

Studi Performa *Load Balancing* dengan *Per-Connection Classifier* (PCC) dan *Equal Cost Multi-Path* (ECMP) Menggunakan Perangkat Mikrotik

1st Arya Abhirama
School of Industrial Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
aryabhram@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Rd. Rohmat Saedudin
School of Industrial Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
rdrohmat@telkomuniversity.ac.id

3rd Adityas Widjajarto, S.T., M.T.
School of Industrial Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
adtwjrt@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Kebutuhan koneksi internet yang andal dan terjangkau untuk lingkungan SOHO (*Small Office/Home Office*) menjadi tantangan utama di tengah tingginya biaya *bandwidth*. Penelitian ini bertujuan menganalisis performa dua metode *load balancing* populer, *Per Connection Classifier* (PCC) dan *Equal Cost Multi-Path* (ECMP), sebagai solusi untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan jaringan menggunakan perangkat Mikrotik dengan dua ISP. Metodologi penelitian melibatkan pengujian eksperimental pada 108 skenario berbeda yang mencakup variasi *bandwidth* dan kondisi *failover*. Hasil penelitian menunjukkan adanya pertukaran (*trade-off*) yang jelas: ECMP unggul dalam hal *throughput* dengan kecepatan gabungan mencapai 17 Mbps dibandingkan PCC sebesar 14 Mbps. Namun, PCC terbukti jauh lebih superior dalam menjaga stabilitas koneksi, dengan unggul dalam 5 dari 7 kategori *bandwidth* dalam hal meminimalkan *packet loss* dan menunjukkan *delay* yang lebih rendah pada kondisi *bandwidth* ekstrem. Temuan ini menyimpulkan bahwa PCC adalah pilihan ideal untuk jaringan yang memprioritaskan stabilitas, sementara ECMP lebih cocok untuk memaksimalkan *throughput* pada koneksi yang simetris..

Kata kunci— *Load Balancing*, *Equal Cost Multi Path* (ECMP), *Per Connection Classifier* (PCC), Mikrotik, *Quality of Service* (QoS), *Internet Service Provider* (ISP)

I. PENDAHULUAN

Di era digital saat ini, ketergantungan terhadap koneksi internet yang cepat dan stabil telah menjadi kebutuhan pokok, tidak hanya bagi perusahaan besar tetapi juga untuk lingkungan kantor kecil dan rumah (*Small Office/Home Office*, SOHO). Namun, pengguna sering dihadapkan pada tiga tantangan utama: pertama, tingginya biaya untuk mendapatkan satu jalur koneksi berkecepatan tinggi; kedua, risiko koneksi terputus total (*downtime*) akibat ketergantungan pada satu penyedia layanan internet (ISP); dan ketiga, keterbatasan jangkauan sinyal di area tertentu.

Teknik *load balancing* muncul sebagai solusi strategis untuk mengatasi tantangan tersebut. Dengan menggabungkan dua atau lebih koneksi ISP, *load balancing* tidak hanya memungkinkan peningkatan kapasitas *bandwidth* secara efektif dengan biaya lebih terjangkau, tetapi juga menyediakan mekanisme *failover* otomatis untuk menjamin kontinuitas layanan jika salah satu jalur gagal. Pendekatan ini

secara langsung menjawab kebutuhan akan jaringan yang andal dan efisien.

Perangkat Mikrotik menyediakan dua metode populer untuk implementasi ini, yaitu *Per Connection Classifier* (PCC) dan *Equal Cost Multi-Path* (ECMP). Karena keduanya memiliki pendekatan teknis yang berbeda dalam mendistribusikan trafik, seringkali muncul pertanyaan mengenai metode mana yang lebih unggul untuk kondisi jaringan tertentu. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk membandingkan secara kuantitatif performa kedua metode tersebut dalam berbagai skenario pengujian. Fokus penelitian adalah pada parameter *Quality of Service* (QoS) seperti *throughput*, *delay*, *jitter*, dan *packet loss* untuk memberikan rekomendasi berbasis data mengenai metode *load balancing* yang paling sesuai untuk lingkungan SOHO.

II. KAJIAN TEORI

A. *Load Balancing*

Load balancing merupakan teknik manajemen jaringan yang bertujuan untuk mendistribusikan lalu lintas data secara merata ke beberapa jalur koneksi. Tujuannya adalah untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya jaringan, mencegah kelebihan beban pada satu jalur, serta meningkatkan ketersediaan dan keandalan koneksi internet.

B. *Quality of Service*

Quality of Service (QoS) adalah konsep penting dalam pengelolaan jaringan, khususnya untuk aplikasi yang memerlukan performa tinggi. Penilaian terhadap QoS dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa aspek seperti *delay* (penundaan), *jitter* (variasi penundaan), *packet loss* (kehilangan paket), dan *throughput*. Faktor-faktor ini membantu menggambarkan performa jaringan secara menyeluruh dan berperan penting dalam memastikan kualitas koneksi internet yang optimal bagi pengguna.

Berdasarkan standar dari *Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Network* (TIPHON), kualitas layanan jaringan atau *Quality of Service* (QoS) diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori, tergantung pada nilai indeks yang dihitung dari parameter teknis jaringan.

TABEL 1

(Standar jaringan berdasarkan TIPHON)

Nilai	Persentase	Indeks
1-1,99	95-100%	Sangat Baik
2-2,99	75-94,79%	Baik
3-3,79	50-74,75%	Sedang
3,8-4	25-49,75%	Buruk

Beberapa parameter utama yang digunakan dalam evaluasi QoS meliputi:

1. Delay

Delay merupakan waktu yang dibutuhkan paket data untuk sampai dari pengirim ke penerima. Semakin kecil delay, semakin responsif koneksi jaringan.

$$\text{Rata - rata delay} = \frac{\text{Jumlah latency}}{\text{jumlah paket diterima}}$$

TABEL 2

(Standar jaringan berdasarkan nilai delay)

Indeks	Delay (ms)	Indeks
1	< 150 m/s	Sangat Baik
2	150 m/s - 250 m/s	Baik
3	250 m/s - 350 m/s	Sedang
4	> 350 m/s	Buruk

2. Jitter

Jitter merupakan variasi waktu kedatangan antar paket data. Nilai jitter yang rendah menunjukkan kestabilan waktu pengiriman data dan penting untuk aplikasi *real-time*.

$$\text{Jitter} = \frac{\text{Total variasi Latency}}{\text{Total paket diterima}}$$

TABEL 3

(Standar jaringan berdasarkan nilai jitter)

Indeks	Jitter (ms)	Indeks
1	0 m/s	Sangat Baik
2	< 75 m/s	Baik
3	75 m/s - 125 m/s	Sedang
4	> 125 m/s	Buruk

3. Packet Loss

Packet Loss menunjukkan persentase paket data yang hilang selama transmisi. Tingkat *packet loss* yang tinggi dapat mengganggu komunikasi dan menurunkan kualitas layanan.

$$\text{Packet loss} = \frac{(\text{Paket dikirim} - \text{Paket diterima})}{\text{Paket yang dikirim}} \times 100\%$$

TABEL 4

(Standar jaringan berdasarkan nilai packet loss)

Indeks	Packet Loss %	Indeks
1	< 2%	Sangat Baik
2	3 - 14%	Baik
3	15 - 24%	Sedang
4	> 25%	Buruk

4. Throughput

Throughput mengukur jumlah data yang berhasil ditransfer dalam periode waktu tertentu. Nilai *throughput* yang tinggi menunjukkan efisiensi penggunaan jaringan.

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Jumlah data yang dikirim (Bytes)}}{\text{waktu pengiriman data (s)}}$$

TABEL 5

(Standar jaringan berdasarkan nilai throughput)

Indeks	Throughput %	Indeks
1	100%	Sangat Baik
2	75%	Baik
3	50%	Sedang
4	25%	Buruk

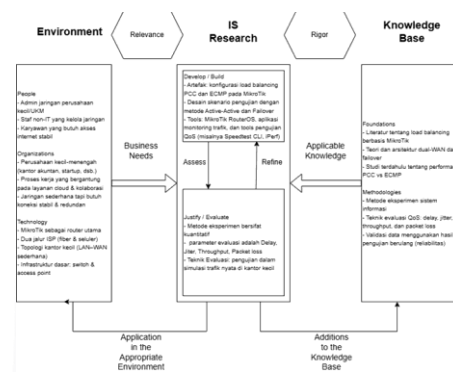
C. Internet Service Provider

Internet Service Provider (ISP) adalah penyedia layanan akses internet yang memungkinkan pengguna terhubung ke jaringan global. Kinerja ISP sangat mempengaruhi pengalaman pengguna, mulai dari kecepatan akses, stabilitas koneksi, hingga kualitas layanan secara keseluruhan. Dalam skenario dual ISP, seperti kombinasi jaringan *fiber* (Biznet) dan seluler (Telkomsel), keberadaan ISP yang berbeda memungkinkan implementasi *load balancing* yang lebih fleksibel dan handal, serta mendukung sistem *failover* yang efektif saat salah satu jalur mengalami gangguan.

III. METODE

A. Model Konseptual Hevner

Penelitian ini menggunakan kerangka kerja Hevner et al. dalam pendekatan *Design Science Research* (DSR) yang mengintegrasikan tiga domain utama: *environment*, *IS research*, dan *knowledge base*.



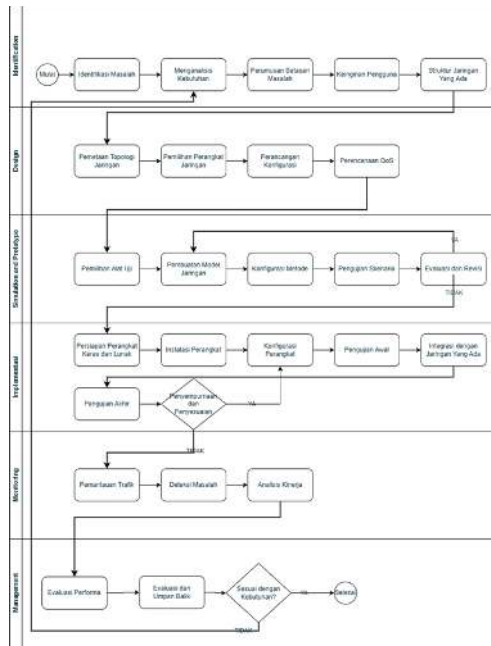
GAMBAR 1

(Model konseptual hevner)

Pada sisi *environment*, penelitian diarahkan pada kebutuhan nyata pengguna jaringan seperti UMKM atau kantor kecil yang memerlukan koneksi internet stabil dan hemat biaya. Dari sisi *knowledge base*, penelitian ini memanfaatkan teori dan studi terdahulu tentang *load balancing*, *dual-WAN*, serta parameter evaluasi QoS. Proses utama dari *IS research* melibatkan pembangunan artefak berupa konfigurasi *load balancing* PCC dan ECMP, dilanjutkan dengan evaluasi melalui metode eksperimental berbasis parameter *delay*, *jitter*, *throughput*, dan *packet loss*. Penelitian ini tidak hanya menghasilkan pengetahuan praktis, tetapi juga memperkuat kontribusi teoretis dalam bidang sistem informasi jaringan.

B. Sistematika Penyelesaian Masalah

Metode penelitian ini mengacu pada alur *Network Development Life Cycle* (NDLC) yang dimodifikasi.



GAMBAR 2

(Sistematisa penyelesaian masalah)

Tahap awal dimulai dari identifikasi masalah dan kebutuhan pengguna jaringan. Selanjutnya, dilakukan perancangan topologi, pemilihan perangkat, dan perencanaan konfigurasi QoS. Pada tahap *simulation* and *prototype*, dilakukan konfigurasi metode *load balancing* dan pengujian skenario yang dirancang. Implementasi dilakukan dengan instalasi perangkat dan konfigurasi sesuai rancangan, kemudian diuji secara langsung dalam jaringan nyata. Tahap monitoring dilakukan untuk menganalisis trafik, mendeteksi permasalahan, dan mengevaluasi kinerja sistem. Terakhir, proses *management* memastikan bahwa hasil implementasi sesuai dengan kebutuhan pengguna melalui evaluasi dan umpan balik berkelanjutan.

C. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui dua pendekatan:

- 1) Data Primer: Diperoleh melalui eksperimen langsung pada jaringan dengan konfigurasi ECMP dan PCC menggunakan perangkat MikroTik. Data dikumpulkan menggunakan Wireshark, CLI MikroTik, dan Speedtest untuk mengukur *delay*, *jitter*, *throughput*, dan *packet loss*.
- 2) Data Sekunder: Berasal dari literatur dan jurnal sebelumnya mengenai teknik *load balancing* dan arsitektur jaringan dual ISP, sebagai dasar dalam pengembangan konfigurasi dan validasi hasil.

D. Alasan Pemilihan Metode

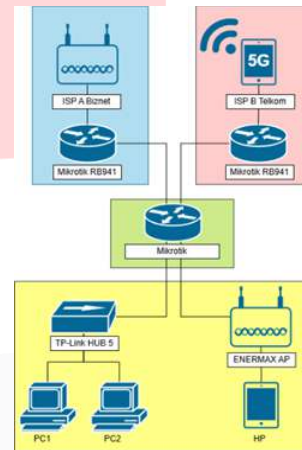
Design Science dipilih karena sesuai untuk penelitian yang menghasilkan artefak berupa solusi teknis, yakni konfigurasi sistem *load balancing* dual ISP menggunakan MikroTik. Pendekatan ini memungkinkan perancangan dan evaluasi solusi melalui siklus iteratif yang mendalam. Metode eksperimental juga relevan karena memungkinkan pengukuran performa sistem secara objektif berdasarkan parameter QoS. Kombinasi pendekatan desain dan kuantitatif ini memastikan bahwa artefak yang dikembangkan tidak hanya dapat diuji secara teknis, tetapi juga bermanfaat secara praktis dalam konteks jaringan kecil-menengah.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan membahas hasil pengujian dan pengukuran *quality of service* yang telah dilakukan dengan teknik *load balancing* ECMP dan PCC.

A. Topologi Jaringan yang Digunakan

Pengujian dalam penelitian ini menggunakan topologi jaringan yang mensimulasikan kondisi rumah dengan dua koneksi ISP berbeda, yaitu Biznet dan Telkomsel. Masing-masing koneksi dihubungkan ke router MikroTik RB941, kemudian digabungkan pada satu router utama MikroTik yang bertugas melakukan konfigurasi teknik *load balancing*. Dari router utama, koneksi dibagi ke dua arah: ke TP-Link HUB 5 yang menghubungkan dua PC melalui LAN, dan ke access point ENERMAX yang menghubungkan perangkat *mobile* seperti HP. Rancangan ini memungkinkan pengujian baik melalui koneksi kabel maupun nirkabel.



GAMBAR 3

(Topologi *load balancing*)

B. Pengujian Speedtest

Pengujian speedtest dilakukan untuk mengevaluasi kinerja masing-masing metode *load balancing*, yaitu ECMP dan PCC, dengan mengukur kecepatan maksimum *download* dan *upload* pada berbagai skenario status ISP: kedua ISP aktif, salah satu ISP non-active, dan sebaliknya. Parameter yang diuji meliputi nilai maksimum *bandwidth* yang diperoleh dari masing-masing ISP dan total *bandwidth* yang digunakan.

Pada teknik ECMP, hasil menunjukkan bahwa total *bandwidth* tertinggi tercapai saat kedua ISP aktif, yaitu 17 Mbps untuk *download* dan 17 Mbps untuk *upload*. Ketika salah satu jalur dinonaktifkan, ECMP tetap menunjukkan performa yang baik, namun terjadi sedikit penurunan pada total *bandwidth*.

TABEL 6

(Hasil analisis pengujian speedtest pada teknik ECMP)

ECMP							
ISP Status		Bandwidth (Mbps)					
		Max Download		Total	Max Upload		Total
Biznet	Telkom	Biznet	Telkom		Biznet	Telkom	
Active	Active	10.1	9.0	17	10.2	10.9	17
Active	Loss	10.1	0	9.2	10.2	0	8.5
Loss	Active	0	10.0	8.3	0	10.3	7.8

Sebaliknya, pada teknik PCC, kecepatan *download* dan *upload* juga mencapai hasil maksimal saat kedua ISP aktif, dengan total 14 Mbps untuk masing-masing arah. Namun, ketika hanya satu ISP yang aktif, terlihat penurunan lebih

signifikan dibandingkan ECMP, khususnya saat hanya Telkomsel yang aktif, dengan total *upload* menurun hingga 5.6 Mbps.

Secara umum, ECMP unggul dari segi *throughput* total saat kedua ISP aktif, berkat distribusi beban yang merata. Namun, PCC menunjukkan keandalan dalam menjaga kestabilan koneksi dan distribusi individu per koneksi, meskipun total *bandwidth* sedikit lebih rendah.

TABEL 7

(Hasil analisis pengujian *speedtest* pada teknik PCC)

PCC							
ISP Status		Bandwidth (Mbps)					
		Max Download		Total	Max Upload		Total
Biznet	Telkom	Biznet	Telkom		Biznet	Telkom	
Active	Active	10.2	10.3	14	9.7	10.9	14
Active	Loss	10.2	0	9.7	9.9	0	8.2
Loss	Active	0	8.5	7.6	0	9.2	5.6

C. Pengujian Ping

Pengujian ping dilakukan untuk mengukur rata-rata waktu tunda (*delay*) pada jaringan terhadap tiga aplikasi populer: YouTube, Disney, dan Catchplay. Pengujian ini dilakukan pada dua teknik *load balancing*, yaitu ECMP dan PCC, dengan tiga skenario jalur ISP: *Active-Active* (AA), *Loss-Active* (LA), dan *Active-Loss* (AL).

TABEL 8

(Hasil analisis pengujian ping pada teknik ECMP)

ECMP					
Nama Aplikasi	statuses	Jalur Yang Digunakan		Hasil	
		Biznet	Telkom	Receive	Avg (ms)
Youtube	AA	0	1	196	53
	LA	1	0	192	20
	AL	0	1	187	76
Disney	AA	1	0	184	50
	LA	1	0	200	8
	AL	0	1	197	48
Catchplay	AA	1	0	200	7
	LA	1	0	197	57
	AL	0	1	200	77

Hasil pengujian ECMP menunjukkan bahwa *delay* cenderung bervariasi tergantung pada kondisi jalur. Misalnya, pada aplikasi YouTube, skenario *Active-Loss* menghasilkan *delay* tertinggi sebesar 76 ms, sedangkan saat *Loss-Active*, *delay* hanya 20 ms. Hal ini menunjukkan bahwa kestabilan ECMP dapat terganggu pada saat distribusi trafik tidak merata.

TABEL 9

(Hasil analisis pengujian ping pada teknik PCC)

PCC					
Nama Aplikasi	statuses	Jalur Yang Digunakan		Hasil	
		Biznet	Telkom	Receive	Avg (ms)
Youtube	AA	1	0	200	18
	LA	1	0	194	18
	AL	0	1	189	68
Disney	AA	0	1	192	53
	LA	1	0	194	8
	AL	0	1	194	57
Catchplay	AA	0	1	198	93
	LA	1	0	200	59
	AL	0	1	200	91

Sementara itu, teknik PCC memperlihatkan hasil yang lebih konsisten. Untuk aplikasi YouTube, rata-rata *delay* terendah

tercatat 18 ms pada kondisi AA, dan tetap stabil di bawah 70 ms pada kondisi lainnya. Demikian pula pada Disney dan Catchplay, teknik PCC menghasilkan *delay* yang lebih rendah dibandingkan ECMP dalam sebagian besar skenario.

Secara keseluruhan, teknik PCC menunjukkan performa yang lebih baik dalam menjaga kestabilan *delay*, terutama dalam kondisi jaringan tidak seimbang. Hal ini menunjukkan bahwa PCC lebih adaptif terhadap perubahan jalur koneksi ISP.

D. Waktu Perpindahan ISP

Waktu perpindahan ISP mengukur seberapa cepat koneksi jaringan dapat beralih dari satu jalur ke jalur lainnya saat terjadi gangguan. Pengujian dilakukan pada dua metode *load balancing*, yaitu ECMP dan PCC, terhadap tiga aplikasi *streaming* (YouTube, Disney, dan Catchplay) dengan berbagai variasi *bandwidth* (10M hingga 256K).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa PCC cenderung menghasilkan waktu perpindahan yang lebih stabil dan efisien, terutama pada *bandwidth* tinggi. Sebagai contoh, pada aplikasi YouTube, metode PCC membutuhkan waktu rata-rata sekitar 7 detik, sementara ECMP mencatat waktu lebih tinggi dan tidak konsisten, bahkan mencapai lebih dari 16 detik pada *bandwidth* rendah.

TABEL 10

(Hasil analisis waktu perpindahan isp pada teknik ECMP)

ECMP							
Aplikasi	Status	Waktu perpindahan (detik)					
		10M	5M	2M	1M	512K	256K
Youtube	AL	6.89	4.85	4.86	11.58	10.33	16.99
	LA	9.04	13.54	11.97	18.01	12.11	14.09
Disney	AL	8.01	4.97	7.66	9.10	14.77	10.27
	LA	10.49	12.14	17.87	11.69	10.91	13.50
Catchplay	AL	24.18	7.99	17.36	18.28	26.74	29.96
	LA	12.50	10.80	18.03	31.29	33.01	39.33

Pada skenario *bandwidth* kecil (misalnya 512K dan 256K), kedua metode mengalami peningkatan waktu perpindahan. Namun, PCC tetap unggul dalam menjaga kestabilan dan kecepatan proses *failover*, terutama pada aplikasi yang sensitif terhadap interupsi seperti *streaming video*.

TABEL 11

(Hasil analisis waktu perpindahan isp pada teknik PCC)

PCC							
Aplikasi	Status	Waktu perpindahan (detik)					
		10M	5M	2M	1M	512K	256K
Youtube	AL	5.97	17.45	4.64	7.24	13.96	9.32
	LA	9.15	13.13	15.89	8.98	11.51	14.27
Disney	AL	17.53	8.41	6.97	9.96	12.98	9.12
	LA	9.79	10.52	15.24	16.03	16.73	11.14
Catchplay	AL	22.73	21.86	13.72	17.46	19.43	20.15
	LA	17.98	17.38	16.39	31.10	24.43	22.64

E. Pengujian *Quality of Service Delay*

Delay merupakan parameter penting dalam menilai performa jaringan, khususnya untuk aplikasi *real-time* seperti *video streaming*. Pengujian dilakukan terhadap metode ECMP dan PCC menggunakan tiga aplikasi (YouTube, Disney, dan Catchplay) dalam kondisi *bandwidth* yang bervariasi dari 10 Mbps hingga 256 Kbps.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa PCC cenderung memiliki *delay* yang lebih rendah dan stabil pada *bandwidth* tinggi. Sebagai contoh, pada skenario YouTube dengan *bandwidth* 10 Mbps dan status *Active-Active* (AA), *delay* pada PCC hanya 1.87 ms, jauh lebih rendah dibandingkan ECMP yang mencatat 7.20 ms. Selain itu, pada aplikasi

Disney, *delay* PCC tetap rendah hingga *bandwidth* 1 Mbps, sedangkan ECMP menunjukkan kenaikan *delay* yang lebih signifikan..

TABEL 12

(Hasil analisis pengujian *delay* pada teknik ECMP)

		ECMP					
Aplikasi	Status	Delay (ms)					
		10M	5M	2M	1M	512K	256K
Youtube	AA	7.20	6.63	5.13	5.44	9.50	17.16
	AL	6.05	4.50	4.51	4.85	10.19	14.11
	LA	6.41	4.85	4.09	5.34	11.19	16.46
Disney	AA	1.10	2.25	4.55	6.14	8.72	14.92
	AL	1.10	2.26	4.46	8.77	11.40	21.20
	LA	2.85	2.53	4.51	6.15	9.21	16.64
Catchplay	AA	1.93	3.59	3.53	6.31	13.34	20.79
	AL	2.67	5.34	8.26	15.99	19.53	35.70
	LA	3.02	3.30	3.82	6.61	16.00	86.49

Namun, pada *bandwidth* sangat rendah (512K dan 256K), kedua metode menunjukkan peningkatan *delay*, terutama pada aplikasi Catchplay. Metode ECMP mencatat *delay* ekstrem hingga 86.49 ms, sedangkan PCC masih berada di bawahnya meskipun juga meningkat drastis hingga 61.12 ms.

TABEL 13

(Hasil analisis pengujian *delay* pada teknik PCC)

		PCC					
Aplikasi	Status	Delay (ms)					
		10M	5M	2M	1M	512K	256K
Youtube	AA	1.87	42.65	9.08	4.38	9.10	14.14
	AL	5.83	4.69	4.10	5.00	10.29	14.93
	LA	5.48	5.65	4.50	4.95	8.98	15.95
Disney	AA	1.87	1.82	4.27	7.38	13.54	21.10
	AL	1.79	3.05	6.94	17.00	20.80	36.97
	LA	18.18	8.28	9.51	15.66	17.91	36.08
Catchplay	AA	0.97	1.77	2.99	4.21	8.88	11.77
	AL	0.94	1.75	3.37	6.48	11.69	21.22
	LA	2.55	3.04	4.43	7.61	11.76	61.12

Secara keseluruhan, PCC lebih konsisten dalam menjaga *delay* rendah pada kondisi *bandwidth* normal, sedangkan ECMP kurang stabil terutama saat terjadi perubahan jalur atau penurunan kapasitas *bandwidth*.

F. Pengujian *Quality of Service Jitter*

Jitter mengukur seberapa besar variasi waktu kedatangan antar *paket* data. Nilai *jitter* yang tinggi dapat menyebabkan ketidakstabilan dalam aplikasi *real-time* seperti video *streaming*. Pengujian dilakukan terhadap dua metode, ECMP dan PCC, menggunakan tiga aplikasi video dengan variasi *bandwidth* dari 10 Mbps hingga 256 Kbps.

Dari hasil pengujian, PCC secara umum menunjukkan *jitter* yang lebih rendah dan konsisten, terutama pada *bandwidth* tinggi. Sebagai contoh, pada YouTube dengan *bandwidth* 10 Mbps dan status AA, *jitter* PCC hanya 0.56 ms dibandingkan ECMP yang mencatat 2.16 ms. Kondisi serupa juga terlihat pada Disney dan Catchplay, di mana *jitter* PCC berada pada kisaran <1 ms saat *bandwidth* mencukupi.

TABEL 14

(Hasil analisis pengujian *jitter* pada teknik ECMP)

		ECMP					
Aplikasi	Status	Jitter (ms)					
		10M	5M	2M	1M	512K	256K
Youtube	AA	2.16	1.99	1.54	1.63	2.85	5.15
	AL	1.81	1.35	1.35	1.45	3.06	4.23
	LA	1.92	1.45	1.23	1.60	3.36	4.94
Disney	AA	0.33	0.67	1.37	1.84	2.62	4.48
	AL	0.33	0.68	1.34	2.63	3.42	6.36
	LA	0.85	0.76	1.35	1.85	2.76	4.99
Catchplay	AA	0.58	1.08	1.06	1.89	4.00	6.24
	AL	0.80	1.60	2.48	4.80	5.86	10.71
	LA	0.91	0.99	1.14	1.98	4.80	25.95

Namun, ketika *bandwidth* menurun drastis, terutama pada 256K, kedua metode mengalami lonjakan *jitter*. *Jitter* tertinggi pada ECMP tercatat pada Catchplay dengan 25.95 ms, sedangkan PCC juga naik hingga 18.33 ms, tetapi masih lebih rendah dari ECMP.

TABEL 15

(Hasil analisis pengujian *jitter* pada teknik PCC)

		PCC					
Aplikasi	Status	Jitter (ms)					
		10M	5M	2M	1M	512K	256K
Youtube	AA	0.56	12.79	2.72	1.31	2.73	4.24
	AL	1.75	1.41	1.23	1.50	3.09	4.48
	LA	1.65	1.69	1.35	1.49	2.69	4.78
Disney	AA	0.56	0.55	1.28	2.21	4.06	6.33
	AL	0.54	0.91	2.08	5.10	6.24	11.09
	LA	5.46	2.48	2.85	4.70	5.37	10.82
Catchplay	AA	0.29	0.53	0.90	1.26	2.66	3.53
	AL	0.28	0.52	1.01	1.94	3.51	6.37
	LA	0.77	0.91	1.33	2.28	3.53	18.33

Secara keseluruhan, PCC lebih unggul dalam menjaga kestabilan waktu antar paket, menjadikannya lebih andal untuk koneksi yang membutuhkan kualitas video atau suara yang stabil.

G. Pengujian *Quality of Service Packet Loss*

Packet loss menunjukkan persentase data yang hilang selama proses transmisi. Nilai yang tinggi menandakan buruknya kualitas jaringan, terutama dalam aplikasi *video streaming* seperti Youtube, Disney, dan Catchplay. Pengujian dilakukan terhadap metode ECMP dan PCC dalam berbagai skenario *bandwidth* dan status ISP.

Hasil menunjukkan bahwa PCC umumnya menghasilkan *packet loss* yang lebih rendah, terutama pada *bandwidth* tinggi (10 Mbps). Misalnya, pada Youtube dengan status AA, PCC hanya mencatat 3.05%, sedangkan ECMP mencapai 17.37%. Demikian pula pada Disney dan Catchplay, nilai *packet loss* PCC lebih stabil, dengan kisaran di bawah 10% dalam kondisi jaringan normal.

TABEL 16

(Hasil analisis pengujian *packet loss* pada teknik ECMP)

		ECMP					
Aplikasi	Status	Packet Loss (%)					
		10M	5M	2M	1M	512K	256K
Youtube	AA	17.37	14.29	11.42	12.46	20.26	29.46
	AL	12.86	10.28	9.13	7.45	11.19	13.61
	LA	14.44	12.45	10.69	11.46	18.34	20.35
Disney	AA	3.67	6.60	13.89	17.64	21.44	28.52
	AL	3.05	6.61	7.26	12.43	16.24	23.18
	LA	6.91	8.25	12.34	9.90	15.43	18.58
Catchplay	AA	4.05	6.73	8.09	14.60	23.54	32.06
	AL	6.20	11.44	15.12	20.18	25.38	37.67
	LA	5.34	6.41	7.69	12.09	24.34	62.57

Namun, pada *bandwidth* rendah (512K dan 256K), kedua metode mengalami kenaikan signifikan. ECMP mencatat hingga 62.57% *packet loss* pada Catchplay, sementara PCC juga menunjukkan lonjakan hingga 55.49%, tetapi masih sedikit lebih rendah. Kondisi *Active-Loss* (AL) dan *Loss-Active* (LA) memperparah kondisi tersebut karena jalur koneksi tidak optimal.

TABEL 17

(Hasil analisis pengujian *packet loss* pada teknik PCC)

		PCC					
Aplikasi	Status	Packet Loss (%)					
		10M	5M	2M	1M	512K	256K
Youtube	AA	3.05	50.86	16.85	29.72	14.75	17.30
	AL	12.64	10.17	8.92	7.39	12.06	15.08
	LA	9.92	11.49	9.67	6.45	13.52	18.53
Disney	AA	3.05	3.19	6.84	15.91	22.68	32.12
	AL	4.09	6.25	11.60	22.45	27.55	37.57

	LA	21.70	13.05	16.57	26.31	28.67	38.67
Catchplay	AA	2.05	3.80	28.22	8.03	14.36	19.43
	AL	2.23	3.86	5.70	9.80	16.53	21.92
	LA	5.29	5.78	7.88	12.70	18.62	55.49

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa PCC lebih efektif dalam mengurangi kehilangan data, terutama pada jaringan yang memiliki *bandwidth* mencukupi dan jalur ISP aktif secara bersamaan.

H. Pengujian *Quality of Service Throughput*

Throughput menggambarkan seberapa besar data yang berhasil ditransmisikan dalam satuan waktu tertentu. Nilai *throughput* yang tinggi menunjukkan jaringan yang efisien dan optimal. Pengujian ini dilakukan untuk membandingkan performa ECMP dan PCC dalam menangani aplikasi Youtube, Disney, dan Catchplay di berbagai kondisi *bandwidth* dan status ISP.

Hasil menunjukkan bahwa ECMP menghasilkan *throughput* yang cenderung lebih stabil dan tinggi, terutama pada *bandwidth* rendah. Misalnya, pada Catchplay dengan *bandwidth* 256K, ECMP masih mampu menjaga *throughput* hingga 73.60%, sedangkan PCC mengalami penurunan tajam hingga 48.34%. Pola serupa terlihat juga pada aplikasi lain.

TABEL 18

(Hasil analisis pengujian *throughput* pada teknik ECMP)

		ECMP					
Aplikasi	Status	Throughput (%)					
		10M	5M	2M	1M	512K	256K
Youtube	AA	91.10	92.04	93.15	90.62	83.88	73.68
	AL	92.39	93.42	93.33	92.87	86.67	81.90
	LA	92.84	93.84	93.98	91.60	83.39	77.83
Disney	AA	97.85	95.96	91.62	88.56	83.77	75.72
	AL	98.07	95.80	93.85	87.89	83.37	74.72
	LA	96.08	95.04	91.74	91.59	84.85	78.30
Catchplay	AA	97.48	95.19	95.03	91.39	83.22	75.26
	AL	96.34	92.69	89.55	82.25	79.52	65.79
	LA	96.15	95.50	94.40	90.75	80.70	38.67

Namun demikian, PCC menunjukkan performa yang sangat baik pada kondisi *Active-Active* dan *bandwidth* tinggi. Pada Youtube 10 Mbps, *throughput* PCC mencapai 97.68%, sedikit lebih tinggi dibanding ECMP di 91.10%. Artinya, PCC optimal saat kondisi jaringan ideal, namun lebih sensitif terhadap penurunan *bandwidth* dibanding ECMP.

TABEL 19

(Hasil analisis pengujian *throughput* pada teknik PCC)

		PCC					
Aplikasi	Status	Throughput (%)					
		10M	5M	2M	1M	512K	256K
Youtube	AA	97.68	53.35	86.81	69.37	85.20	80.25
	AL	91.99	93.06	93.65	92.50	86.04	80.24
	LA	93.76	93.06	93.30	93.19	85.62	78.52
Disney	AA	97.68	97.76	94.92	90.32	84.34	75.15
	AL	97.77	96.13	91.41	80.02	76.38	64.36
	LA	80.56	89.49	87.65	80.24	77.95	64.21
Catchplay	AA	98.68	97.44	73.76	94.10	88.92	84.61
	AL	98.71	97.54	95.81	92.26	85.38	77.77
	LA	96.62	96.21	94.47	90.44	85.40	48.34

Secara umum, ECMP lebih tahan terhadap kondisi *bandwidth* terbatas, sedangkan PCC unggul pada skenario optimal dengan *bandwidth* tinggi dan stabil.

I. Kategori *Quality of Service*

Untuk menyederhanakan interpretasi hasil pengujian, seluruh parameter *Quality of Service* (QoS) yang telah dianalisis yaitu *delay*, *jitter*, *packet loss*, dan *throughput* diolah menjadi indeks kategori. Penilaian dilakukan dengan mengonversi rata-rata dari keempat parameter tersebut ke dalam skala indeks, berdasarkan standar TIPHON: 1 untuk sangat baik, 2 untuk baik, 3 untuk sedang, dan 4 untuk buruk.

Berdasarkan hasil analisis, baik ECMP maupun PCC umumnya menghasilkan kategori QoS di tingkat 1 (sangat baik) hingga 2 (baik) untuk sebagian besar skenario. Pada kondisi *Active-Active* (AA), hampir semua aplikasi Youtube, Disney, dan Catchplay mendapatkan kategori 2 untuk ECMP maupun PCC, yang menunjukkan performa jaringan yang memuaskan.

Namun, pada skenario *Active-Loss* (AL) dan *Loss-Active* (LA), PCC lebih konsisten mempertahankan indeks kategori 1, sedangkan ECMP lebih sering turun ke indeks 2. Hal ini menunjukkan bahwa PCC lebih adaptif dalam menjaga kualitas layanan saat hanya satu ISP aktif.

TABEL 20

(Hasil indeks kategori pengujian QoS)

Aplikasi	Status	ECMP		PCC	
		Rata-rata	Kategori Indeks	Rata-rata	Kategori Indeks
Youtube	AA	2	2	2	2
	AL	1.75	1	1.75	1
	LA	1.75	1	1.75	1
Disney	AA	2	2	1.75	1
	AL	1.75	1	2	2
	LA	1.75	1	2	2
Catchplay	AA	1.75	1	1.75	1
	AL	2	2	1.75	1
	LA	2	2	2	2

Dengan demikian, dari sudut pandang kategori QoS keseluruhan, PCC memiliki keunggulan dalam menjaga performa stabil di kondisi jaringan tidak ideal, meskipun keduanya tetap berada dalam kategori layanan yang layak digunakan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan dan analisis data pengujian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Terdapat pertukaran (*trade-off*) performa yang jelas antara metode PCC dan ECMP. ECMP terbukti unggul dalam memaksimalkan kapasitas *throughput*, dengan mampu mencapai kecepatan gabungan 17 Mbps, secara signifikan lebih tinggi dibandingkan PCC yang mencapai 14 Mbps pada kondisi dua ISP aktif.
2. PCC menunjukkan keunggulan superior dalam hal stabilitas dan keandalan koneksi. Hal ini dibuktikan dengan performa *packet loss* yang lebih rendah, di mana PCC unggul di 5 dari 7 kategori *bandwidth* yang diuji. Selain itu, PCC juga lebih efektif dalam menjaga *delay* dan *jitter* pada level yang lebih rendah, terutama pada kondisi *bandwidth* ekstrem (sangat tinggi atau sangat rendah).
3. Kedua metode efektif dalam menangani skenario *failover*, namun dengan karakteristik berbeda. Waktu perpindahan jalur untuk keduanya berkisar antara 9 hingga 24 detik bergantung pada aplikasi. Akan tetapi, kemampuan PCC meminimalkan *packet loss* selama transisi menjadikannya pilihan yang lebih tangguh untuk jaringan yang menuntut ketersediaan layanan tanpa gangguan. Sebagai rekomendasi, ECMP cocok untuk jaringan simetris yang fokus pada kecepatan, sementara PCC adalah solusi ideal untuk jaringan yang memprioritaskan stabilitas koneksi.

REFERENSI

- [1] A. Collins, "Techniques for optimizing communication and bandwidth using MikroTik," EasyChair Preprint, 2024.
- [2] D. Dartono, U. Usanto, and D. Irawan, "Penerapan metode Per Connection Classifier (PCC) pada perancangan load balancing dengan router MikroTik," JEIS: Jurnal Elektro dan Informatika Swadharma, vol. 1, no. 1, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.56486/jeis.vol1no1.65>
- [3] R. N. Dasmen, A. Rohman Syarif, H. Saputra, and R. Amrullah, "Perancangan keamanan internet jaringan hotspot MikroTik pada Winbox dan Wireshark," DoubleClick, vol. 5, no. 2, pp. 71–79, 2022. [Online]. Available: <http://e-journal.unipma.ac.id/index.php/doubleclick>
- [4] R. Fahrizal, M. I. Santoso, and M. Z. Arifin, "Implementation Multipath Routing with Equal Cost Multipath (ECMP) and per Connection Classifier (PCC)," in Proc. 2nd Int. Conf. on Industrial Electrical and Electronics (ICIEE), 2020, pp. 169–173. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICIEE49813.2020.9277496>
- [5] G. Hatmono, "MABAR (Manajemen Bandwidth Router) RB750 SMP Negeri 2 Wonogiri menggunakan konfigurasi Winbox," SMP Negeri 2 Wonogiri, [Online]. Available: [Link not provided].
- [6] A. R. Hevner, S. T. March, J. Park, and S. Ram, "Design Science in Information Systems Research," MIS Quarterly, vol. 28, no. 1, pp. 75–105, 2004.
- [7] D. Macone, G. Oddi, A. Palo, and V. Suraci, "A dynamic load balancing algorithm for Quality of Service and mobility management in next generation home networks," Telecommunication Systems, vol. 53, no. 3, pp. 265–283, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11235-013-9697-y>
- [8] D. Novianto et al., "Comparative analysis of performance between ECMP and NTH methods in implementation of MikroTik-based dual link load balancing techniques," Technology Acceptance Model, vol. 12, no. 1, 2021.
- [9] M. Nurul Ilmi, Y. Salim, and E. I. Alwi, "Analisis perbandingan jaringan internet 4G LTE menggunakan metode Quality of Service (QoS)," Literatur Informatika & Komputer, vol. 1, no. 4, pp. 358–364, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33096/linier.vxix.xxxx>
- [10] B. Pourghebleh and V. Hayyolalam, "A comprehensive and systematic review of the load balancing mechanisms in the Internet of Things," Cluster Computing, vol. 23, no. 2, pp. 641–661, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10586-019-02950-0>
- [11] S. Prahara and I. Ali, "Optimalisasi jaringan internet dengan optimalisasi load balancing menggunakan parameter QoS (Studi Kasus: SMK Bina Warga Lemahabang)," Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika, vol. 7, no. 1, 2023.
- [12] A. B. Pratomo, "Pengembangan sistem firewall pada jaringan komputer berbasis MikroTik RouterOS," Bulletin of Network Engineer and Informatics, vol. 1, no. 2, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.59688/bufnets.v1i2.10>
- [13] T. Rahman, S. Sumarna, and H. Nurdin, "Analisis performa RouterOS MikroTik pada jaringan internet," INOVTEK Polbeng – Seri Informatika, vol. 5, no. 1, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35314/isi.v5i1.1308>
- [14] A. R. Sularso et al., "Analisis dan pengujian 3G dan 4G pada Internet Service Provider (ISP) Indosat dan Telkomsel dan optimalisasi Quality of Service (QoS)," Jurnal Rekayasa Teknologi Nusa Putra, vol. 2, no. 1, 2015.
- [15] R. Soepeno, "Wireshark: An effective tool for network analysis." [Online]. Available: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34444.69769>
- [16] I. W. Sudiartha, I. K. A. Permana, and Indriyani, "Analysis of services at ISP Internet Services Provider PT Supra Primatama Nusantara (Biznet Networks)." [Online]. Available: [Link not provided].
- [17] Telkom University Jakarta, "Jenis-jenis topologi jaringan komputer," Nov. 15, 2024. [Online]. Available: <https://jakarta.telkomuniversity.ac.id/jenis-jenis-topologi-jaringan-komputer/>
- [18] G. Zurita et al., "A bibliometric overview of the Journal of Network and Computer Applications between 1997 and 2019," Journal of Network and Computer Applications, vol. 165, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102695>