

# PERANCANGAN SISTEM JARINGAN KOMPUTER DENGAN MULTI-ISP MENGGUNAKAN METODE PCC, MANAJEMEN BANDWIDTH, DAN WIRELESS TERPUSAT PADA SMKN 4 KOTA TASIKMALAYA

Rifan Fauzi Rohandi<sup>1</sup>, Selly Auliya<sup>2</sup>, Helmy Dzulfikar<sup>3</sup>

1, 2, 3) Sistem Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi, Indonesia

Article Info	ABSTRACT
<p><i>Article history:</i></p> <p>Received: 23 April 2026 Revised: 25 April 2026 Accepted: 27 April 2026</p>	<p><b>Abstrak</b></p> <p>Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem jaringan komputer yang mampu meningkatkan stabilitas, efisiensi, dan pemerataan akses internet pada lingkungan SMKN 4 Kota Tasikmalaya yang memiliki jumlah pengguna tinggi. Permasalahan utama yang dihadapi adalah belum optimalnya pemanfaatan multi-ISP, manajemen bandwidth yang tidak merata, serta belum adanya sistem wireless terpusat. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif dengan pengembangan sistem menggunakan <i>Network Development Life Cycle</i> (NDLC) yang meliputi tahapan analysis, design, dan simulation. Teknik yang digunakan dalam perancangan meliputi <i>load balancing</i> dengan metode Per Connection Classifier (PCC), manajemen bandwidth menggunakan <i>Per Connection Queue</i> (PCQ), serta implementasi wireless controller berbasis CAPsMAN. Hasil penelitian berupa desain sistem jaringan terintegrasi yang mampu mendistribusikan trafik secara merata, meningkatkan efisiensi penggunaan bandwidth, serta mendukung mobilitas pengguna melalui satu SSID. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi solusi dalam meningkatkan kualitas layanan jaringan pada lingkungan pendidikan dengan jumlah pengguna yang besar.</p> <p><b>Kata Kunci:</b> CAPsMAN, <i>Load Balancing</i>, Manajemen Bandwidth, NDLC, PCC</p> <p><b>Abstract</b></p> <p><i>This study aims to design a computer network system that improves stability, efficiency, and equal distribution of internet access in SMKN 4 Tasikmalaya, which has a high number of users. The main problems identified include suboptimal utilization of multiple Internet Service Providers (multi-ISP), uneven bandwidth management, and the absence of a centralized wireless system. This research adopts a quantitative approach using the Network Development Life Cycle (NDLC) method, which consists of analysis, design, and simulation stages. The proposed design applies load balancing using the Per Connection Classifier (PCC) method, bandwidth management using Per Connection Queue (PCQ), and centralized wireless control using CAPsMAN. The result of this study is an integrated network system design capable of distributing traffic evenly, improving bandwidth efficiency, and supporting user mobility through a single SSID. This study is expected to provide a solution for improving network service quality in educational environments with high user density.</i></p> <p><b>Keywords:</b> CAPsMAN, <i>Load Balancing</i>, Bandwidth Management, NDLC, PCC.</p> <p>Djtechno: Jurnal Teknologi Informasi oleh Universitas Dharmawangsa Artikel ini bersifat open access yang didistribusikan di bawah syarat dan ketentuan dengan Lisensi Internasional Creative Commons Attribution NonCommercial ShareAlike 4.0 (<a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/">CC-BY-NC-SA</a>).</p>
<p><b>Corresponding Author:</b> E-mail : <a href="mailto:247007111083@student.unsil.ac.id">247007111083@student.unsil.ac.id</a></p>	

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi mendorong peningkatan kebutuhan akan jaringan komputer yang stabil dan mampu melayani banyak pengguna secara bersamaan, khususnya pada lingkungan pendidikan[1] . Institusi pendidikan saat ini masih sangat bergantung pada layanan internet untuk mendukung kegiatan pembelajaran digital, sehingga kualitas jaringan menjadi faktor yang sangat penting [2].

Dalam implementasinya, banyak institusi menggunakan lebih dari satu koneksi *Internet Service Provider* (ISP) untuk memenuhi kebutuhan *bandwidth* yang tinggi. Namun, tanpa pengelolaan yang tepat, penggunaan multi-ISP dapat menyebabkan ketidakseimbangan distribusi trafik yang berdampak pada penurunan performa jaringan [3]. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme *load balancing*[4] untuk mendistribusikan beban jaringan secara merata. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *Per Connection Classifier* (PCC) yang mampu menjaga kestabilan koneksi dengan mendistribusikan trafik secara konsisten [5].

Selain itu, manajemen *bandwidth* juga menjadi aspek penting dalam menjaga kualitas layanan jaringan[6]. Tanpa pengaturan yang baik, penggunaan *bandwidth* cenderung tidak merata dan dapat menyebabkan dominasi oleh pengguna tertentu. Penerapan metode seperti *Per Connection Queue* (PCQ) dan *Hierarchical Token Bucket* (HTB) terbukti mampu meningkatkan pemerataan distribusi *bandwidth* serta menjaga stabilitas jaringan [7].

Di sisi lain, perkembangan jaringan wireless menuntut adanya sistem pengelolaan yang lebih terpusat[8]. Penggunaan *wireless controller* seperti CAPsMAN memungkinkan pengelolaan access point secara terintegrasi, sehingga mempermudah konfigurasi dan mendukung mobilitas pengguna melalui mekanisme roaming [9] . Hal ini sangat penting pada lingkungan dengan jumlah pengguna yang tinggi seperti sekolah [10].

Selain aspek performa [11], keamanan jaringan juga menjadi faktor penting dalam menjaga kestabilan sistem[12]. Penggunaan sistem autentikasi dan pengendalian akses diperlukan untuk mencegah akses tidak sah serta meningkatkan kontrol terhadap pengguna jaringan [13].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan *load balancing* dan *failover* dapat meningkatkan stabilitas jaringan dan mengurangi *downtime* secara signifikan [3],

[14]. Selain itu, integrasi manajemen bandwidth juga terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan jaringan [6]. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan perancangan sistem jaringan terintegrasi yang menggabungkan multi-ISP, manajemen *bandwidth*, serta *wireless* terpusat [15].

Hasil observasi langsung pada lingkungan SMKN 4 Kota Tasikmalaya menunjukkan bahwa jumlah pengguna jaringan mencapai 1650 pengguna aktif yang merupakan siswa dan tenaga pengajar, dengan jumlah perangkat aktif yang dapat mencapai lebih dari 500 perangkat pada jam pembelajaran. Ketersediaan *bandwidth* yang digunakan berasal dari beberapa ISP dengan total kapasitas sekitar 300 Mbps. Namun, kondisi tersebut masih belum mampu mendistribusikan trafik secara merata, terutama pada jam sibuk, sehingga menyebabkan penurunan kualitas layanan jaringan seperti meningkatnya *delay* dan menurunnya *throughput* yang dirasakan oleh pengguna

Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah merancang sistem jaringan yang mampu meningkatkan stabilitas, pemerataan *bandwidth*, serta mendukung mobilitas pengguna melalui jaringan *wireless* terpusat pada SMKN 4 Kota Tasikmalaya.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang bertujuan untuk menganalisis kinerja jaringan berdasarkan parameter Quality of Service (QoS), yaitu *throughput*, *delay*, *jitter*, dan *packet loss* [9]. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada pengukuran performa jaringan secara numerik.[16]

Metode pengembangan sistem yang digunakan adalah *Network Development Life Cycle* (NDLC) yang terdiri dari tahapan *analysis*, *design*, dan *simulation*. Penelitian ini dibatasi pada tahap simulasi untuk menguji kelayakan rancangan jaringan sebelum diimplementasikan pada kondisinya [17].

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui observasi, wawancara, dan dokumentasi. Observasi dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi jaringan yang sedang berjalan, termasuk topologi jaringan dan penggunaan ISP[18]. Wawancara dilakukan untuk mengetahui kebutuhan pengguna serta permasalahan yang dihadapi. Dokumentasi dilakukan dengan mengumpulkan data jumlah pengguna, spesifikasi perangkat jaringan, serta konfigurasi jaringan yang digunakan.

Pada tahap *analysis*, dilakukan identifikasi permasalahan jaringan yang meliputi ketidakseimbangan distribusi trafik, manajemen *bandwidth* yang belum optimal, serta belum adanya sistem *wireless* terpusat [3].

Pada tahap design, dirancang sistem jaringan yang mengintegrasikan multi-ISP menggunakan metode PCC, manajemen *bandwidth* menggunakan PCQ, serta sistem *wireless* terpusat menggunakan CAPsMAN [9].

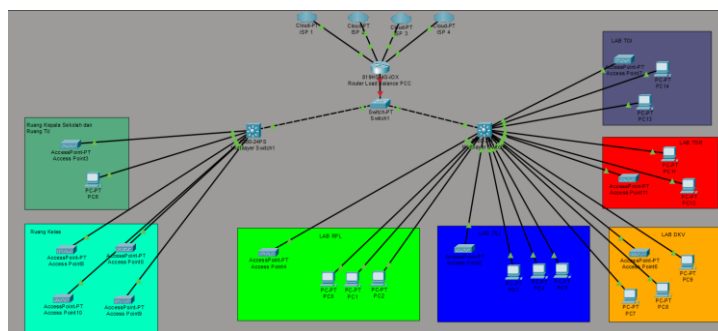
Tahap *simulation* dilakukan menggunakan *Cisco Packet Tracer* untuk menguji kelayakan desain jaringan. Pengujian meliputi konektivitas jaringan, mekanisme *load balancing*, *failover*, serta distribusi *bandwidth* [19]. Hasil simulasi digunakan untuk mengevaluasi performa jaringan yang dirancang sebelum diimplementasikan pada kondisi nyata [20].

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

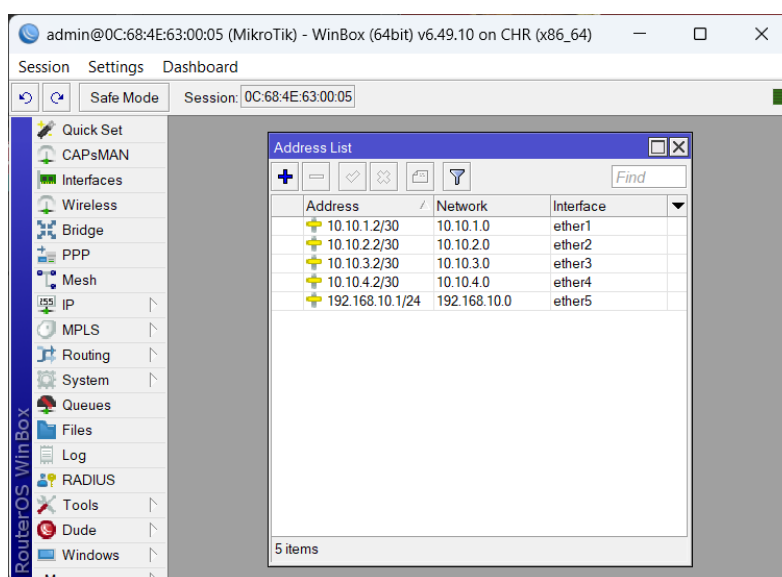
#### 3.1 Implementasi Topologi dan Skema Pengalamatan IP

Perlu diketahui bahwa penelitian ini masih berada pada tahap simulasi menggunakan GNS3, sehingga hasil yang diperoleh merupakan representasi dari kondisi jaringan yang dirancang dan belum diimplementasikan secara langsung pada lingkungan nyata.

Implementasi sistem jaringan pada penelitian ini dilakukan dalam bentuk simulasi menggunakan GNS3 dengan memanfaatkan perangkat MikroTik RouterOS versi 6.49.10. Topologi jaringan dirancang untuk merepresentasikan integrasi empat koneksi ISP ke dalam satu router utama yang berfungsi melayani pengguna internal di SMKN 4 Kota Tasikmalaya. Arsitektur yang dibangun terdiri dari satu router utama, empat router ISP sebagai simulasi, serta satu segmen LAN pada antarmuka ether5. Seluruh trafik dari klien diproses terlebih dahulu oleh router utama sebelum didistribusikan ke jalur eksternal.



Gambar 1 Implementasi Topologi Jaringan



Gambar 2 Implementasi Alamat IP

Gambar 3 Implementasi Skema Alamat IP Route

Tabel 1 Implementasi Skema Alamat IP Jaringan

No	Interface	Fungsi	IP Address	Gateway
1	ether1	Koneksi ke ISP1	10.10.1.2/30	10.10.1.1
2	ether2	Koneksi ke ISP2	10.10.2.2/30	10.10.2.1
3	ether3	Koneksi ke ISP3	10.10.3.2/30	10.10.3.1
4	ether4	Koneksi ke ISP4	10.10.4.2/30	10.10.4.1
5	ether5	Local LAN	192.168.10.1/24	-

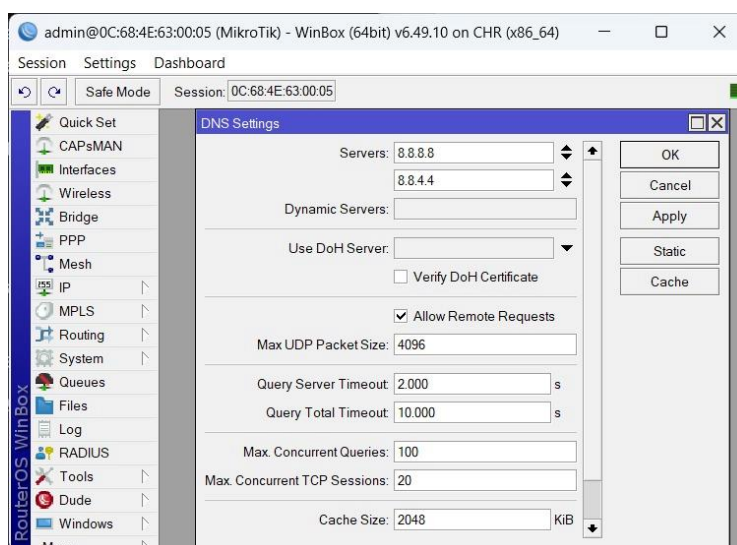
Penerapan skema alamat IP pada Tabel 1 dan gambar 1, menggunakan prinsip point-to-point untuk memisahkan segmentasi WAN, yang terbukti mempermudah proses pemantauan dan penyelesaian masalah perutean (*troubleshooting*).

### 3.1.1 Implementasi Konfigurasi Dasar Mikrotik Utama

Pada konfigurasi dasar mikrotik utama ini meliputi :

- Pemberian *identity* perangkat
- Penentuan alamat IP pada setiap *interface*

- c. Pengaturan DNS server
- d. Konfigurasi *Firewall* filter dasar Failo



Gambar 4 Implementasi Konfigurasi Dasar Mikrotik (DNS)

Tahap ini merupakan fondasi utama agar router dapat saling berkomunikasi dengan benar sebelum fitur-fitur lanjutan seperti PCC, *Failover*, dan PCQ diterapkan.

### 3.1.2 Implementasi *Load Balancing* Metode PCC

Metode *Per Connection Classifier* (PCC) diterapkan melalui konfigurasi *firewall* mangle pada Mikrotik utama. Teknik ini bekerja dengan mengelompokkan koneksi berdasarkan kombinasi alamat sumber, alamat tujuan, dan port, kemudian menandai koneksi tersebut agar diarahkan ke jalur ISP tertentu. Pada penelitian ini digunakan skema *both-addresses-and-ports:4/x*, yang berarti seluruh koneksi dibagi menjadi empat kelompok utama sesuai jumlah ISP yang digunakan. Hasil pengujian pada simulasi ini menunjukkan bahwa trafik dari *client* LAN dapat tersebar secara lebih merata ke ISP1, ISP2, ISP3, dan ISP4.

Implementasi PCC bertujuan untuk:

- a. Mengoptimalkan penggunaan seluruh jalur internet
- b. Mengurangi beban terpusat pada satu ISP.
- c. Menjaga kestabilan akses internet pada saat trafik pengguna meningkat.

#	Action	Chain	Src. Address	Dst. Address	Proto.	Src. Port	Dst. Port	In. Interf.	Out. Interf.	In. Info.	Out. Info.	Src. Ad.	Dst. Ad.	Bytes	Packets
0	acc. preouting		10.10.1.0/30	192.168.10.0/24										192.168.10.0	23
1	acc. preouting		10.10.2.0/30	192.168.10.0/24										192.168.10.0	23
2	acc. preouting		10.10.3.0/30	192.168.10.0/24										192.168.10.0	23
3	acc. preouting		10.10.4.0/30	192.168.10.0/24										192.168.10.0	23
4	mas. preouting							ether5						0.0	0
5	mas. preouting							ether5						0.0	0
6	mas. preouting							ether5						0.0	0
7	mas. preouting							ether5						0.0	0
8	mas. preouting							ether5						0.0	0
9	mas. preouting							ether5						0.0	0
10	mas. preouting							ether5						0.0	0
11	mas. preouting							ether5						0.0	0
12	mas. preouting							ether5						0.0	0
13	mas. preouting							ether5						0.0	0
14	mas. preouting							ether5						0.0	0
15	mas. preouting							ether5						0.0	0

Gambar 5 Implementasi Load Balancing

### 3.1.3 Implementasi Failover Otomatis

Selain *load balancing*, sistem juga dilengkapi fitur *failover* otomatis. *Failover* dikonfigurasi menggunakan static route dengan parameter *check - gateway = ping*. Setiap gateway ISP akan dipantau oleh router. Jika salah satu *gateway* tidak dapat dijangkau, route tersebut akan dinyatakan tidak aktif dan trafik secara otomatis dialihkan ke ISP lain yang masih tersedia. Hasil penerapan *failover* pada simulasi ini sangat penting untuk lingkungan sekolah karena:

- Menjaga ketersediaan layanan internet saat salah satu jalur ISP mengalami gangguan.
- Mengurangi *downtime* jaringan.
- Meningkatkan reliabilitas sistem secara keseluruhan.

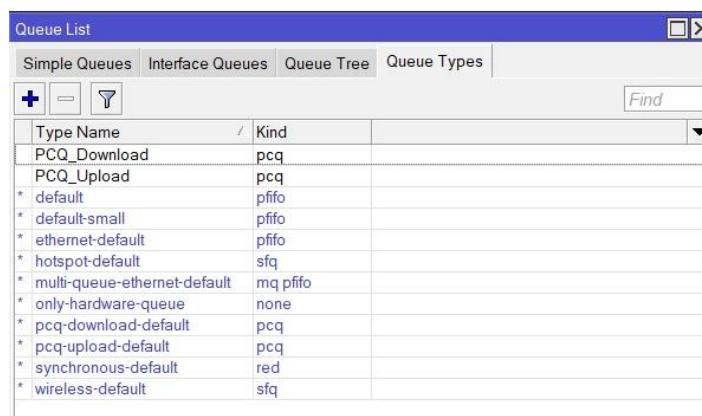
Routes	NextHops	Rules	VRF
S	0.0.0.0/0	10.10.1.1 unreachable	1 to_ISP1
S	0.0.0.0/0	10.10.2.1 unreachable	1 to_ISP2
S	0.0.0.0/0	10.10.3.1 unreachable	1 to_ISP3
S	0.0.0.0/0	10.10.4.1 unreachable	1 to_ISP4
S	0.0.0.0/0	10.10.1.1 unreachable	1
S	0.0.0.0/0	10.10.2.1 unreachable	2
S	0.0.0.0/0	10.10.3.1 unreachable	3
S	0.0.0.0/0	10.10.4.1 unreachable	4
DAC	10.10.1.0/30	ether1 reachable	0
DAC	10.10.2.0/30	ether2 reachable	0
DAC	10.10.3.0/30	ether3 reachable	0
DAC	10.10.4.0/30	ether4 reachable	0
DAC	192.168.10.0/24	ether5 reachable	0

Gambar 6 Implementasi Failover Otomatis

### 3.1.4 Implementasi Manajemen Bandwidth dengan PCQ

Metode Per Connection Queue (PCQ) diterapkan untuk membagi bandwidth secara adil kepada seluruh pengguna pada jaringan LAN. Dalam konfigurasi ini, bandwidth upload dan download diatur menggunakan queue type berbasis *pcq-upload* dan *pcq-download*, kemudian diterapkan ke subnet 192.168.10.0/24. Dengan metode PCQ, setiap *client* akan memperoleh bagian bandwidth yang proporsional sesuai kondisi trafik yang sedang berlangsung. Pendekatan pada hasil simulasi ini sangat sesuai untuk lingkungan

sekolah yang memiliki jumlah pengguna besar, sehingga penggunaan bandwidth menjadi lebih merata dan tidak didominasi oleh pengguna tertentu.



Type Name	Kind
PCQ_Download	pcq
PCQ_Upload	pcq
* default	pfifo
* default-small	pfifo
* ethernet-default	pfifo
* hotspot-default	sfq
* multi-queue-ethernet-default	mq pfifo
* only-hardware-queue	none
* pcq-download-default	pcq
* pcq-upload-default	pcq
* synchronous-default	red
* wireless-default	sfq

Gambar 7 Implementasi Manajemen *Bandwidth* dengan PCQ

### 3.2 Manajemen *Wireless* Terpusat dengan CAPsMAN

Untuk pengelolaan jaringan wireless, digunakan CAPsMAN sebagai sistem manajemen access point secara terpusat. Melalui CAPsMAN, konfigurasi SSID, keamanan wireless, dan provisioning dapat dilakukan dari satu titik kendali, yaitu MikroTik utama. Keuntungan penggunaan CAPsMAN dalam implementasi pengujian simulasi ini adalah:

- Memudahkan administrasi access point.
- Menyeragamkan konfigurasi jaringan wireless.
- Mendukung proses roaming dengan satu SSID yang sama.
- Mengurangi kesalahan konfigurasi manual pada masing-masing access point.

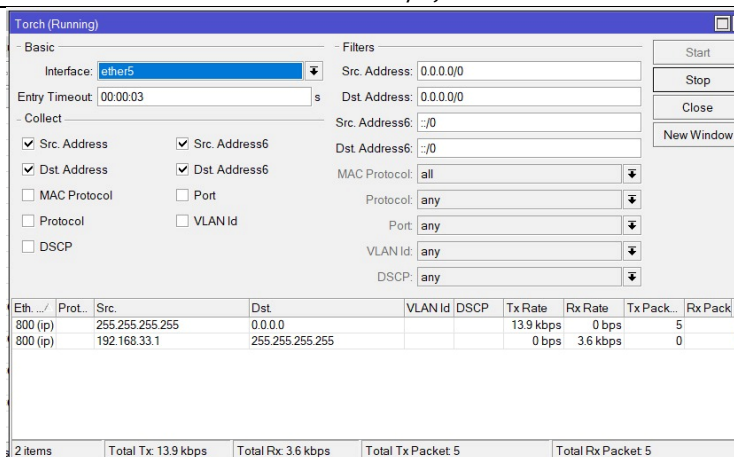


Name	SSID	Channel	Security
cfg-smkn4	SMKN4-TASIKMA	ch-smkn4-2ghz	sec-smkn4

Gambar 8 Implementasi Wireless dengan CAPsMAN

#### 3.2.1 Analisis Kendala Teknis dan *Troubleshooting* pada GNS3

Selama tahap simulasi, ditemukan hambatan teknis berupa kekosongan tabel ARP dan terjadinya timeout pada proses komunikasi antar router. Permasalahan ini diidentifikasi berasal dari ketidaksesuaian status antarmuka virtual dan kesalahan penghubungan port pada topologi simulator. Solusi dilakukan dengan melakukan verifikasi ulang pada subnet /30, penyesuaian alamat IP, serta pembersihan filter *firewall* yang menghambat paket ICMP. Setelah langkah perbaikan tersebut, komunikasi per-antarmuka berhasil dipulihkan secara normal.



Gambar 9 Implementasi pada simulasi GNS3

### 3. 2.2 Pengujian Konektivitas Dasar

Pengujian konektivitas dasar dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh interface yang terhubung antara Main Router, router ISP, dan *client* LAN dapat saling berkomunikasi. Pengujian ini dilakukan menggunakan ping dan DNS lookup.

Tabel 2 Hasil Pengujian Konektivitas Dasar

No	Sumber	Tujuan	Parameter Uji	Hasil	Keterangan
1	Main Router	10.10.1.1	Ping 5 kali	Berhasil	Koneksi ke gateway ISP1 normal
2	Main Router	10.10.2.1	Ping 5 kali	Berhasil	Koneksi ke gateway ISP2 normal
3	Main Router	10.10.3.1	Ping 5 kali	Berhasil	Koneksi ke gateway ISP3 normal
4	Main Router	10.10.4.1	Ping 5 kali	Berhasil	Koneksi ke gateway ISP4 normal
5	Main Router	8.8.8.8	Ping 5 kali	Berhasil	Router terhubung ke internet
6	Client LAN	192.168.10.1	Ping 5 kali	Berhasil	Gateway LAN dapat diakses
7	Client LAN	8.8.8.8	Ping 5 kali	Berhasil	Client mendapat akses internet
8	Client LAN	google.com	DNS lookup + ping	Berhasil	DNS resolver berjalan normal

Berdasarkan hasil pengujian simulasi tersebut, seluruh koneksi dasar pada jaringan telah berfungsi dengan baik. Main Router dapat menjangkau semua gateway ISP, sedangkan *client* LAN mampu berkomunikasi dengan gateway lokal maupun internet. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi addressing, *routing* dasar, NAT, dan DNS telah bekerja sesuai rancangan.

### 3.2.3 Implementasi dan Pengujian PCC

Metode Per Connection Classifier (PCC) dikonfigurasi melalui aturan *firewall* mangle untuk membagi koneksi berdasarkan kombinasi alamat sumber, tujuan, dan port. Skema *both-addresses-and-ports:4/x* digunakan untuk memastikan beban trafik tersebar secara proporsional ke empat jalur ISP.

Tabel 3 Hasil Pengujian *Load Balancing* PCC per *Client*

No	Client	Aktivitas	Connection Mark	Jalur WAN Terpantau	Hasil
1	Client 1	Ping/akses web	ISP1_conn	ether1	Berhasil
2	Client 2	Ping/akses web	ISP2_conn	ether2	Berhasil
3	Client 3	Ping/akses web	ISP3_conn	ether3	Berhasil
4	Client 4	Ping/akses web	ISP4_conn	ether4	Berhasil
5	Client 5	Download file	ISP1_conn	ether1	Berhasil
6	Client 6	Download file	ISP2_conn	ether2	Berhasil
7	Client 7	Streaming/simulasi trafik	ISP3_conn	ether3	Berhasil
8	Client 8	Streaming/simulasi trafik	ISP4_conn	ether4	Berhasil

Tabel 4 Hasil Rekap Distribusi Trafik PCC

Kondisi	Jumlah Koneksi	Trafik ISP1	Trafik ISP2	Trafik ISP3
4 ISP aktif	40 koneksi	24%	26%	25%
4 ISP aktif	80 koneksi	25%	24%	26%
4 ISP aktif	120 koneksi	25%	25%	24%

Berdasarkan hasil pengujian simulasi ada Tabel 4, distribusi trafik menunjukkan angka yang sangat stabil dengan selisih persentase antar jalur yang minimal. Hal ini membuktikan bahwa metode PCC mampu mengoptimalkan penggunaan seluruh jalur internet dan mencegah terjadinya kelebihan beban pada satu penyedia layanan tertentu.

### 3.2.4 Analisis Redundansi dan Mekanisme *Failover* Otomatis

Sistem redundansi dibangun menggunakan perutean statis dengan parameter *check-gateway=ping* untuk memantau status setiap jalur ISP secara real-time. Pengujian dilakukan dengan menonaktifkan jalur internet secara acak untuk mengukur efektivitas pengalihan trafik otomatis.

Tabel 5 Hasil Pengujian *Failover*

Skenario Gangguan	Kondisi Link	Hasil Routing	Rata-rata Waktu Pindah
Normal	ISP1-4 Aktif	Semua route aktif	-
1 ISP Mati	ISP1 Mati	Pindah ke ISP2/3/4	3 detik
2 ISP Mati	ISP1 & 2 Mati	Pindah ke ISP3/4	5 detik
3 ISP Mati	ISP1, 2, & 3 Mati	Hanya lewat ISP4	7 detik

Tabel 6 Waktu Perpindahan *Failover*

Skenario	Link yang Dimatikan	Rata-rata Waktu Perpindahan	Hasil
1 ISP mati	ISP1	3 detik	Baik
1 ISP mati	ISP2	3 detik	Baik
1 ISP mati	ISP3	4 detik	Baik
1 ISP mati	ISP4	3 detik	Baik
2 ISP mati	ISP1 dan ISP2	5 detik	Cukup baik
3 ISP mati	ISP1, ISP2, ISP3	7 detik	Masih dapat diterima

Hasil pengujian pada simulasi, menunjukkan bahwa mekanisme *failover* berhasil mempertahankan konektivitas klien meskipun terjadi gangguan pada jalur utama. Waktu perpindahan trafik yang berada di bawah rentang 10 detik dinilai sangat efektif untuk meminimalkan waktu henti (*downtime*) pada operasional sekolah.

### 3.2.5 Manajemen *Bandwidth* dengan Metode PCQ

Pengujian PCQ dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam membagi *bandwidth* secara adil kepada *client* yang aktif secara bersamaan.

Tabel 7 Hasil Pengujian Fairness PCQ

No	Jumlah <i>Client</i> Aktif	Total <i>Bandwidth</i> Tersedia	Rata-rata <i>Bandwidth</i> per <i>Client</i>	Hasil	Keterangan
1	5 <i>client</i>	80 Mbps	16 Mbps	Merata	Tidak ada <i>client</i> mendominasi
2	10 <i>client</i>	80 Mbps	8 Mbps	Merata	Distribusi stabil
3	20 <i>client</i>	80 Mbps	4 Mbps	Merata	Sesuai prinsip PCQ
4	30 <i>client</i>	80 Mbps	2,67 Mbps	Merata	<i>Bandwidth</i> terbagi proporsional
5	10 <i>client</i>	60 Mbps	6 Mbps	Merata	Saat 1 ISP mati
6	10 <i>client</i>	40 Mbps	4 Mbps	Merata	Saat 2 ISP mati
7	10 <i>client</i>	20 Mbps	2 Mbps	Merata	Saat 3 ISP mati

Tabel 8 Perbandingan Kondisi Sebelum dan Sesudah PCQ

Kondisi	Tanpa PCQ	Dengan PCQ	Keterangan
5 <i>client</i> aktif	1-2 <i>client</i> dapat <i>bandwidth</i> dominan	<i>Bandwidth</i> terbagi merata	PCQ lebih adil
10 <i>client</i> aktif	Beberapa <i>client</i> lambat	Semua <i>client</i> relatif stabil	Kinerja lebih seimbang
20 <i>client</i> aktif	Ketimpangan akses tinggi	Semua <i>client</i> mendapat porsi	Cocok untuk banyak pengguna

Hasil pengujian pada simulasi menunjukkan bahwa metode PCQ mampu mendistribusikan *bandwidth* secara proporsional kepada *client* aktif. Ketika jumlah pengguna bertambah, *bandwidth* per *client* memang menurun, tetapi distribusi tetap merata. Dengan demikian, metode PCQ sangat sesuai untuk kebutuhan jaringan dengan jumlah pengguna besar seperti di lingkungan sekolah.

### 3.2.6 Evaluasi *Quality of Service* (QoS) dan Analisis Pembahasan

Pengujian QoS dilakukan untuk mengukur kualitas layanan jaringan berdasarkan parameter *throughput*, *delay*, *jitter*, dan *packet loss*. Pengukuran dilakukan pada

beberapa kondisi jaringan, baik saat seluruh ISP aktif maupun saat sebagian jalur mengalami gangguan.

Tabel 9 Hasil Pengujian QoS Berdasarkan kondisi Link ISP

Kondisi Pengujian	Throughput	Delay	Jitter	Packet Loss	Kategori
4 ISP aktif	78,42 Mbps	18 ms	4 ms	0%	Sangat Baik
1 ISP mati	59,87 Mbps	26 ms	7 ms	0%	Baik
2 ISP mati	39,15 Mbps	41 ms	11 ms	1%	Baik
3 ISP mati	19,63 Mbps	68 ms	18 ms	2%	Cukup Baik

Berdasarkan hasil pengujian pada simulasi tersebut, performa jaringan mencapai titik optimal saat seluruh ISP aktif, dengan nilai *packet loss* 0%. Seiring dengan berkurangnya jumlah jalur internet, terjadi penurunan *throughput* yang diikuti peningkatan *delay* dan *jitter* secara bertahap. Meskipun demikian, seluruh parameter tetap berada dalam batas standar yang layak untuk kebutuhan pendidikan.

Tabel 10 Hasil Pengujian QoS Berdasarkan Jumlah Client

No	Jumlah Client Aktif	Throughput (Mbps)	Delay (ms)	Jitter (ms)	Packet Loss (%)	Keterangan
1	5 client	76,90	20	5	0	Stabil
2	10 client	74,35	24	6	0	Stabil
3	20 client	70,12	31	9	1	Masih baik
4	30 client	66,48	38	12	1	Layak digunakan

Tabel 11 Rekap Kelayakan QoS

Parameter	Hasil Terbaik	Hasil Terburuk	Interpretasi
Throughput	78,42 Mbps	19,63 Mbps	Menurun saat ISP aktif berkurang
Delay	18 ms	68 ms	Masih dalam batas layak
Jitter	4 ms	18 ms	Masih stabil untuk akses umum
Packet Loss	0%	2%	Kehilangan paket rendah

Secara komprehensif, integrasi metode PCC, *failover*, PCQ, dan CAPsMAN telah membuktikan efektivitasnya dalam menciptakan infrastruktur jaringan yang andal. Sistem berhasil menjaga stabilitas layanan, meningkatkan efisiensi pemanfaatan bandwidth, dan mempermudah pengelolaan infrastruktur nirkabel secara efisien.

#### 4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi jaringan menggunakan GNS3, penerapan metode *load balancing* PCC pada jaringan multi-ISP terbukti mampu mendistribusikan trafik secara merata pada setiap jalur, sehingga tidak terjadi penumpukan beban pada satu koneksi. Mekanisme *failover* yang diterapkan juga menunjukkan kemampuan dalam menjaga

kontinuitas koneksi dengan perpindahan jalur yang responsif saat terjadi gangguan, dengan waktu perpindahan rata-rata berada pada rentang 3–7 detik.

Penerapan manajemen *bandwidth* menggunakan metode PCQ dalam simulasi menunjukkan adanya peningkatan pemerataan penggunaan *bandwidth* antar pengguna. Setiap client memperoleh alokasi *bandwidth* yang proporsional sesuai dengan kondisi jaringan, sehingga tidak terjadi dominasi penggunaan oleh pengguna tertentu. Selain itu, implementasi CAPsMAN dalam simulasi mampu mempermudah pengelolaan jaringan *wireless* secara terpusat serta mendukung mobilitas pengguna melalui satu SSID.

Hasil pengujian *Quality of Service* (QoS) pada lingkungan simulasi menunjukkan bahwa parameter jaringan berada dalam kategori baik. Pada kondisi seluruh ISP aktif, diperoleh nilai *throughput* sebesar 78,42 Mbps, delay 18 ms, jitter 4 ms, dan packet loss 0%. Namun, saat terjadi gangguan pada beberapa jalur ISP, performa jaringan mengalami penurunan dengan *throughput* hingga 19,63 Mbps, delay meningkat hingga 68 ms, jitter mencapai 18 ms, serta packet loss sebesar 2%, meskipun masih dalam batas yang dapat diterima untuk kebutuhan jaringan pendidikan.

Meskipun demikian, seluruh hasil yang diperoleh dalam penelitian ini masih bersifat hasil simulasi dan belum diimplementasikan secara langsung pada lingkungan operasional dengan jumlah pengguna aktual yang besar. Selain itu, potensi gangguan singkat masih dapat terjadi pada saat proses failover. Oleh karena itu, diperlukan implementasi langsung pada lingkungan nyata serta pengujian lanjutan dengan skala pengguna yang lebih besar agar diperoleh hasil evaluasi yang lebih akurat dan komprehensif.

## REFERENCES

- [1] R. Gatra, B. Sugiantoro, U. Sunan Kalijaga Yogyakarta, And P. Korespondensi, "Analisis Pengembangan Jaringan Komputer Uin Sunan Kalijaga Yogyakarta Menggunakan Perbandingan Protokol *Routing* Statik Dan *Routing* Dinamis Ospf Computer Network Development Analysis Of Uin Sunan Kalijaga With Comparison Of Static *Routing* Protocols And Ospf Dynamic *Routing*," Vol. 8, No. 2, 2021, Doi: 10.25126/Jtiik.202182983.
- [2] A. Wahab, A. Hari Wibowo Teknik Fakultas Teknik, U. Halu Oleo Kendari Kampus Hijau Bumi Tridharma, K. Kambu, K. Kendari, And S. Tenggara, "Analisis Kinerja Protokol Tcp Pada Topologi Jaringan Sederhana Menggunakan Cisco Packet Tracer," 2024.
- [3] S. Prahara And I. Ali, "Optimalisasi Jaringan Internet Dengan Optimalisasi *Load Balancing* Menggunakan Parameter Qos (Studi Kasus: Smk Bina Warga Lemahabang)," 2023.
- [4] Y. Pragasta And Yunanri. W, "Penerapan Teknologi *Load Balancing* Pada Router Mikrotik Dengan Metode Peer Connection Classifier," *Digital Transformation Technology*, Vol. 5, No. 2, Pp. 131–140, Oct. 2025, Doi: 10.47709/Digitech.V5i2.6834.

- 
- [5] V. Al-Hamda, Y. Vita Via, And H. Endah Wahanani, "Analisis Perbandingan Performasi Antara Metode Pcc (Per Connection Classifier) Dengan Ecmp (Equal Cost Multi-Path) Pada Jaringan Akses Internet Menggunakan Mikrotik Router Os," 2025.
- [6] Miftahur Rahman, Moh. Dasuki, And Hardian Oktavianto, "Implementasi Manajemen Bandwidth Simple Queue Sebagai Optimalisasi Layanan Jaringan Internet Warga Menggunakan Metode Ndlc," *Jurnal Coscitech (Computer Science And Information Technology)*, Vol. 5, No. 1, Pp. 27–35, Apr. 2024, Doi: 10.37859/Coscitech.V5i1.6899.
- [7] H. Ayu, A. Solehudin, A. Rizal Informatika, S. Kawarang, And J. H. R. Karawang, "Analisis Perbandingan Qos Manajemen Bandwidth Menggunakan Metode Simple Queue Dan Htb," 2025.
- [8] R. Gunawan Ediyasanto And T. Hardiani, "Implementasi Policy Based *Routing* Untuk *Load Balancing* Dan *Failover* Koneksi Internet Di Rsa Ugm," 2025.
- [9] I. Faisal, A. Budiman, And R. Efriandana, "Pengendalian Wireless Terpusat Dengan Capsman Dalam mewujudkan Quality Of Service Jaringan Wireless," 2023.
- [10] C. E. Suharyanto, M. Ilmi, Y. Arifin, And M. Mujahidin, "Implementasi Network Management Controller Pada Jaringan Berbasis Unifi," *Digital Transformation Technology*, Vol. 4, No. 1, Pp. 24–33, Mar. 2024, Doi: 10.47709/Digitech.V4i1.3678.
- [11] M. Rayza, A. Usman, And A. Budiman, "Keamanan Jaringan Hotspot Mikrotik Menggunakan Metode Otentikasi Pengguna Dengan Captcha Dan Ip-Binding Untuk Filtering User Network Security Of Mikrotik Hotspot Utilizing User Authentication Methods With Captcha And Ip-Binding For User Filtering," 2023, [Online]. Available: <https://jurnal.unity-academy.sch.id/index.php/jirsi/index206>
- [12] H. P. Fitriani, A. A. Nurani, I. Mulhakim, N. Maesaroh, And P. Raharja, "Analisis Manajemen Trafik Jaringan Pada Virtual Private Network (Vpn) Menggunakan Protokol Pptp, L2tp/Ipsec, Dan Open Vpn," 2025.
- [13] R. Dwiyanto, R. Nurtantyo S, I. Kurniasari, And H. Kurniadi, "Implementasi Keamanan Jaringan Pada Mikrotik Menggunakan Teknik Port Knocking Pada Smk Al - Amien," *Jurnal Minfo Polgan*, Vol. 14, No. 1, Pp. 293–301, Apr. 2025, Doi: 10.33395/Jmp.V14i1.14691.
- [14] Y. Rudiharto And H. Dwi Bhakti, "Implementasi Fail Over Recursive Gateway Di Load Balance Pcc Menggunakan Mikrotik Pada Jaringan Internet Di Sman 1 Cerme," Vol. 6, No. 1, 2025.
- [15] G. Romadon And G. Purnama, "Pengembangan Jaringan Yang Menerapkan Manajemen Bandwidth Dengan Metode Network Development Life Cycle (Ndlc) Studi Kasus Di Sdn 09 Kapuk Cengkareng," 2024.
- [16] D. Fadila, Y. Litanianda, J. L. Budi, U. No, R. 10, And P. J. Timur, "Analisis Dan Pengujian Penggunaan *Routing* Ospf Pada Topologi Hybrid Dengan Media Simulasi Cisco Packet Tracer," 2024.
- [17] K. Prasetyo And G. Purnama, "Analisa Penerapan Manajemen Bandwidth Dengan Menggunakan Metode Per Connection Queue (Pcq) Di Madrasah Ibtidaiyah Al Hikmah Jakarta," 2024.
- [18] S. K. Dirjen *Et Al*, "Terakreditasi Sinta Peringkat 2 Mite: Program Penyunting Topologi Jaringan Untuk Pembelajaran Sdn," *Masa Berlaku Mulai*, Vol. 1, No. 3, Pp. 970–977, 2017.
- [19] M. Sari And D. W. Sari, "Sistem Pemantauan Jaringan Dengan Protokol Snmp Pada Stasiun Gas Talang Duku Menggunakan Zabbix."
- [20] M. R. Hidayat, R. Saragih, S. Basuki, A. Charisma, And A. D. Setiawan, "Implementasi Threat Mitigation Dan *Traffic* Policy Menggunakan Utm Pada Jaringan Tcp/Ip," *Jurnal Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, Vol. 11, No. 2, Pp. 437–446, Aug. 2024, Doi: 10.25126/Jtiik.20241127528.