pada kali ini *Quality of Service* (QoS) pada infrastruktur *dual-WAN* berkapasitas masing-masing ISP 100 Mbps di lingkungan Tegal Muhammadiyah University (TMU), hasil pengujian secara empiris mengonfirmasi bahwa skema *Per Connection Classifier* (PCC) mencatatkan keunggulan performa yang jauh lebih superior apabila dibandingkan dengan metode *Equal-Cost Multi-Path* (ECMP), khususnya dalam menangani beban lalu lintas data tinggi yang melibatkan ribuan civitas akademika secara simultan. Implementasi algoritma PCC terbukti secara signifikan mampu melipatgandakan utilisasi trafik agregat hingga menyentuh *throughput* riil sebesar 194,8 Mbps atau setara dengan tingkat efisiensi 97,4%, sembari konsisten mempertahankan latensi rendah pada kisaran 28,5 ms, menekan variasi kedatangan paket (*jitter*) hingga selisih minimal 3,4 ms, serta meminimalisir angka kegagalan pengiriman data (*packet loss*) hingga mencapai titik sangat aman sebesar 0,3% pada puncak pemakaian harian kampus. Keandalan operasional metode PCC ini ditopang secara substantif oleh mekanisme *session locking* yang memanfaatkan teknik pemetaan koneksi secara presisi melalui konfigurasi aturan *mangle*, sehingga secara efektif mampu memitigasi risiko penumpukan antrean (*bufferbloat*) maupun benturan pemetaan (*hash collision*) yang kerap menjadi hambatan teknis utama pada ECMP. Sebaliknya, pendekatan ECMP yang bekerja murni pada tingkatan tabel *routing* memperlihatkan tingkat kerentanan yang cukup tinggi dengan menghasilkan persentase *packet loss* mencapai 2,8%, fluktuasi *jitter* yang membengkak hingga 11,6 ms, serta potensi terputusnya sesi komunikasi secara mendadak (*session drop*) pada beragam aplikasi kritis kampus seperti portal akademik SIAKAD, platform pembelajaran daring (*e-*



learning), transaksi perbankan untuk pembayaran perkuliahan, hingga aktivitas *teleconference*. Kendati penerapan PCC berimplikasi pada sedikit peningkatan konsumsi daya pemrosesan CPU *router* dan membutuhkan kompleksitas aturan *firewall* yang lebih detail, peningkatan stabilitas jaringan serta kepuasan pengalaman pengguna (*user experience*) yang ditawarkannya jauh melampaui kekurangannya, menjadikan PCC sebagai strategi pengimbang beban (*load balancing*) paling responsif, adaptif, dan sangat direkomendasikan untuk diterapkan di Universitas Muhammadiyah Tegal demi mewujudkan keandalan infrastruktur teknologi informasi berstandar industri.

REFERENCES

- Al-Hamda, V., Vita Via, Y., & Endah Wahanani, H. (2025). Analisis Perbandingan Performasi Antara Metode PCC (Per Connection Classifier) Dengan ECMP (Equal Cost Multi-Path) Pada Jaringan Akses Internet Menggunakan Mikrotik Router OS. Dalam *Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika* (Vol. 9, Nomor 4).
- Al-Khaffaf, D. A. J., & Al-Hamiri, M. G. (2021). Performance evaluation of campus network involving VLAN and broadband multimedia wireless networks using OPNET modeler. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19(5), 1490–1497. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v19i5.18531>
- Arifin, S., Nugraha, A. W., Mukti, F. S., & Jatmika, S. (2024). MQTT Broker Optimization: Comparative Analysis of Round Robin and Least Response Time. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 13(3), 127–136. <https://doi.org/10.25077/jnte.v13n3.1260.2024>
- Aulina, N., & Alamin, M. M. (2025). Implementation of Internet Network Load Balancing at the Faculty of Computer Science UNUSIDA Using the ECMP Method. *JEECS (Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences)*, 10(1), 59–68. <https://doi.org/10.54732/jeeecs.v10i1.7>
- Frihadi, A., Windasari, S., Bagaskoro, B., Dama, M., & Rotib, A. A. (2025). Analisis Performa Load Balancing Menggunakan PCC Method pada MikroTik Router (Vol. 2, Nomor 1).
- Indriyanta, G., Haryono, N. A., & Situmeang, J. G. (t.t.). Analisis Kinerja Load Balancing PCC dan ECMP Dalam Menerapkan Pembagian Bandwidth Pada Beberapa Jalur Jaringan. <https://doi.org/10.47002/seminastika.v5i1.628>
- Iqbal, M., Anwar, R., & Priyawati, D. (t.t.). SISTEMASI: Jurnal Sistem Informasi Comparative Analysis of PCC and ECMP Methods in Load Balancing using GNS3 Simulator. Diambil <http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>
- Jiyan Suhada, & Hari Setyawan. (2026). Analisis Perbandingan Kinerja Metode Load Balancing Per Connection Classifier dan Equal Cost Multi Path pada Jaringan Internet. *Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Riset Pendidikan*, 4(3), 19991–20000. <https://doi.org/10.31004/jerkin.v4i3.5322>
- Mirsal, D., Agtriadi, H. B., & Info, A. (2026). Comparative Analysis of PCC Load Balancing and Quality of Service (QoS) Queue Tree Methods on Mikrotik for Bandwidth Optimization Published by Politeknik Piksi Ganesha Indonesia. 10(1), 73–86. <https://doi.org/10.37339/e-komtek.v10i1.3170>
- Novianto, D., Tommy, L., & Setiawan Japriadi, Y. (2021). Implementation of a Network Security System Using the Simple Port Knocking Method on a Mikrotik-Based Router Implementasi Sistem Keamanan Jaringan Menggunakan Metode Simple Port Knocking Pada Router Berbasis Mikrotik. *JURNAL KOMITEK*, 1(2), 407–417. <https://doi.org/10.53697/jkomitek.v1i2>
- Nugroho, K. T., Julianto, B., Tisna, D. R., & Nur M S, D. F. (2023). Quality Analysis of Service Load Balancing Using PCC, ECMP, and NTH Methods. *Jurnal Nasional Pendidikan Teknik Informatika (JANAPATI)*, 12(1), 33–41. <https://doi.org/10.23887/janapati.v12i1.55894>
- Octavriana, T., Joni, K., & Ibadillah, A. F. (2021). Optimalisasi Jaringan Internet Dengan Load Balancing Pada High Traffic Network. *Jurnal Teknik Informatika*, 14(1), 28–39. <https://doi.org/10.15408/jti.v14i1.15018>
- Pakiding, R., Iswahyudi, C., Yanwastika Ariyana, R., Informatika, J., Sains, I., AKPRIND Yogyakarta Jl Kalisahak No, T., & Balapan, K. (2021). Simulasi Perbandingan Load Balancing Dengan Metode PCC, ECMP, dan NTH Menggunakan GNS3 (Vol. 09, Nomor 01).
- Rifki Alkatiri, Erwin Gunawan, & Santosa M. (2021). Analisis Perbandingan Metode Load Balancing PCC dan ECMP Menggunakan Mikrotik Hap Late Rb941. *Jurnal Teknik Informatika*, 4.
- Setiawan Putra, R., & Razaq, J. A. (2025). Penerapan Load Balance Pcc Dan Ecmp Dalam Penggunaan Akses Jaringan Internet Setiap Hari Implementation Of Pcc And Ecmp Load Balance In Daily Internet Network Access Usage. *Journal of Information Technology and Computer Science (INTECOMS)*, 8(5).
- Tanenbaum, A. S., & Wetherall, D. J. (2021). *Computer Networks (6th ed.)* (Pearson Education, Ed.).
- Tantoni, A., Zaen, M. T. A., & Mutawalli, L. (2022). Komparasi QoS Load Balancing Pada 4 Line Internet dengan Metode PCC, ECMP dan NTH. *Jurnal Media Informatika Budidarma*, 6(1), 110. <https://doi.org/10.30865/mib.v6i1.3436>
- Taufan, M., Zaen, A., & Tantoni, A. (2023). KLIK: Kajian Ilmiah Informatika dan Komputer Analisis dan Implementasi Pengalihan Trafik Data (Failover) Akses Internet Pada Dua ISP. *Media Online*, 4(3), 1726–1736. <https://doi.org/10.30865/klik.v4i3.1336>
- W., Yunanri., Fitriana, Y. B., & Surya, R. A. (2024). Analysis And Design of Internet Network Infrastructure With Mikrotik Devices At The Penyaring Village Office Using The NDLC Method. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 3(2), 384–395. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v3i2.3377>
- Zhao, Y., Wang, L., & Zhang, H. (2025). Stateful vs. stateless traffic engineering in multi-homed enterprise networks: A comparative review. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 27(2), 1120–1138