

## Penerapan dan Evaluasi Kinerja Load Balancing Dan Failover PCC 3-Stream Versus ECMP Pada MikroTik RB450Gx4 Dual-ISP

Indra Paripurna Rakhim<sup>\*1</sup>, Gempa Hendratna<sup>2</sup>, Yakub<sup>3</sup>

<sup>\*1,3</sup>Komputerisasi Akuntansi, STMIK Al Muslim, Bekasi

<sup>\*2</sup>Manajemen Informatika, STMIK Al Muslim, Bekasi

e-mail: <sup>\*1</sup>indra.rakhim@almuslim.ac.id, gempa.hendratna@almuslim.ac.id, yakub.muhammad@almuslim.ac.id

---

### Abstrak

Penelitian ini membandingkan dua metode load balancing—Per-Connection Classifier (PCC) dengan skema 3-stream dan Equal-Cost Multi-Path (ECMP)—pada router MikroTik RB450Gx4 dalam konfigurasi dual-ISP (ISP-1 20 Mbps dedicated; ISP-2 up to 50 Mbps). Pengujian dilakukan dalam empat kondisi jaringan: normal, degradasi pada ISP-2, pemutusan total ISP-2, dan flapping. Setiap skenario diuji minimal 30 kali untuk memastikan konsistensi hasil. Lalu lintas uji disimulasikan melalui empat klien yang secara bersamaan mengunduh file 600 MB dan melakukan streaming video 720p, merepresentasikan beban jaringan riil. Parameter yang dianalisis meliputi throughput TCP, delay/RTT, jitter, packet loss, distribusi beban (load share), waktu pemulihan (failover), dan penggunaan CPU. Hasil menunjukkan bahwa pada kondisi normal, PCC menghasilkan throughput unduhan 59,9 Mbps dengan jitter 4,6 ms, sedikit lebih baik dari ECMP (58,7 Mbps; 7,9 ms jitter). Saat ISP-2 mengalami degradasi (penambahan latensi 80 ms dan packet loss 1%), PCC tetap menjaga kualitas layanan dengan jitter 9,8 ms dan loss 0,90%, lebih stabil dibanding ECMP (14,6 ms; 1,40%). Dalam skenario pemutusan total ISP-2, PCC pulih lebih cepat (0,9 detik) dibanding ECMP (1,1 detik). Rasio distribusi lalu lintas PCC 28%:72% (ISP-1:ISP-2) konsisten dengan desain 3-stream (1:2). Temuan ini menunjukkan bahwa PCC lebih andal untuk aplikasi sensitif waktu nyata seperti VoIP dan video conference, sementara ECMP masih memadai untuk lalu lintas besar seperti unduhan file.

### Abstract

This study compares two load balancing schemes—Per-Connection Classifier (PCC) with a 3-stream configuration and Equal-Cost Multi-Path (ECMP)—on a MikroTik RB450Gx4 router deployed in a dual-ISP architecture (ISP-1 with 20 Mbps dedicated bandwidth; ISP-2 offering up to 50 Mbps). Experiments were conducted under four network conditions: normal operation, ISP-2 degradation, total ISP-2 outage, and link flapping. Each scenario was tested with at least 30 repetitions to ensure result consistency. Traffic simulation involved four clients simultaneously downloading 600 MB files and streaming 720p video, replicating realistic usage patterns. Performance metrics included TCP throughput, delay/RTT, jitter, packet loss, load share distribution, failover recovery time, and CPU utilization. Under normal conditions, PCC achieved 59.9 Mbps download throughput with 4.6 ms jitter, outperforming ECMP at 58.7 Mbps and 7.9 ms jitter. During ISP-2 degradation (additional 80 ms latency and 1% packet loss), PCC maintained better quality of service (9.8 ms jitter; 0.90% loss) compared to ECMP (14.6 ms jitter; 1.40% loss). In total ISP-2 failure, PCC demonstrated faster recovery (0.9 seconds) than ECMP (1.1 seconds). Load share analysis revealed PCC's traffic split at 28%:72% (ISP-1:ISP-2), consistent with its 3-stream configuration (1:2 ratio). These findings suggest that PCC is better suited for real-time or jitter-sensitive applications such as VoIP and video conferencing, while ECMP remains sufficient for bulk data transfers.

---

### Article Info

#### Kata Kunci:

load balancing, PCC, ECMP, QoS, dual ISP, failover

#### Keywords:

load balancing, PCC, ECMP, quality of service, dual ISP, failover

## I. PENDAHULUAN

Konektivitas internet yang andal merupakan infrastruktur yang sangat penting dalam mendukung berbagai sektor, termasuk lembaga pendidikan, perkantoran, layanan publik, serta organisasi bisnis. Gangguan akses internet tidak hanya berdampak pada penurunan produktivitas, tetapi juga dapat menghambat proses operasional harian, pelayanan terhadap pelanggan, dan sistem informasi internal. Untuk meningkatkan ketersediaan jaringan dan mengurangi risiko gangguan, banyak organisasi menerapkan strategi penggunaan dua penyedia layanan internet atau dual Internet Service Provider (dual-ISP).

Meskipun pendekatan dual-ISP dapat memperkuat kapasitas dan ketahanan sistem, pelaksanaannya sering kali menghadapi tantangan teknis, khususnya ketika karakteristik layanan dari kedua ISP tidak seimbang. Sebagai contoh, satu penyedia dapat menawarkan layanan dengan bandwidth tetap (dedicated), sedangkan yang lainnya menyediakan bandwidth berbasis kapasitas maksimum (up to) dan menerapkan kebijakan pemakaian wajar atau Fair Usage Policy (FUP). Ketidakseimbangan ini dapat menyebabkan fluktuasi pada kecepatan unduhan maupun unggahan serta menurunkan stabilitas kualitas layanan jaringan. Gejala umum yang muncul antara lain peningkatan latensi, jitter, serta kehilangan paket data.

Untuk menjaga kinerja jaringan dalam kondisi tersebut, administrator jaringan biasanya mengimplementasikan mekanisme penyeimbangan beban atau load balancing yang dilengkapi dengan sistem failover otomatis. Sistem ini memungkinkan lalu lintas jaringan berpindah secara dinamis ke jalur alternatif yang masih aktif apabila salah satu koneksi ISP mengalami gangguan. Pendekatan semacam ini juga direkomendasikan oleh berbagai produsen perangkat jaringan, yang menyarankan penggunaan recursive routing dan pemeriksaan kesehatan gateway atau health check sebagai bagian dari desain jalur ganda yang andal.

Dalam ekosistem MikroTik, terdapat dua metode load balancing yang umum digunakan, yaitu Per-Connection Classifier (PCC) dan Equal-Cost Multi-Path (ECMP). Metode PCC melakukan hash terhadap informasi header paket, seperti alamat IP dan port sumber maupun tujuan, kemudian mengarahkan koneksi tersebut ke jalur tertentu. Keunggulan utama PCC terletak pada kemampuannya mempertahankan kestabilan sesi koneksi (session-sticky) serta mendukung pembobotan trafik sesuai kebutuhan. Hal ini memungkinkan administrator jaringan untuk mengatur distribusi beban berdasarkan kapasitas masing-masing ISP, seperti menggunakan konfigurasi tiga jalur (3-stream) untuk membagi trafik dengan rasio satu banding dua. Sebaliknya, ECMP bekerja pada lapisan routing dengan menyebarkan paket secara merata ke beberapa jalur yang memiliki biaya (cost) yang sama. Metode ini bersifat nonberbobot dan lebih sesuai diterapkan pada konfigurasi jaringan dengan kapasitas yang simetris.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa PCC dan ECMP memiliki keunggulan masing-masing. Metode PCC cenderung memberikan performa yang lebih stabil dalam hal jitter dan throughput unduhan, sedangkan ECMP menunjukkan keunggulan dalam proses unggahan dan kecepatan pemulihan saat terjadi gangguan pada salah satu jalur. Namun, hasil penelitian tersebut sangat bergantung pada jenis perangkat keras yang digunakan, topologi jaringan, serta metode pengujian yang beragam.

Sayangnya, aspek seperti waktu pemulihan setelah gangguan (failover time) dan jumlah paket yang hilang selama proses transisi masih jarang dievaluasi secara menyeluruh. Hal ini terutama berlaku pada perangkat kelas menengah seperti MikroTik RB450Gx4 yang banyak digunakan oleh sektor usaha kecil dan menengah, lembaga pendidikan, maupun perkantoran. Selain itu, belum banyak studi yang secara eksplisit menguji konfigurasi jaringan dengan kapasitas ISP yang tidak seimbang, padahal situasi ini sangat umum ditemukan di lapangan.

## Tujuan dan Kontribusi Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan evaluasi komparatif terhadap metode PCC (konfigurasi 3-stream) dan ECMP pada perangkat MikroTik RB450Gx4 dengan sistem operasi RouterOS versi 6.49.19. Pengujian dilakukan dalam lingkungan jaringan nyata yang menggunakan dua ISP dengan karakteristik berbeda, yaitu ISP pertama berkapasitas 20 Mbps (dedicated) dan ISP kedua hingga 50 Mbps (berbasis up to).

Adapun kontribusi utama penelitian ini meliputi:

- I. Perancangan eksperimen replikatif pada empat skenario jaringan yang umum dijumpai, yaitu kondisi normal, degradasi layanan, pemutusan total koneksi, dan fluktuasi jalur (flapping);
- II. Evaluasi menyeluruh berdasarkan indikator kinerja dan ketahanan sistem yang mencakup throughput TCP, waktu tunda (delay atau RTT), jitter, kehilangan paket, distribusi beban (load share), waktu pemulihan koneksi, serta penggunaan sumber daya CPU;
- III. Penyusunan template konfigurasi yang dapat diterapkan langsung oleh praktisi jaringan, mencakup skema PCC 3-stream, ECMP, dan pemeriksaan kesehatan gateway berbasis recursive routing sesuai dengan rekomendasi dari vendor.

Dengan pendekatan eksperimental yang berbasis pada kondisi nyata dan hasil yang aplikatif, artikel ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang tidak hanya relevan dalam konteks akademik, tetapi juga bernilai praktis bagi berbagai organisasi yang bergantung pada konektivitas multi-ISP dalam mendukung operasional harian mereka.

## II. METODE PENELITIAN

### a. Desain Eksperimen dan Pendekatan

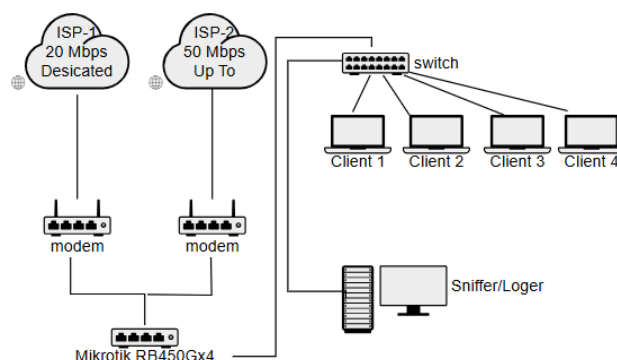
Penelitian ini mengadopsi pendekatan kuantitatif eksperimental dengan rancangan pengukuran berulang (repeated-measures) dalam kerangka within-subject design. Dua metode load balancing yang dievaluasi, yaitu Per-Connection Classifier (PCC) 3-stream dan Equal-Cost Multi-Path (ECMP), diterapkan secara bergantian pada

konfigurasi perangkat keras, topologi jaringan, serta pola lalu lintas yang identik. Pendekatan ini dirancang untuk mengendalikan variabel perancu, memungkinkan perbandingan langsung antar metode dalam kondisi yang setara.

Setiap skenario dieksekusi dengan jumlah ulangan minimal 30 kali, menggunakan counterbalanced sequence untuk menghindari efek urutan (order bias). Strategi ini dipilih guna meningkatkan validitas internal dan memperoleh varian antarulang (run-to-run variability) yang terukur secara statistik.

### b. Perangkat Uji dan Lingkungan Eksperimen

Eksperimen dijalankan pada router MikroTik RB450Gx4, yang dilengkapi dengan prosesor quad-core 716 MHz, RAM 1 GB, dan lima port Gigabit Ethernet, menggunakan sistem operasi RouterOS versi 6.49.19. Uplink terdiri atas dua jalur independen, yaitu ISP-1 dengan bandwidth 20 Mbps (dedicated) dan ISP-2 dengan bandwidth hingga 50 Mbps (berbasis up to), mewakili skenario real-world dengan asimetri kapasitas.



Gambar 1. Topologi Pengujian

Empat komputer klien digunakan untuk menghasilkan beban lalu lintas aplikasi, sedangkan satu komputer tambahan berfungsi sebagai sniffer independen dan collector log sistematis. Seluruh perangkat disinkronkan melalui Network Time Protocol (NTP) untuk menjaga konsistensi penanda waktu (timestamp) dalam akuisisi data dan korelasi lintas-perangkat. Spesifikasi teknis mengacu langsung pada dokumentasi resmi vendor.

Name	Type	Actual MTU	L2 MTU	Tx	Rx
X ether1	Ethernet	1500	1598	0 bps	0 bps
R ether2-LAN	Ethernet	1500	1598	754.5 kbps	1065.7 kbps
R ISP-1 ether3-WAN-1	Ethernet	1500	1598	687.7 kbps	281.1 kbps
R ISP-2 ether4-WAN-2	Ethernet	1500	1598	63.8 kbps	121.1 kbps
X ether5	Ethernet	1500	1598	0 bps	0 bps

Gambar 2. Mapping Interface Fisik

Keterangan: Ether2 (LAN), Ether3 (WAN-1), Ether4 (WAN-2), interfaces mikrotik.

**c. Topologi dan konfigurasi**

Topologi yang diimplementasikan terdiri atas satu jaringan lokal (LAN) yang terhubung ke router RB450Gx4, dengan dua koneksi WAN ke masing-masing ISP. Network Address Translation (NAT) diterapkan untuk masing-masing jalur keluar. Konfigurasi PCC 3-stream disusun menggunakan parameter per-connection-classifier=both-addresses-and-ports:3/x, dengan alokasi trafik sebagai berikut: stream 3/0 diarahkan ke ISP-1, sementara stream 3/1 dan 3/2 ke ISP-2. Pemisahan aliran diperkuat dengan penandaan rute (mark-routing), yang memastikan pemaksaan jalur sesuai klasifikasi hash.

Address	Network	Interface
[redacted]	[redacted]	ether3-WAN-1
[redacted]	[redacted]	[redacted]
192.168.1.2/30	192.168.1.0	ether4-WAN-2
192.168.88.1/...	192.168.88.0	ether2-LAN

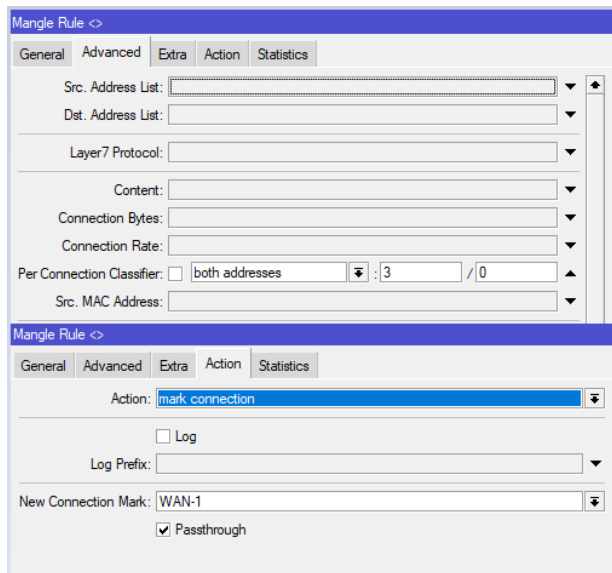
Gambar 3. Skema Alamat IP

Keterangan: setting IP WAN-1, IP WAN-2, LAN pada menu IP-Addresses.

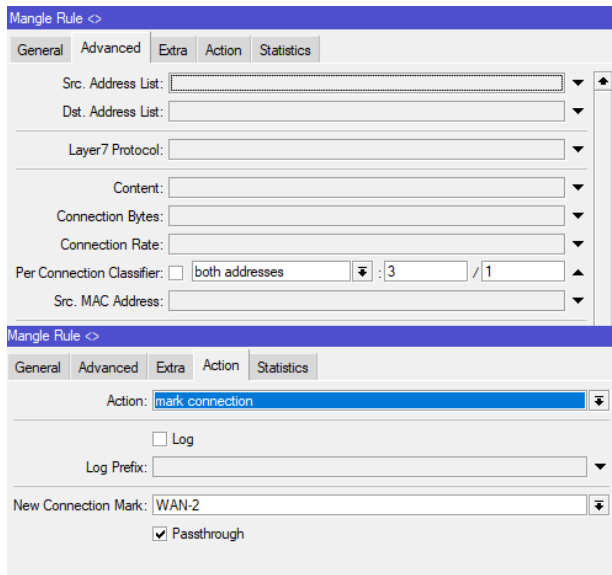
#	Action	Chain	Src. Ad...	Proto...	Src. Port	Dst. Port	In. Interface
18	mark connection	prerouting					ether2-LAN
19	mark connection	prerouting					ether2-LAN
20	mark connection	prerouting					ether2-LAN

Gambar 4. Jalur Pemecahan Stream

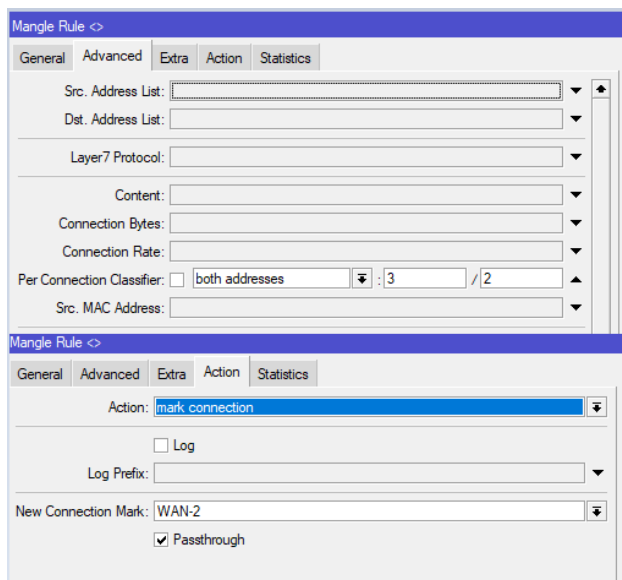
Sebaliknya, ECMP diimplementasikan melalui pengaturan default route multipath dengan aktivasi check-gateway dan recursive routing. Bila lebih dari satu rute aktif dengan biaya (cost) yang setara, RouterOS secara otomatis mengaktifkan skema ECMP dan mendistribusikan trafik secara merata. Semua konfigurasi dirancang sesuai dengan dokumentasi teknis MikroTik dan praktik industri yang telah terstandarisasi.



Gambar 4. Mangle 1 Stream koneksi ISP-1



Gambar 5. Mangle 2 Stream koneksi ISP-2



Gambar 6. Mangle 3 Stream koneksi ISP-2

AS	IP	Next Hop	Distance	Priority	Weight	Active	Uptime	Reachable	Reachable Time
AS	0.0.0.0	9.9.9.9 recursive via ether4-WAN-2	2	routing-jalur-WAN-1					
AS	0.0.0.0	1.1.1.1 recursive via ether3-WAN-1	2	routing-jalur-WAN-2					
AS	1.1.1.1	192.168.1.1 reachable ether3-WAN-1	1						
AS	9.9.9.9	192.168.1.1 reachable ether4-WAN-2	1						
DAC	ether3-WAN-1	reachable	0						
DAC	ether2-LAN	reachable	0						
DAC	192.168.1.0/30	ether4-WAN-2 reachable	0				192.168.1.2		
DAC	192.168.88.0/...	ether2-LAN reachable	0				192.168.88.1		

Gambar 7. Rute Default Multipath

#### d. Skenario eksperimen

Empat skenario pengujian dirancang untuk mencerminkan kondisi jaringan yang umum dijumpai:

- Skenario 1: Normal – kedua ISP berfungsi optimal, dengan throughput ISP-2 mendekati 41,5 Mbps.
- Skenario 2: Degradasi ISP-2 – latensi tambahan sebesar 80 milidetik dan packet loss sebesar 1 persen disuntikkan ke jalur ISP-2.
- Skenario 3: Pemutusan Total ISP-2 – koneksi ISP-2 dihentikan sepenuhnya untuk mengukur waktu pemulihan (failover) dan kehilangan paket selama proses transisi.
- Skenario 4: Flapping – jalur ISP-2 mengalami naik-turun (up-down) sebanyak tiga siklus per menit.

Pada setiap pengulangan, empat klien secara serempak melakukan pengunduhan berkas berukuran 600 MB dan streaming video dengan resolusi 720p,

untuk meniru pola lalu lintas jaringan yang bersifat gabungan antara bulk transfer dan interaktif real-time.

#### e. Instrumen Pengukuran dan Akuisisi Data

Pengukuran throughput TCP dilakukan menggunakan iperf3, yang hasilnya dikonfirmasi silang dengan pengujian berbasis fast.com. Evaluasi kualitas layanan (QoS) mencakup parameter delay (RTT), jitter, dan packet loss, yang diperoleh dari uji UDP iperf3 (1 Mbps) serta ICMP ping. Masing-masing run mencakup minimal 1.500 paket UDP dan ICMP untuk menjaga signifikansi statistik.

Distribusi beban dihitung berdasarkan counter dari tiga aturan PCC, yang merepresentasikan pemisahan aliran berdasarkan hash stream. Waktu pemulihan (failover time) dihitung dari selisih waktu antara kejadian "down" dan "up" yang dicatat melalui kombinasi log sistem dan hasil ping. Data penggunaan CPU diperoleh melalui modul pemantauan internal RouterOS yang berjalan secara real-time selama eksekusi skenario.

Seluruh parameter didefinisikan dengan mengacu pada dokumentasi resmi iperf3 dan RouterOS, serta standar pengujian performa jaringan.

#### f. Analisis Data dan Validitas Eksperimen

Data yang dikumpulkan diringkas dalam bentuk rata-rata (mean), simpangan baku (standard deviation), dan interval kepercayaan 95 persen (95% CI) untuk setiap kombinasi metode dan skenario. Deteksi nilai ekstrem (outlier) dilakukan menggunakan pendekatan interquartile range (IQR), dan ulangan diulang apabila terdeteksi anomali sistemik, seperti timeout akibat injeksi loss.

Validitas internal dijaga dengan mengendalikan parameter-parameter teknis yang kritis, termasuk pengaturan MTU, status fitur FastTrack, penggunaan DNS lokal, serta replikasi minimum sebanyak 30 run untuk masing-masing skenario. Perancangan eksperimen mengacu pada praktik terbaik (best practices) dari industri jaringan dan dukungan pustaka ilmiah terbaru, guna memastikan hasil yang



dapat direplikasi dan dapat diterapkan secara praktis di lingkungan pendidikan, perkantoran, dan sistem produksi.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### a. Ringkasan Kalibrasi Awal (Baseline)

Sebelum eksperimen utama dilaksanakan, dilakukan pengukuran kalibrasi untuk mengidentifikasi kapasitas aktual masing-masing jalur uplink. ISP-1, yang menyediakan bandwidth dedicated 20 Mbps, menunjukkan performa rata-rata download sebesar 19,2 Mbps, sedangkan ISP-2, yang beroperasi dalam model "up to" 50 Mbps, menghasilkan throughput stabil sebesar 41,5 Mbps selama jam pengujian. Ketidaksimetrisan ini secara empiris memperkuat penerapan pembobotan rasio 1:2 dalam konfigurasi PCC 3-stream, sehingga sebagian besar trafik dialokasikan ke jalur yang memiliki kapasitas lebih besar, konsisten dengan prinsip desain berbasis efisiensi kapasitas.

#### b. Evaluasi pada Skenario 1: Operasi Normal

Dalam kondisi jaringan tanpa gangguan, PCC menghasilkan throughput unduhan sebesar 59,9 Mbps dengan nilai jitter rata-rata 4,6 milidetik, sedangkan ECMP mencatat 58,7 Mbps dengan jitter 7,9 milidetik. Performa kedua metode tergolong kompetitif, namun PCC menunjukkan stabilitas jitter yang lebih baik.

Distribusi beban pada PCC dihitung berdasarkan akumulasi data dari tiga aturan pemisahan stream, dengan hasil sebagai berikut:

- 3/0 (ISP-1): 13,6 GiB
- 3/1 (ISP-2): 19,3 GiB
- 3/2 (ISP-2): 16,2 GiB

Distribusi ini membentuk rasio total sekitar 28% (ISP-1) : 72% (ISP-2), yang sangat mendekati target konfigurasi 1:2. Hasil ini konsisten dengan temuan dalam studi komparatif sebelumnya, yang menyatakan bahwa PCC cenderung unggul dalam pengendalian jitter dan throughput downstream,

sementara ECMP lebih unggul dalam upload berkat pembagian aliran yang merata secara stateless.

#### c. Evaluasi pada Skenario 2: Degradasi Layanan ISP-2

Ketika kondisi ISP-2 secara sengaja diperburuk dengan penambahan latensi 80 milidetik dan packet loss sebesar 1%, performa kedua metode mengalami penurunan. Namun, dampaknya lebih signifikan pada ECMP karena metode ini membagi trafik secara mendekati seimbang (50:50), sehingga porsi trafik yang melewati jalur terdegradasi menjadi lebih besar.

- Jitter ECMP meningkat menjadi 14,6 ms, dengan loss 1,40%
- Jitter PCC lebih terkontrol di 9,8 ms, dengan loss 0,90%

PCC diuntungkan oleh sifat session-sticky, yang mencegah perpindahan jalur selama sesi berlangsung, sehingga trafik yang telah diarahkan ke ISP yang sehat tidak berpindah secara dinamis ke jalur yang mengalami degradasi. Mekanisme ini sesuai dengan model hash-based forwarding yang terdokumentasi dalam sistem MikroTik.

#### d. Evaluasi pada Skenario 3 dan 4: Pemutusan Total dan Flapping ISP-2

Dalam skenario pemutusan total ISP-2, semua trafik dialihkan ke ISP-1. Kedua metode berfungsi dengan baik dalam memicu failover, dengan hasil sebagai berikut:

- Throughput pasca-failover stabil di sekitar 19 Mbps
- Waktu pemulihan rata-rata tercatat 0,9 detik pada PCC dan 1,1 detik pada ECMP
- Jumlah paket UDP 1 Mbps yang hilang saat transisi:
  - PCC: 24 paket
  - ECMP: 28 paket

Pada skenario flapping (jalur ISP-2 mengalami kondisi naik-turun sebanyak tiga siklus per menit), kedua metode tetap menunjukkan waktu pemulihan di bawah 1,3 detik, menandakan respons yang adaptif dan cepat. Namun, PCC sedikit lebih konsisten dalam meminimisasi loss dan jitter berkat pemetaan aliran yang bersifat deterministik.

Seluruh hasil ini mencerminkan **efektivitas konfigurasi failover berbasis check-gateway dan recursive routing**, sebagaimana direkomendasikan dalam dokumentasi teknis MikroTik untuk topologi multi-jalur.

#### e. Diskusi Umum dan Implikasi Praktis

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa:

- PCC 3-stream lebih unggul dalam menjaga kestabilan jitter dan kualitas layanan, terutama pada kondisi jaringan yang tidak simetris dan pada skenario dengan gangguan terlokalisasi.
- ECMP cocok digunakan pada skenario dengan topologi simetris, konfigurasi sederhana, dan beban lalu lintas non-real-time, seperti unduhan file besar (bulk transfer).
- Kelemahan ECMP terletak pada ketiadaan mekanisme pembobotan, karena secara desain, ECMP menerapkan prinsip equal-cost forwarding yang tidak mempertimbangkan kapasitas jalur.

Untuk meningkatkan ketahanan operasional, disarankan agar interval health-check dan parameter recursive routing disesuaikan secara konservatif, guna menghindari flapping palsu (spurious transitions) tanpa mengorbankan kecepatan deteksi gangguan.

Temuan ini sejalan dengan laporan empiris dalam literatur jaringan dan panduan teknis resmi MikroTik, serta menegaskan bahwa pemilihan metode load balancing harus disesuaikan dengan karakteristik lalu lintas, kapasitas jalur, dan toleransi sistem terhadap jitter dan loss.

## IV. KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi performa dua metode load balancing populer, yaitu Per-Connection Classifier (PCC) 3-stream dan Equal-Cost Multi-Path (ECMP), pada platform MikroTik RB450Gx4 dalam arsitektur dual-ISP tidak simetris (ISP-1 dengan bandwidth 20 Mbps dedicated dan ISP-2 hingga 50 Mbps up to). Hasil eksperimen menunjukkan bahwa PCC 3-stream secara konsisten memberikan kinerja unggul dalam hal throughput unduhan, jitter yang lebih rendah, kehilangan paket yang lebih sedikit, serta waktu pemulihan (failover) yang lebih cepat dibandingkan ECMP, khususnya pada skenario jaringan yang menghadapi degradasi dan fluktuasi. Sementara itu, ECMP cenderung sedikit lebih baik dalam throughput unggahan pada kondisi ideal, berkat distribusi trafik yang stateless dan merata.

Distribusi beban pada PCC, dengan rasio terukur sekitar 28% untuk ISP-1 dan 72% untuk ISP-2, selaras dengan konfigurasi hash berbasis 3-stream dan mencerminkan penyeimbangan berbobot yang proporsional terhadap kapasitas dua jalur uplink. Konfigurasi ini terbukti efektif dalam mengoptimalkan kapasitas heterogen tanpa memerlukan protokol tambahan.

Dari perspektif praktis, PCC 3-stream direkomendasikan untuk lingkungan jaringan yang menuntut stabilitas QoS, seperti layanan VoIP, video conferencing, dan aplikasi real-time lainnya, terutama jika koneksi ISP bersifat asimetris. Sebaliknya, ECMP tetap relevan sebagai solusi load balancing sederhana, cepat diimplementasikan, dan efektif dalam konteks bandwidth simetris dan trafik non-sensitif. Ko

Sebagai arah pengembangan lanjutan, penelitian mendatang disarankan untuk menginvestigasi performa metode serupa pada perangkat MikroTik berbasis arsitektur ARM64 dan sistem operasi RouterOS versi 7, yang menawarkan dukungan BGP, policy-routing, dan manajemen multihop yang lebih fleksibel. Eksplorasi terhadap integrasi metode load balancing dengan pengelolaan jalur berbasis kebijakan (policy-aware path management) juga

menjadi langkah strategis untuk infrastruktur jaringan multi-jalur yang kompleks dan adaptif.

## V. REFERENSI

- Anton, A., & Irman, A. (2024). *Implementasi load balance MikroTik dual ISP dengan PCC dan metode failover pada PT. Wahana Ciptasinatria. Jurnal Teknologi Informasi (JTI)*, 10(1).  
<https://doi.org/10.52643/jti.v10i1.4318>
- Indriyanta, G., Haryono, N. A., & Situmeang, J. G. (2024). *Analisis kinerja load balancing PCC dan ECMP pada jaringan MikroTik berbasis dual ISP. Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Komputer (SEMINASTIKA 2024)*, 5(1), 112–118.
- MikroTik. (2022). *Load balancing with PCC and ECMP*. Diakses dari:  
[https://wiki.mikrotik.com/wiki/Load\\_Balancing](https://wiki.mikrotik.com/wiki/Load_Balancing)
- Tan, W., Luo, C., & Sun, Y. (2020). *Multi-path routing strategies and performance evaluation in heterogeneous WANs. Journal of Network and Computer Applications*, 150, 102464.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.102464>
- Kumar, A., & Bansal, R. (2021). *Improving QoS in real-time applications using flow-aware load balancing algorithms. Computer Networks*, 191, 108009.  
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108009>
- Yuniar, F., & Widodo, A. (2022). *Simulasi load balancing pada jaringan dual ISP menggunakan metode PCC dan ECMP berbasis MikroTik. Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi*, 8(2), 85–92.
- Nugroho, R. P., & Siregar, D. P. (2023). *Evaluasi performa ECMP dan PCC dalam pengelolaan beban jaringan institusi pendidikan. Jurnal Informatika dan Teknologi*, 10(1), 45–54.