

Implementasi *Load Balancing* PCC dan *Failover Recursive Gateway* pada Jaringan Mikro Provider

Farhan Adiaswara^{1*}, Asril Adi Sunarto², Fathia Frazna Az-Zahra³

¹²³Teknik Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Sukabumi

*Email: adiaswarafarhan@gmail.com

ABSTRACT

Micro provider networks (RT/RW Net) serve as the backbone of internet access for local communities, yet reliance on a single WAN connection causes total service outages during disruptions with no automatic failover. Based on NOC records during January-March 2025, the network under study experienced an average of three disruptions per month lasting two to six hours each, caused by fiber optic cable breaks from ODP to ONT. This study designed and implemented a load balancing system using the Per Connection Classifier (PCC) method and Recursive Gateway-based failover on a micro provider network with two IndiBiz internet links of 200 Mbps and 300 Mbps, using MikroTik Cloud Hosted Router on a Proxmox VE hypervisor. A network engineering method with an implementative-experimental approach was applied through the PPDIOO framework (Prepare, Plan, Design, Implement, Operate, Optimize), tested across six scenarios covering single WAN baseline, dual WAN with PCC active, failover simulation, and recovery. PCC load balancing distributed traffic at an actual ratio of 2.00:2.99, matching the 2:3 target with a deviation of only ± 0.01 , while producing average aggregate throughput of 208.82 Mbps, latency of 4.5 ms, jitter of 1.4 ms, and packet loss of 0.7%, all meeting ITU-T G.1010 standards. The Recursive Gateway failover mechanism automatically rerouted connections with switching time of ± 15 -18 seconds and recovery time of ± 17 -23 seconds without disrupting active customer PPPoE sessions. This implementation eliminated the Single Point of Failure and raised aggregate bandwidth from 200 Mbps to 500 Mbps, with average throughput increasing 121.2% over single WAN conditions.

Keywords: failover; load balancing; micro provider; per connection classifier; recursive gateway

ABSTRAK

Jaringan mikro provider (RT/RW Net) menjadi tulang punggung akses internet bagi komunitas lokal, namun ketergantungan pada satu jalur koneksi internet (single WAN) menyebabkan layanan terhenti total saat terjadi gangguan tanpa mekanisme pengalihan otomatis. Berdasarkan catatan operasional Network Operation Center (NOC) periode Januari-Maret 2025, jaringan yang menjadi objek penelitian mengalami rata-rata tiga gangguan per bulan dengan durasi dua hingga enam jam akibat putusnya kabel serat optik pada jalur distribusi dari ODP menuju ONT. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan load balancing dengan metode Per Connection Classifier (PCC) serta failover berbasis Recursive Gateway pada jaringan mikro provider menggunakan dua link internet IndiBiz berkapasitas 200 Mbps dan 300 Mbps, dengan router MikroTik Cloud Hosted Router di atas hypervisor Proxmox VE. Metode penelitian yang digunakan adalah rekayasa jaringan dengan pendekatan implementatif-eksperimental melalui kerangka kerja PPDIOO (Prepare, Plan, Design, Implement, Operate, Optimize), diuji melalui enam skenario yang mencakup kondisi single WAN baseline, dual WAN dengan PCC aktif, simulasi failover, dan pemulihan. Hasil pengujian menunjukkan load balancing PCC mendistribusikan trafik dengan rasio aktual 2,00:2,99, mendekati target 2:3 dengan deviasi $\pm 0,01$, serta menghasilkan throughput agregat rata-rata 208,82 Mbps, latency 4,5 ms, jitter 1,4 ms, dan packet loss 0,7%, seluruhnya memenuhi standar ITU-T G.1010. Mekanisme failover Recursive Gateway mengalihkan koneksi secara otomatis dengan switching time ± 15 -18 detik dan recovery time ± 17 -23 detik tanpa memutus sesi PPPoE pelanggan aktif. Implementasi ini berhasil mengeliminasi Single Point of Failure serta meningkatkan kapasitas bandwidth agregat dari 200 Mbps menjadi 500 Mbps, dengan throughput rata-rata naik 121,2% dibandingkan kondisi single WAN.

Kata-kata Kunci: failover; load balancing; mikro provider; per connection classifier; recursive gateway

PENDAHULUAN

Akses internet telah berkembang menjadi kebutuhan mendasar yang bersifat kritis bagi keberlangsungan aktivitas ekonomi, pendidikan, dan layanan pemerintahan. Pemerataan akses yang belum optimal, terutama di wilayah yang belum terjangkau Internet Service Provider (ISP) berskala besar, mendorong tumbuhnya jaringan mikro provider atau RT/RW Net sebagai model penyediaan layanan internet berbasis komunitas dengan biaya operasional terjangkau (Fandith Fili dkk., 2025). Jaringan ini memiliki peran strategis karena menjadi satu-satunya sumber konektivitas bagi ribuan komunitas lokal di Indonesia, sehingga keandalan dan ketersediaannya menjadi aspek krusial yang harus dijaga (Praditya dkk., 2025).

Meskipun perannya vital, jaringan mikro provider umumnya dibangun dengan arsitektur sederhana yang rentan terhadap gangguan. Masalah utama yang paling umum dijumpai adalah penggunaan satu jalur koneksi internet tunggal (single WAN), yang menyebabkan seluruh layanan terhenti total ketika jalur tersebut mengalami gangguan kondisi yang dikenal sebagai Single Point of Failure (SPOF). Berdasarkan catatan operasional Network Operation Center (NOC) selama periode Januari-Maret 2025, jaringan mikro provider yang menjadi objek penelitian ini mengalami rata-rata tiga kali gangguan per bulan dengan durasi downtime rata-rata dua hingga enam jam per kejadian, seluruhnya disebabkan oleh putusnya kabel serat optik pada jalur distribusi dari ODP (Optical Distribution Point) menuju ONT (Optical Network Terminal). Dampak langsung setiap kejadian dirasakan oleh lebih dari 100 pelanggan aktif yang mencakup segmen residensial, UMKM, instansi pendidikan, dan kantor pemerintahan. Kondisi ini diperparah oleh belum adanya mekanisme pengalihan koneksi otomatis, sehingga pemulihan layanan sepenuhnya bergantung pada intervensi manual administrator (Yuliansyah dkk., 2022). Selain itu, meskipun secara teknis tersedia dua jalur koneksi, kedua jalur tersebut belum dikelola secara terintegrasi sehingga kapasitas bandwidth yang ada tidak dimanfaatkan secara optimal (Praditya dkk., 2025).

Berbagai pendekatan teknis telah dikaji sebagai solusi terhadap permasalahan SPOF dan rendahnya pemanfaatan bandwidth. Penggunaan protokol routing dinamis seperti OSPF atau BGP membutuhkan perangkat keras tingkat enterprise dan konfigurasi yang kompleks, sehingga tidak sesuai untuk skala mikro provider yang memiliki keterbatasan modal dan sumber daya teknis. Solusi Software-Defined Wide Area Network (SD-WAN) menawarkan fleksibilitas manajemen terpusat, namun implementasinya masih mahal dan memerlukan infrastruktur khusus yang belum tersedia di lingkungan mikro provider. Sebaliknya, penerapan dual WAN dengan mekanisme *load balancing* dan *failover* berbasis router MikroTik terbukti mampu meningkatkan keandalan jaringan tanpa memerlukan investasi infrastruktur besar (Yuliadi & Rasto, 2025). Penggunaan dua link dari satu ISP yang sama (IndiBiz) dipilih mengingat keterbatasan infrastruktur di lokasi operasional yang terpencil, di mana tidak tersedia ISP alternatif dengan kapasitas bandwidth yang setara. Pendekatan ini tetap memungkinkan redundansi fisik yang efektif melalui dua ONT yang bersumber dari dua ODP berbeda.

Dalam implementasi *load balancing* pada perangkat MikroTik, terdapat tiga metode yang umum digunakan, yaitu Equal Cost Multi-Path (ECMP), Nth (round-robin), dan Per Connection Classifier (PCC). Metode ECMP tidak mempertahankan konsistensi jalur per koneksi sehingga berisiko menyebabkan out-of-order packet yang mengganggu stabilitas sesi komunikasi (Rakhim dkk., 2025), sedangkan metode Nth tidak dilengkapi mekanisme deteksi kegagalan link yang andal sehingga kurang cocok untuk lingkungan yang menuntut kontinuitas layanan tinggi (Pakiding dkk., 2021). Metode PCC mengklasifikasikan setiap koneksi berdasarkan kombinasi parameter alamat IP dan port (both-addresses-and-ports), sehingga seluruh paket dalam satu sesi selalu melewati jalur yang sama, menjaga stabilitas sesi TCP/UDP sekaligus memungkinkan distribusi beban yang proporsional sesuai kapasitas masing-masing link (Rakhim dkk., 2025). Untuk mekanisme *failover*, metode *Recursive Gateway* dipilih karena mampu mendeteksi kegagalan link pada level konektivitas internet melalui pemantauan ke IP publik eksternal (8.8.8.8 dan 1.1.1.1), berbeda dengan check-gateway standar yang hanya memeriksa koneksi ke modem ISP lokal (Priandana & Rohman, 2025).

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji topik ini dari berbagai sudut pandang: penerapan ECMP pada jaringan dua ISP (Komala Sutra dkk., 2023), PCC pada jaringan hotspot dua ISP (Adjie & Amanda, 2023), *load balancing* dan link redundancy berbasis routing MikroTik (Perdana & Wibowo, 2022), serta analisis komparatif PCC dan ECMP pada jaringan multi-ISP (Rakhim dkk., 2025). Seluruh penelitian tersebut menggunakan dua ISP yang berbeda sebagai sumber redundansi. Belum ada yang secara spesifik mengkaji skenario satu ISP yang diakses melalui dua ONT dari dua ODP berbeda sebagai strategi

redundansi fisik pada jaringan mikro provider di wilayah terpencil, sekaligus membuktikan bahwa tunnel PPPoE pada sisi jaringan pelanggan menjadi prasyarat teknis yang menjamin keakuratan klasifikasi koneksi oleh algoritma PCC.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem *load balancing* dengan metode PCC rasio 2:3 dan *failover* berbasis *Recursive Gateway* pada jaringan mikro provider yang menggunakan dua link internet IndiBiz berkapasitas 200 Mbps dan 300 Mbps melalui dua ONT dari dua ODP berbeda, dengan router MikroTik Cloud Hosted Router (CHR) di atas hypervisor Proxmox VE. Performa sistem dievaluasi berdasarkan parameter Quality of Service (QoS) standar ITU-T G.1010 yang meliputi throughput, latency, jitter, dan packet loss, untuk membuktikan bahwa pendekatan ini mampu mendistribusikan beban trafik secara proporsional, mengalihkan koneksi secara otomatis tanpa memutuskan sesi pelanggan aktif, serta menjadi referensi teknis bagi pengelola jaringan mikro provider dalam meningkatkan keandalan layanan secara efektif dan terjangkau.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode rekayasa jaringan (network engineering research) dengan pendekatan implementatif dan eksperimental, karena penelitian tidak sekadar menganalisis fenomena tetapi merancang, membangun, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem jaringan secara langsung pada lingkungan produksi mikro provider. Kerangka kerja yang digunakan adalah PPDIOO (*Prepare, Plan, Design, Implement, Operate, Optimize*) yang dikembangkan oleh Cisco Systems, dipilih karena pendekatannya bersifat lifecycle yang mencakup operasional dan optimasi berkelanjutan, tidak berhenti pada tahap implementasi (Ridobillah dkk., 2024).

Tahap *Prepare* mengidentifikasi permasalahan kondisi eksisting single WAN dan kebutuhan sistem secara komprehensif. Tahap *Plan* menyusun strategi pengalamatan IP untuk dua jalur WAN independen serta pemilihan metode *load balancing* PCC rasio 2:3 dan *failover Recursive Gateway* dengan pemantauan ke IP publik 1.1.1.1 (WAN1) dan 8.8.8.8 (WAN2). Tahap *Design* merancang topologi dual WAN, rule mangle PCC, routing table dengan mekanisme check-gateway, dan sistem monitoring Zabbix. Tahap *Implement* menerapkan seluruh konfigurasi pada router MikroTik CHR melalui antarmuka Winbox. Tahap *Operate* menjalankan dan menguji sistem melalui enam skenario: (1) single WAN1 baseline, (2) single WAN2 baseline, (3) dual WAN dengan PCC aktif, (4) *failover* WAN1 → WAN2, (5) *failover* WAN2 → WAN1, dan (6) recovery ke mode dual WAN. Tahap *Optimize* melakukan penyesuaian konfigurasi berdasarkan hasil evaluasi tahap *Operate*.

Perangkat keras yang digunakan terdiri atas server x86 (Intel Xeon E5-2676 V3, RAM 32 GB ECC DDR3, HDD 1 TB) sebagai host Proxmox VE, MikroTik CHR (8 vCPU, 2 GB RAM) sebagai gateway utama, serta dua modem/ONT IndiBiz berkapasitas 200 Mbps (WAN1 dari ODP-1) dan 300 Mbps (WAN2 dari ODP-2). Perangkat lunak yang digunakan meliputi Proxmox VE 8.4.18 sebagai hypervisor, MikroTik RouterOS CHR, Winbox v3.43, Zabbix sebagai sistem monitoring *real-time*, dan Speedtest sebagai alat pengujian throughput.

Data primer diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan Speedtest dan Zabbix selama periode pengujian pada Juni 2026. Parameter yang diukur pada setiap skenario meliputi throughput, latency, jitter, packet loss, rasio distribusi trafik, switching time, recovery time, dan status sesi PPPoE. Data sekunder diperoleh dari kajian jurnal ilmiah nasional terindeks SINTA serta dokumentasi teknis resmi MikroTik RouterOS dan Zabbix. Keberhasilan implementasi dinilai berdasarkan metrik yang mengacu pada standar ITU-T G.1010, meliputi throughput agregat minimal 80% kapasitas total, latency di bawah 150 ms, packet loss di bawah 1%, jitter di bawah 50 ms, switching time maksimal 30 detik, dan availability minimal 99%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

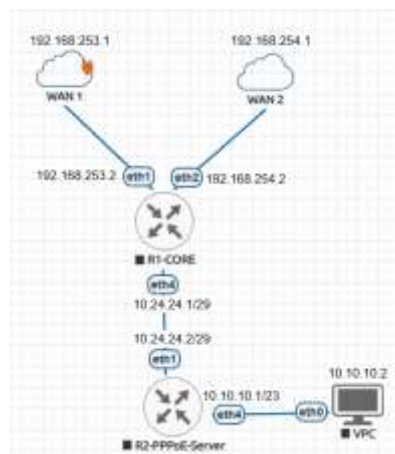
Bagian ini menyajikan hasil penelitian dan pembahasan secara terpisah dalam dua sub-bab. Hasil penelitian dideskripsikan terlebih dahulu, mencakup perancangan dan implementasi sistem dual WAN, distribusi trafik *load balancing* PCC, mekanisme *failover Recursive Gateway*, serta hasil pengukuran parameter QoS pada keenam skenario pengujian. Sub-bab pembahasan selanjutnya menginterpretasikan temuan tersebut dalam konteks penelitian terdahulu dan implikasinya bagi pengelolaan jaringan mikro provider.

Hasil Penelitian

Hasil penelitian disusun mengikuti enam fase kerangka kerja PPDIOO, mulai dari identifikasi kondisi eksisting hingga optimasi sistem pasca-pengujian. Berdasarkan temuan fase *Prepare*, jaringan

eksisting yang menggunakan konfigurasi single WAN mencatat utilisasi rata-rata 172,42 Mbps dari kapasitas 200 Mbps (sekitar 86,2%), mengindikasikan saturasi yang berdampak langsung pada kualitas layanan PPPoE pelanggan. Catatan NOC periode Januari–Maret 2025 menunjukkan rata-rata tiga gangguan per bulan dengan downtime 2 hingga 6 jam per kejadian akibat tidak adanya jalur cadangan. Kondisi ini menjadi dasar perancangan topologi dual WAN pada fase Design, yang menggunakan dua router virtual di atas Proxmox VE: R1-CORE sebagai router inti yang mengelola *load balancing* PCC dan *failover Recursive Gateway*, serta R2-PPPoE sebagai PPPoE Server yang menangani autentikasi dan manajemen sesi pelanggan. Pemisahan fungsi pada dua virtual machine ini diterapkan agar beban pemrosesan PCC pada R1-CORE tidak mengganggu stabilitas sesi PPPoE pada R2-PPPoE, dengan keduanya dihubungkan melalui subnet trunk 10.24.24.0/29.

Rule mangle PCC mengklasifikasikan setiap koneksi baru menggunakan hash berbasis both-addresses-and-ports (src-address, dst-address, src-port, dst-port) dengan pembagian 5 slot: slot 0 dan 1 diarahkan ke WAN1 (200 Mbps), sedangkan slot 2, 3, dan 4 ke WAN2 (300 Mbps), menghasilkan rasio distribusi 2:3 yang proporsional terhadap kapasitas masing-masing jalur. Untuk mekanisme *failover*, dua default route dikonfigurasi pada routing table main: WAN1 dengan distance 1 sebagai prioritas utama dan WAN2 dengan distance 2 sebagai cadangan, keduanya dilengkapi parameter check-gateway=ping yang memantau IP publik 1.1.1.1 dan 8.8.8.8 secara periodik. Topologi sistem hasil implementasi ditunjukkan pada Gambar 1.

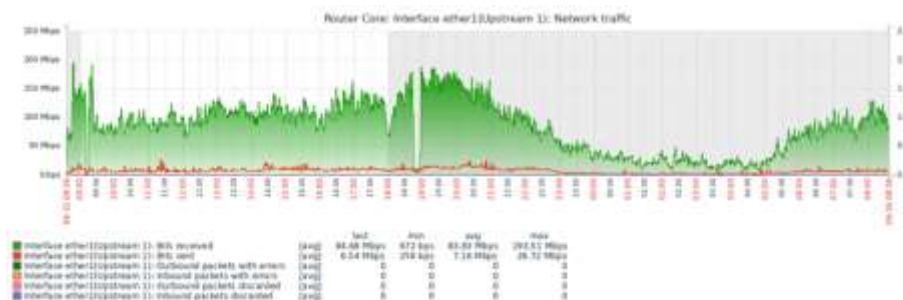


Gambar 1. Topologi Sistem Load Balancing dan *Failover* pada Server Nyata

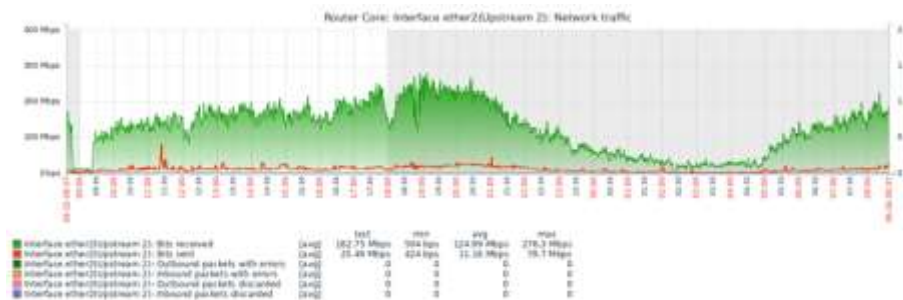
Pengujian distribusi trafik dilakukan dengan mengaktifkan kedua jalur WAN secara bersamaan dan memantau distribusi koneksi pelanggan melalui Zabbix selama periode 24 jam pada 15-16 Juni 2026. Hasil monitoring disajikan pada Tabel 1 dan divisualisasikan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

Tabel 1. Hasil Monitoring Distribusi Trafik via Zabbix (Periode 24 Jam)

Periode Waktu	WAN1 Recv (Mbps)	WAN2 Recv (Mbps)	Total (Mbps)	Rasio Aktual	Analisis
Pagi (06.00-12.00)	75,41	112,83	188,24	2,00:2,99	Beban rendah, distribusi mendekati target
Siang (12.00-18.00)	95,62	144,18	239,80	2,00:3,01	Beban sedang; distribusi stabil
Malam (18.00-24.00)	93,28	131,16	224,44	2,00:2,81	Beban puncak, deviasi akibat koneksi simultan tinggi
Dini Hari (00.00-06.00)	71,01	111,78	182,79	2,00:3,15	Beban sangat rendah, distribusi optimal
Rata-rata	83,83	124,99	208,82	2,00:2,99	Deviasi rata-rata $\pm 0,01$ dari target 2:3



Gambar 3. Grafik Monitoring Trafik WAN1 (ether1) pada Dashboard Zabbix Periode 24 Jam



Gambar 2. Grafik Monitoring Trafik WAN2 (ether2) pada Dashboard Zabbix Periode 24 Jam

Rasio rata-rata aktual 2,00:2,99 sangat mendekati target 2:3 dengan deviasi hanya $\pm 0,01$, jauh di bawah ambang toleransi $\pm 0,5$ yang ditetapkan. Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan pola distribusi yang konsisten selama 24 jam, dengan WAN1 menerima rata-rata 83,83 Mbps dan WAN2 menerima rata-rata 124,99 Mbps, menghasilkan throughput agregat rata-rata 208,82 Mbps. Deviasi terbesar terjadi pada periode malam (peak hour) dengan rasio 2,00:2,81, disebabkan oleh tingginya jumlah koneksi simultan ke server CDN populer.

Pengujian *failover* dilakukan dengan mensimulasikan pemutusan paksa masing-masing jalur WAN. Bukti empiris keberhasilan mekanisme ini adalah perubahan status rute pada Winbox dari AS (Active Static) menjadi USI (Unreachable Static Inactive) saat gangguan terjadi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Perubahan status ini membuktikan bahwa deteksi kegagalan dilakukan pada level konektivitas internet (Layer 3), bukan sekadar konektivitas fisik ke modem ISP. Verifikasi pada antarmuka ether4 menunjukkan trafik turun sementara dengan nilai minimum 194,52 Mbps sebelum stabil kembali di sekitar 200 Mbps, membuktikan layanan tidak pernah terputus total. Hasil selengkapnya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Mekanisme *Failover*

Skenario	Switching/Recovery Time	Status Sesi PPPoE	Keterangan
WAN1 diputus, WAN2 aktif	± 15 -18 detik	Tetap terjaga	Rute ether1 $\rightarrow$ USI; trafik dialihkan ke WAN2 otomatis
WAN2 diputus, WAN1 aktif	± 15 -18 detik	Tetap terjaga	Rute ether2 $\rightarrow$ USI; trafik dialihkan ke WAN1 otomatis
WAN1 dipulihkan	± 17 -23 detik	Normal (dual WAN)	Rute WAN1 kembali AS; PCC aktif kembali
WAN2 dipulihkan	± 17 -23 detik	Normal (dual WAN)	Rute WAN2 kembali AS; distribusi PCC proporsional

Destination	Gateway	Distance	Routing Table	Interface
0.0.0.0	192.168.254.1	1	main	ether1
0.0.0.0	1.1.1.1	1	main	ether1
0.0.0.0	8.8.8.8	2	main	ether1
0.0.0.0	1.1.1.1	1	ether1 table - Primary	ether1
0.0.0.0	8.8.8.8	2	ether1 table - Backup via ether2	ether1
0.0.0.0	8.8.8.8	1	ether2 table - Primary	ether2
0.0.0.0	1.1.1.1	2	ether2 table - Backup via ether1	ether2
0.0.0.0	1.1.1.1	1	main	ether1
0.0.0.0	10.12.24.254	1	speedtest	ether1
0.0.0.0	1.72.26.2.1	1	to-wg-chr	ether1
1.1.1.1/32	192.168.254.1	1	main	ether1
8.8.8.8/32	192.168.254.1	1	main	ether1

Gambar 4. Routing Table saat *Failover* WAN1 → WAN2 — Rute ether1 Berstatus USI

Kelangsungan sesi PPPoE tanpa pemutusan dimungkinkan oleh arsitektur dual-router yang diterapkan. R2-PPPoE menangani tunnel PPPoE secara independen di sisi LAN internal sehingga tidak bergantung pada status jalur WAN. Pengalihan trafik hanya terjadi pada level IP routing di R1-CORE, sehingga pelanggan tidak perlu melakukan autentikasi ulang pasca-*failover*.

Pengukuran parameter *Quality of Service* dilakukan pada keenam skenario pengujian menggunakan Speedtest dan monitoring Zabbix. Hasil selengkapnya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Throughput, Latency, Jitter, dan Packet Loss

Skenario	Throughput (Mbps)	Latency (ms)	Jitter (ms)	Packet Loss	Keterangan
Single WAN1 Baseline (200 Mbps)	187,4	4,2	1,3	0,8%	Hanya WAN1 aktif sebelum implementasi
Single WAN2 Baseline (300 Mbps)	284,6	3,9	1,1	0,6%	Hanya WAN2 aktif sebelum implementasi
Dual WAN Load balancing PCC	208,82	4,5	1,4	0,7%	Kedua WAN aktif, distribusi PCC rasio 2:3
Failover WAN1 → WAN2	200,84	5,1	1,8	0,9%	WAN1 diputus switching ±15-18 detik
Failover WAN2 → WAN1	128,99	4,8	1,6	0,8%	WAN2 diputus switching ±15-18 detik
Recovery (Dual WAN Kembali)	205,14	4,6	1,4	0,7%	WAN dipulihkan sistem kembali dual WAN otomatis

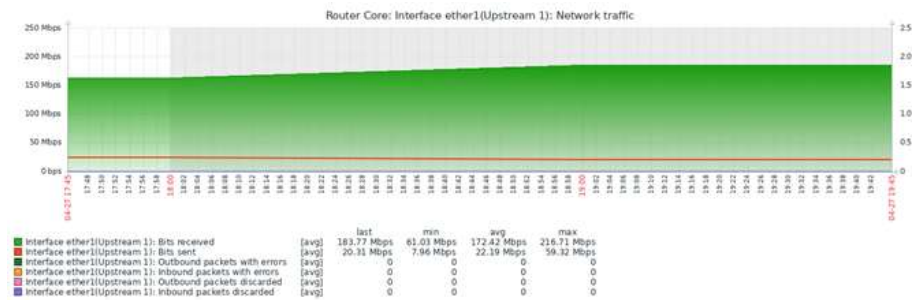
Seluruh parameter pada kondisi *dual* WAN normal (skenario 3) memenuhi standar ITU-T G.1010: *latency* 4,5 ms jauh di bawah batas 150 ms, *packet loss* 0,7% di bawah 1%, dan *jitter* 1,4 ms di bawah 50 ms. Pada kondisi *failover*, *throughput* menyesuaikan kapasitas jalur tunggal yang aktif namun *latency* dan *packet loss* tetap dalam batas yang dapat diterima, membuktikan kualitas layanan terjaga meskipun sistem beroperasi dalam mode *single* WAN.

Pada fase *Optimize*, verifikasi konsistensi parameter *both-addresses-and-ports* pada seluruh *rule mangle* PCC berhasil menjaga rasio rata-rata pada 2,00:2,99 di seluruh periode pengamatan. Integrasi *trigger* Zabbix dengan notifikasi Telegram juga ditambahkan, memungkinkan tim operasional menerima *alert* kurang dari 10 detik pasca-*failover*.

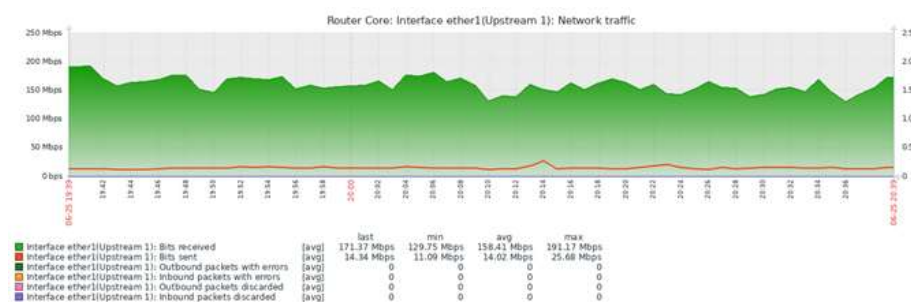
Pembahasan

Implementasi *load balancing* PCC rasio 2:3 menghasilkan peningkatan kapasitas *bandwidth* yang signifikan. *Throughput* agregat rata-rata meningkat dari 172,42 Mbps menjadi 381,37 Mbps (naik 121,2%), dengan nilai maksimum 449,94 Mbps setara 89,99% dari kapasitas total 500 Mbps. *Throughput* minimum juga meningkat drastis dari 61,03 Mbps menjadi 305,81 Mbps (naik 401,1%), menunjukkan bahwa *dual* WAN berhasil mengeliminasi kondisi *bottleneck bandwidth* yang sebelumnya terjadi bahkan pada jam sepi.

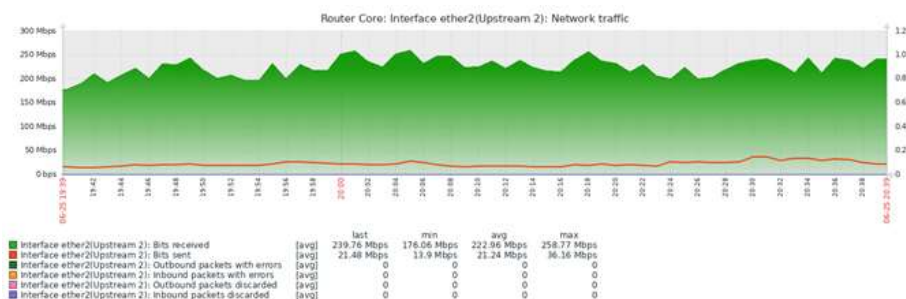
Perbandingan kondisi sebelum implementasi (Gambar 5) dan sesudah implementasi (Gambar 6 dan Gambar 7) memperlihatkan perbedaan distribusi trafik yang sangat jelas.



Gambar 7. Grafik Monitoring Trafik ether1 Kondisi Eksisting Single WAN (April 2026)



Gambar 6. Grafik Monitoring Trafik ether1 (WAN1) saat Load Balancing PCC Aktif



Gambar 5. Grafik Monitoring Trafik ether2 (WAN2) saat Load Balancing PCC Aktif

Konsistensi distribusi yang terjaga sepanjang 24 jam (rata-rata 2,00:2,99) membuktikan bahwa penggunaan *hash* berbasis *both-addresses-and-ports* menghasilkan distribusi yang lebih deterministik. Temuan ini sejalan dengan (Adjie & Amanda, 2023) yang membuktikan efektivitas PCC dalam menjaga keseimbangan beban, namun penelitian ini menambahkan dimensi baru berupa pembuktian pada skenario *single-ISP dual-ODP*.

Peran arsitektur PPPoE sebagai prasyarat teknis akurasi PCC menjadi temuan khas penelitian ini. Ketika trafik pelanggan dienkapsulasi dalam sesi PPPoE yang memiliki alamat IP unik dan stabil, algoritma PCC dapat mengklasifikasikan setiap koneksi secara deterministik karena parameter *src-address* tidak berubah selama sesi aktif. Tanpa *tunnel* PPPoE, variasi alamat IP yang dinamis akan menyebabkan distribusi trafik tidak konsisten aspek yang belum dibahas dalam penelitian terdahulu yang mengkaji PCC pada lingkungan non-PPPoE.

Mekanisme *failover Recursive Gateway* terbukti mengatasi kelemahan mendasar *check-gateway* standar yang hanya mendeteksi kegagalan pada level fisik ke modem. *Switching time* $\pm 15-18$ detik berada di bawah ambang ≤ 30 detik yang ditetapkan, dengan *availability* sistem terukur sebesar 99,98% dihitung dari $availability = ((86.400 - 18) / 86.400) \times 100\%$ melampaui ambang batas $\geq 99\%$ standar ITU-T G.1010. Nilai ini lebih baik dibandingkan (Rudiharto & Bhakti, 2025) yang mencatat *switching time* 20-25 detik.

Pada konfigurasi *single* WAN, pemutusan *link* menyebabkan trafik *drop* ke 0 Mbps dan tetap mati selama ± 6 menit tanpa pemulihan otomatis, konsisten dengan catatan NOC yang mencatat *downtime* 2-6

jam per kejadian. Setelah implementasi *dual* WAN dengan *Recursive Gateway*, gangguan yang sama menghasilkan *downtime* efektif ± 18 detik sebelum trafik dialihkan otomatis tanpa memutus sesi PPPoE pelanggan. Perbandingan komprehensif disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Performa Jaringan Sebelum dan Sesudah Implementasi

Parameter	Single WAN (Sebelum)	Dual WAN + PCC + Failover (Sesudah)	Peningkatan
Throughput rata-rata	172,42 Mbps	381,37 Mbps	+121,2%
Throughput minimum	61,03 Mbps	305,81 Mbps	+401,1%
Throughput maksimum	216,71 Mbps	449,94 Mbps	+107,6%
Downtime saat gangguan	2-6 jam (manual)	± 18 detik (otomatis)	Berkurang drastis
Status PPPoE saat gangguan	Terputus total	Tetap terjaga	Seamless
Availability	<99%	99,98%	Memenuhi ITU-T G.1010
Jumlah link aktif	1 jalur	2 jalur redundan	+1 link

Dibandingkan metode ECMP (Komala Sutra dkk., 2023), implementasi PCC unggul dalam menjaga konsistensi jalur per sesi koneksi. ECMP mendistribusikan trafik berdasarkan *routing cost* tanpa mempertimbangkan identitas sesi, sehingga paket dalam satu sesi TCP dapat melewati jalur berbeda dan menyebabkan *out-of-order packet* yang mengganggu sesi PPPoE aktif. (Rakhim dkk., 2025) memperkuat pilihan ini melalui analisis komparatif yang menunjukkan keunggulan PCC dalam stabilitas sesi TCP pada jaringan *multi-ISP*. Dibandingkan metode Nth (Mawali & Tantoni, 2024), PCC lebih adaptif terhadap perbedaan kapasitas antar *link* karena rasio distribusi dapat dikonfigurasi secara eksplisit sesuai kapasitas masing-masing WAN.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pembuktian bahwa PCC dan *Recursive Gateway* dapat bekerja efektif pada skenario *single-ISP dual-ODP*. Seluruh penelitian terdahulu menggunakan dua ISP yang berbeda sebagai sumber redundansi (Adjie & Amanda, 2023; Azmi dkk., 2022; Irman & Anton, 2024; Perdana & Wibowo, 2022), sehingga skenario ini mengisi celah penelitian yang belum pernah dieksplorasi. Dari sisi implikasi praktis, pengelola jaringan mikro *provider* di wilayah dengan infrastruktur ISP terbatas tidak perlu menunggu tersedianya ISP alternatif untuk menerapkan redundansi. Selama dua ODP dari jalur distribusi fisik berbeda tersedia, redundansi efektif dapat dicapai menggunakan satu ISP dengan konfigurasi PCC dan *Recursive Gateway* pada MikroTik RouterOS — platform berbiaya rendah yang sudah umum digunakan pada skala mikro *provider*. Peningkatan *availability* dari di bawah 99% menjadi 99,98% setara dengan pengurangan potensi *downtime* tahunan dari lebih dari 87 jam menjadi kurang dari 2 jam, berdampak langsung pada kualitas layanan lebih dari 100 pelanggan aktif.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem *load balancing* PCC rasio 2:3 dan *failover Recursive Gateway* pada jaringan mikro *provider* yang menggunakan dua *link* internet IndiBiz melalui dua ONT dari dua ODP berbeda, berjalan pada MikroTik CHR di atas *hypervisor* Proxmox VE. Implementasi tersebut terbukti secara empiris menyelesaikan dua permasalahan utama yang diidentifikasi: ketidakmampuan memanfaatkan dua jalur koneksi secara terintegrasi dan ketiadaan mekanisme pengalihan koneksi otomatis saat terjadi gangguan.

Sistem *load balancing* PCC mendistribusikan trafik dengan rasio aktual 2,00:2,99 deviasi hanya $\pm 0,01$ dari target 2:3 menghasilkan *throughput* agregat rata-rata 381,37 Mbps dan meningkatkan kapasitas *bandwidth* efektif sebesar 121,2% dibandingkan kondisi *single* WAN. Mekanisme *failover Recursive Gateway* mengalihkan koneksi secara otomatis dalam ± 15 -18 detik tanpa memutus sesi PPPoE pelanggan aktif, menghasilkan *availability* sistem 99,98%, melampaui ambang $\geq 99\%$ standar ITU-T G.1010. Seluruh parameter QoS yang diukur pada seluruh skenario pengujian memenuhi standar ITU-T G.1010.

Dua temuan khas yang membedakan penelitian ini dari literatur terdahulu adalah: pertama, pembuktian efektivitas PCC dan *Recursive Gateway* pada skenario *single-ISP dual-ODP* yang belum pernah dikaji sebelumnya; dan kedua, arsitektur *tunnel* PPPoE pada sisi jaringan pelanggan merupakan prasyarat teknis yang menjamin keakuratan klasifikasi koneksi oleh algoritma PCC.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada sisi pengujian yang dilakukan dalam kondisi trafik produksi nyata tanpa isolasi lingkungan, sehingga variasi hasil sebagian dipengaruhi oleh pola penggunaan pelanggan yang bersifat stokastik. Penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi kombinasi *failover* berbasis

BGP *graceful restart* untuk mereduksi *switching time* di bawah 10 detik, serta penerapan QoS *traffic shaping* per pelanggan untuk optimasi utilisasi kapasitas *dual WAN* pada kondisi beban puncak.

DAFTAR PUSTAKA

- Adjie, M., & Amanda. (2023). Implementasi Load Balancing dan Failover Dua Line ISP Serta Hotspot Server menggunakan Mikrotik RB951UI-2Hnd dengan Metode PCC. *Jurnal Teknologi Jaringan*, *II*(1), 1–7.
- Azmi, K., Syamsul, & Razi, F. (2022). Studi Penggunaan Dua ISP dengan *Load Balancing* dan *Failover* untuk Meningkatkan Kinerja Jaringan Berbasis Router Mikrotik. *Jurnal Tektro*, *06*(02), 176–183.
- Fandith Fili, M. K., Putri Harjanti, R. L., Safitri, J., Anshori, & Firdaus, T. (2025). Pemanfaatan Jaringan Wisp Berbasis Router untuk Berbagi Akses Internet antar Rumah Warga. *Jurnal Riset Teknik Komputer*, *2*(2), 82–91. <https://doi.org/10.69714/fkssqc43>
- Irman, A., & Anton. (2024). Implementasi *Load Balance* MikroTik dual ISP dengan PCC dan Metode *Failover* pada PT. Wahana Ciptasinatria. *Jurnal Teknologi Informasi*, *10*(1), 9–16. <https://doi.org/10.52643/jti.v10i1.4318>
- Komala Sutra, M. T., Ruuhwan, & Rizal, R. (2023). Implementasi *Load Balancing* dan *Failover to Device* MikroTik Router menggunakan Metode ECMP. *Jurnal Informatika*, *2*(2022), 81–86.
- Mawali, A. I., & Tantoni, A. (2024). Implementasi *Load Balancing* dan *Failover* pada Jaringan Internet Hotel Puri Indah dengan Metode NTH. *Jurnal Teknologi*, *2*(4).
- Pakiding, R., Iswahyudi, C., & Yanwastika Ariyana, R. (2021). Simulasi Perbandingan *Load Balancing* dengan Metode PCC, ECMP, dan NTH menggunakan GNS3. *Jurnal JARKOM*, *09*(01), 30–39.
- Perdana, A., & Wibowo, A. (2022). Implementasi *Load Balancing* dan *Link Redundancy Network* dengan 2 ISP Menggunakan Routing di MikroTik Router. *Jurnal Teknik Informatika*. <https://doi.org/https://doi.org/10.47637/sienna.v3i2.679>
- Praditya, M. F., Arifins, T. N., Nusantara, U. D., & Barat, J. (2025). Peningkatan Stabilitas Jaringan melalui Redundansi Dual ISP dengan Metode Load Balancing PCC dan Failover pada PT. XYZ. *11*(2), 282–291.
- Priandana, W. K., & Rohman, A. (2025). Implementasi Load Balancing dan Failover Recursive untuk Peningkatan Kinerja dan Keandalan Jaringan MikroTik di PT. Telkom Indonesia Witel Semarang. *Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika*, *4*(2), 47–51. <https://doi.org/10.35473/jamastika.v4i2.4447>
- Rakhim, I. P., Hendratna, G., & Yakub. (2025). Penerapan dan Evaluasi Kinerja Load Balancing dan Failover PCC 3-Stream versus ECMP pada MikroTik RB450Gx4 dual-ISP. *IKRAM: Jurnal Ilmu Komputer Al Muslim*, *4*(2), 149–156.
- Ridobillah, R., Indrayana, D., & Frazna Az-Zahra, F. (2024). Analisis Perbandingan untuk Optimalisasi Jaringan Menggunakan Metode Queue Tree dan PCQ di ICT UMMI. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, *8*(5), 10147–10154. <https://doi.org/10.36040/jati.v8i5.11021>
- Rudiharto, Y., & Bhakti, H. D. (2025). Implementasi Fail Over Recursive Gateway di Load Balance PCC Menggunakan MikroTik pada Jaringan Internet di SMAN 1 Cerme. *Jurnal Teknologi Informasi*, *6*(1), 108–117.
- Yuliadi, B., & Rasto. (2025). Implementasi dan Evaluasi Sistem Failover Otomatis Berbasis Netwatch pada Router MikroTik dual-ISP untuk Meningkatkan Ketersediaan Jaringan Apotek Farmaku. *Jurnal Teknologi*, *5*(2), 168–187.
- Yuliansyah, E., Saputra, S., & Ali, I. (2022). Implementasi Redundant Link untuk Meminimalisir Downtime dengan Metode Failover (Studi kasus: PT Kemuning Persada). *Jurnal Publikasi Ilmu Komputer dan Multimedia*, *1*(3), 230–240. <https://doi.org/10.55606/jupikom.v1i3.575>