

ANALISIS PERBANDINGAN METODE LOAD BALANCING PCC (PER CONNECTION CLASSIFIER) DAN NTH PADA GATEWAY JARINGAN KAMPUS UNTUK OPTIMALISASI KETERSEDIAAN LAYANAN AKADEMIK DI LINGKUNGAN PERGURUAN TINGGI

Mochamad Catur Nurhidayad, Asfan Muqtadir, Andy Haryoko

Universitas PGRI Ronggolawe, Tuban, Indonesia

caturnurhidayad17@gmail.com

ABSTRAK

Transformasi digital di perguruan tinggi meningkatkan ketergantungan sivitas akademik pada layanan jaringan seperti Sistem Informasi Akademik dan *Learning Management System*. Keterbatasan bandwidth serta lonjakan trafik saat jam operasional kampus memerlukan solusi *load balancing* pada gateway jaringan guna menjaga kelancaran akses. Penelitian ini menganalisis dan membandingkan kinerja dua metode *load balancing*, yaitu *Per Connection Classifier* dan *Nth*, untuk mengoptimalkan ketersediaan layanan akademik. Pendekatan simulasi eksperimental kuantitatif dilakukan menggunakan *MikroTik RouterOS*, dengan pengukuran *throughput*, *latency*, *packet loss*, serta persentase *uptime*. Hasil menunjukkan PCC mendistribusikan trafik secara merata antar-ISP, mencapai *throughput* maksimal 95 Mbps, *latency* di bawah 30 ms, *packet loss* kurang dari 1%, dan *uptime* di atas 99%. Sebaliknya, Nth kurang optimal dengan distribusi tidak seimbang, *throughput* 80 Mbps, *latency* hingga 45 ms, *packet loss* 1,5%, serta *uptime* 97,5%. Simpulan, PCC lebih unggul dalam menjaga stabilitas koneksi dan ketersediaan layanan kritis di perguruan tinggi.

Kata kunci : *Load Balancing; PCC; Nth; Jaringan Kampus; Ketersediaan Layanan*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi yang begitu pesat telah mendorong terjadinya transformasi digital di hampir seluruh lini kehidupan, termasuk di lingkungan pendidikan tinggi [1] Perguruan tinggi saat ini tidak lagi memandang teknologi jaringan sebagai fasilitas penunjang semata, melainkan sebagai infrastruktur vital yang menentukan kelancaran operasional akademik dan administratif [2]. Integrasi layanan berbasis *web* dan *cloud*, seperti Sistem Informasi Akademik (SIA), *E-Learning* atau *Learning Management System* (LMS), repositori digital jurnal, hingga layanan surat elektronik kampus, telah menjadi standar utama dalam layanan pendidikan modern [3], [4] Ketergantungan sivitas akademika terhadap layanan tersebut menuntut jaminan ketersediaan akses (*availability*) yang tinggi, stabil, dan responsif setiap saat.

Tantangan utama dalam mengelola infrastruktur jaringan kampus terletak pada ketimpangan antara kebutuhan bandwidth yang terus meningkat dengan ketersediaan resource yang terbatas [5]. Jumlah pengguna yang terdiri dari mahasiswa, dosen, dan tenaga kependidikan yang mengakses jaringan secara bersamaan, terutama pada jam-jam puncak aktivitas akademik seperti pendaftaran mata kuliah atau pelaksanaan ujian semester, seringkali menyebabkan lonjakan trafik yang signifikan [6]. Kondisi ini diperparah dengan adanya pembatasan kapasitas dan biaya dari penyedia layanan internet (ISP) [7]. Penggunaan jalur tunggal (*single link*) seringkali tidak mampu menahan beban trafik tersebut, yang berujung pada kemacetan jaringan (*congestion*), peningkatan *latency*, hingga putusnya koneksi total (*downtime*) [8].

Gangguan pada layanan akademik akibat ketidakstabilan jaringan tentu berdampak negatif terhadap kontinuitas proses belajar mengajar dan kelancaran administrasi kampus.

Sebagai solusi untuk mengatasi permasalahan keterbatasan bandwidth dan jaminan keberlanjutan layanan, penerapan teknologi *load balancing* pada gateway jaringan menjadi sebuah keharusan [9], [10]. *Load balancing* merupakan mekanisme yang mendistribusikan beban trafik jaringan secara merata melalui dua atau lebih jalur koneksi internet [11]. Teknologi ini tidak hanya bertujuan untuk menggabungkan bandwidth dari beberapa ISP agar total kapasitas bertambah, tetapi juga berfungsi sebagai sistem redundansi yang otomatis memindahkan jalur koneksi jika salah satu ISP mengalami gangguan (*failover*) [8]. Dengan demikian, ketersediaan layanan akademik dapat tetap terjaga meskipun terjadi masalah pada salah satu jalur provider.

Namun demikian, efektivitas dari *load balancing* sangat bergantung pada algoritma atau metode yang digunakan dalam mendistribusikan paket data [12], [13]. Dalam ekosistem perangkat jaringan, khususnya yang menggunakan sistem operasi router yang populer di kalangan instansi pendidikan, terdapat beragam metode yang dapat diterapkan [14]. Dua di antaranya yang sering menjadi pilihan adalah metode *Per Connection Classifier* (PCC) dan *Nth* [15]. Kedua metode ini memiliki pendekatan yang berbeda, PCC bekerja dengan mengklasifikasikan setiap koneksi baru berdasarkan *hash* tertentu untuk menjaga konsistensi sesi, sementara Nth bekerja dengan prinsip pembagian bergantian (*round robin*) yang lebih

sederhana tanpa mempertimbangkan kesamaan koneksi [1].

Banyak studi sebelumnya telah membahas tentang *load balancing*, namun seringkali hanya berfokus pada peningkatan total *throughput* atau kehandalan *failover* secara umum [8]. Kebaruan penelitian ini terletak pada upaya mengkaji secara spesifik pengaruh karakteristik trafik layanan akademik yang transaksional dan sensitif sesi (seperti penggunaan SIA dan LMS) terhadap konsistensi koneksi dari kedua metode tersebut [16]. Penelitian ini berbeda dari kajian umum yang sering mengabaikan dampak *broken session* pada aplikasi web akademik akibat distribusi paket yang tidak presisi [17]. Analisis mendalam mengenai perbandingan kestabilan sesi (*session persistence*) antara metode PCC dan Nth dalam konteks layanan kampus masih menjadi celah yang perlu diisi, mengingat setiap metode memiliki implikasi berbeda terhadap pengalaman pengguna layanan akademik.

Berdasarkan latar belakang dan celah penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan secara eksplisit kinerja metode PCC (*Per Connection Classifier*) dan Nth dalam mengelola gateway jaringan kampus. Fokus utamanya adalah untuk mengevaluasi efektivitas kedua metode dalam mengoptimalkan ketersediaan layanan akademik, khususnya akses terhadap SIA dan *E-Learning*, serta memberikan rekomendasi teknis mengenai metode mana yang paling tepat diterapkan untuk memitigasi masalah ketimpangan beban trafik dan menjaga stabilitas koneksi di lingkungan perguruan tinggi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Load Balancing

Load balancing atau penyeimbangan beban merupakan salah satu teknik penting dalam manajemen jaringan yang bertujuan untuk mendistribusikan beban lalu lintas data secara merata di antara beberapa jalur koneksi atau server [18]. Dalam konteks jaringan kampus yang menghubungkan ke beberapa *Internet Service Provider*, *load balancing* berfungsi sebagai mekanisme pengatur trafik yang cerdas untuk mengoptimalkan penggunaan bandwidth yang tersedia [19]. Secara fundamental, teknik ini bekerja dengan membagi aliran data agar tidak terkonsentrasi hanya pada satu jalur tunggal, sehingga mencegah terjadinya kemacetan (*congestion*) dan meningkatkan keandalan koneksi.

2.2. Metode Per Connection Classifier

Per Connection Classifier (PCC) adalah salah satu metode *load balancing* yang beroperasi dengan mengklasifikasikan trafik berdasarkan parameter koneksi spesifik [13]. Prinsip kerja utama dari PCC adalah menandai (*marking*) setiap koneksi baru yang melewati router [20]. Router akan melakukan perhitungan *hash* terhadap header paket data yang

biasanya mencakup alamat IP sumber (*source IP*), IP tujuan (*destination IP*), dan nomor port protocol untuk menentukan ke jalur mana koneksi tersebut harus dialihkan [21].

2.3. Metode Nth

Metode Nth adalah pendekatan *load balancing* yang jauh lebih sederhana dan bekerja berdasarkan prinsip pembagian paket secara bergantian atau sekuensial (*round robin*) [22]. Seperti namanya, algoritma ini bekerja dengan aturan "setiap paket ke-N akan dialihkan ke jalur tertentu". Sebagai contoh, jika sebuah jaringan memiliki dua ISP, aturan Nth dapat dikonfigurasi untuk mengirimkan paket ganjil ke ISP 1 dan paket genap ke ISP 2 [8].

2.4. Penelitian Terdahulu

Sejumlah penelitian terdahulu telah membahas penerapan *load balancing* pada jaringan kampus menggunakan metode PCC dan Nth [19]. Misalnya, berbagai studi menunjukkan bahwa PCC efektif dalam meningkatkan *throughput* secara keseluruhan dan menjaga kestabilan *failover*, sementara Nth lebih sederhana untuk implementasi skala kecil dengan fokus pada distribusi paket bergantian [1]. Penelitian lain telah menyoroti kemampuan PCC dalam membagi beban trafik secara merata, yang dapat meningkatkan kecepatan internet [23]. Studi-studi ini juga mengindikasikan bahwa penggunaan *failover* memungkinkan jalur cadangan otomatis mengambil alih jika koneksi internet utama terputus, sehingga menjaga ketersediaan jaringan [8]. Namun, penelitian-penelitian tersebut umumnya hanya mengevaluasi metrik umum seperti *bandwidth* agregat dan waktu respons rata-rata. Penelitian tersebut tidak menggali lebih dalam dampak terhadap kestabilan sesi pada aplikasi transaksional seperti SIA dan *E-Learning* yang sensitif terhadap *broken session* akibat distribusi paket tidak konsisten.

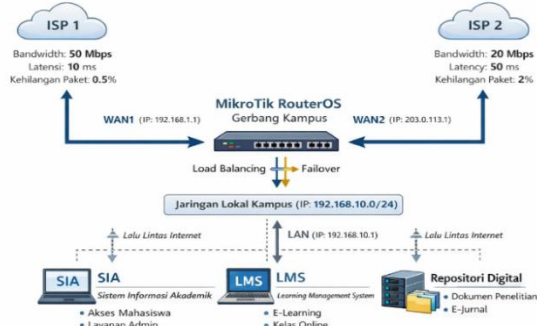
Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menganalisis secara spesifik pengaruh kedua metode terhadap karakteristik trafik layanan akademik di lingkungan perguruan tinggi. Dengan membandingkan konsistensi koneksi, pengurangan *latency*, dan tingkat keberhasilan sesi pada skenario beban tinggi, penelitian ini memberikan kedudukan unik sebagai kajian yang berorientasi pada optimalisasi pengalaman pengguna akademik, sehingga merekomendasikan metode terbaik untuk mitigasi *congestion* dan *downtime* pada gateway jaringan kampus.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini diklasifikasikan sebagai penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif. Pendekatan ini dipilih untuk mengukur dan membandingkan performa dua variabel independen, yakni metode *load balancing* PCC (*Per Connection Classifier*) dan Nth, terhadap variabel dependen berupa kinerja jaringan kampus [16]. Pengujian dilakukan melalui simulasi topologi jaringan yang

dirancang untuk mereplikasi kondisi nyata gateway kampus, di mana hasil pengukuran berupa data numerik akan dianalisis secara objektif untuk menentukan efektivitas masing-masing metode dalam mengoptimalkan layanan akademik.

Lingkungan penelitian disimulasikan menggunakan perangkat router yang berjalan pada sistem operasi MikroTik RouterOS, mengingat luasnya pemanfaatan platform ini pada infrastruktur jaringan perguruan tinggi. Topologi jaringan dirancang menyerupai gateway kampus yang terhubung ke dua *internet Service Provider* (ISP) berbeda guna menciptakan jalur redundan dan agregasi bandwidth. Dalam simulasi ini, kedua jalur ISP dikonfigurasi memiliki karakteristik bandwidth dan *latency* yang bervariasi untuk mendekati kondisi lapangan yang nyata. Gateway berfungsi sebagai titik kontrol utama yang mendistribusikan trafik dari jaringan lokal menuju internet, di mana trafik pengguna disimulasikan mencerminkan aktivitas sivitas akademik seperti akses SIA, LMS, dan repository digital.

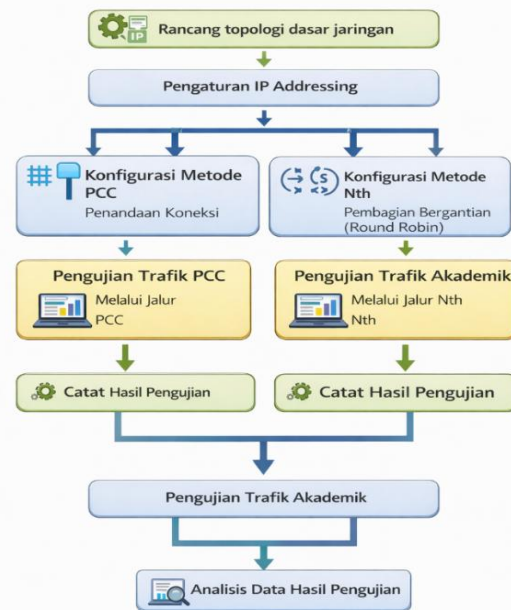


Gambar 1. Topologi Simulasi

Sebagai indikator keberhasilan penelitian, penilaian kinerja dilakukan berdasarkan parameter *Quality of Service* yang relevan dengan kebutuhan layanan akademik [24]. Parameter yang diukur meliputi *throughput* atau laju lalu lintas data untuk menilai efektivitas penggabungan bandwidth, serta *latency* (tundaan) untuk mengetahui responsivitas jaringan terhadap aplikasi interaktif. Selain itu, pengukuran *packet loss* (kehilangan paket) dilakukan untuk mengidentifikasi potensi gangguan transmisi data, sementara parameter *service availability* (ketersediaan layanan) digunakan untuk mengukur keandalan metode dalam menjaga konektivitas tetap stabil di tengah fluktuasi beban trafik.

Skema eksperimen dirancang secara berurutan untuk memastikan objektivitas perbandingan. Tahap awal dimulai dengan penyusunan topologi dasar dan pengaturan IP *addressing*. Selanjutnya, dilakukan konfigurasi untuk metode PCC dengan menerapkan *mangle* penandaan koneksi dan *routing* berbasis *hashing* untuk membagi trafik antar ISP, yang kemudian diuji dengan simulasi trafik beban kerja akademik. Data hasil pengujian dicatat, kemudian konfigurasi direset untuk diterapkan pada metode Nth dengan aturan pembagian bergantian (*round robin*).

Pengujian pada metode Nth dilakukan dengan beban kerja dan durasi yang sama persis dengan pengujian sebelumnya. Kedua set data yang terkumpul kemudian dianalisis untuk mengevaluasi konsistensi dan kestabilan koneksi pada masing-masing metode.



Gambar 2. Alur skema penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil eksperimen simulasi yang telah dilakukan untuk membandingkan kinerja metode *load balancing* PCC (*Per Connection Classifier*) dan Nth pada gateway jaringan kampus. Data yang diperoleh dari pengujian parameter *Throughput*, *Latency*, *Packet Loss*, dan Ketersediaan Layanan akan dianalisis secara mendalam untuk melihat sejauh mana efektivitas masing-masing metode dalam mendukung layanan akademik.

4.1. Perbandingan *Throughput*

Pengukuran *throughput* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan masing-masing metode dalam menggabungkan bandwidth dari dua ISP (ISP 1 dan ISP 2) serta mendistribusikan beban trafik. Hasil pengamatan selama 50 menit menunjukkan pola performa yang cukup signifikan antara kedua metode.

Berdasarkan data yang terkumpul, metode PCC menunjukkan kemampuan distribusi beban yang lebih dinamis dan mendekati seimbang antara kedua jalur ISP. Total *throughput* yang dicapai oleh PCC mengalami fluktuasi positif, mulai dari 85 Mbps pada interval awal dan meningkat hingga mencapai puncak 95 Mbps pada menit ke-20–30. Rincian trafik per ISP juga menunjukkan rasio yang proporsional, di mana beban pada ISP 1 dan ISP 2 selisihnya tidak terlalu jauh, misalnya pada menit ke-20–30 ISP 1 menanggung 50 Mbps dan ISP 2 sebesar 45 Mbps. Hal ini mengindikasikan bahwa algoritma PCC berhasil mengoptimalkan agregasi bandwidth kedua jalur secara efektif.

Tabel 1. Simulasi pengukuran throughput pada gateway kampus

Waktu Uji (menit)	PCC – ISP 1 (Mbps)	PCC – ISP 2 (Mbps)	Total PCC (Mbps)	Nth – ISP 1 (Mbps)	Nth – ISP 2 (Mbps)	Total Nth (Mbps)
0–10	45	40	85	50	30	80
10–20	48	42	90	52	28	80
20–30	50	45	95	55	25	80
30–40	47	43	90	53	27	80
40–50	49	44	93	54	26	80

Di sisi lain, metode Nth menunjukkan performa total yang cenderung statis pada angka 80 Mbps sepanjang pengujian. Meskipun angka total ini terlihat stabil, terdapat ketimpangan yang sangat mencolok dalam distribusi beban antar ISP. Data menunjukkan bahwa ISP 1 selalu mendominasi porsi beban trafik (berkisar antara 50–55 Mbps), sedangkan ISP 2 jauh tertinggal (hanya 25–30 Mbps). Kondisi ini mengindikasikan bahwa metode Nth gagal melakukan pembagian beban (*load sharing*) yang optimal. Ketidakseimbangan ini berpotensi menyebabkan kelebihan beban (*overload*) pada ISP 1 sementara kapasitas ISP 2 tidak dimanfaatkan secara maksimal, yang pada akhirnya membatasi total throughput yang dapat dicapai jaringan.

4.2. Perbandingan Latency

Parameter latency atau tundaan diukur dengan melakukan simulasi akses ke layanan akademik spesifik seperti LMS, SIA, Repository, dan Email Kampus. Hasil pengujian menggambarkan bahwa metode *load balancing* yang digunakan berdampak langsung terhadap respon waktu akses layanan.

Tabel 2. Pengukuran rata-rata waktu tunda akses ke layanan akademik

Layanan Akademik	PCC Latency (ms)	Nth Latency (ms)
LMS	25	40
SIKAD	28	42
Repository	30	45
Email Kampus	27	41

Analisis data menunjukkan bahwa metode PCC mampu menjaga latency pada level yang relatif rendah dan konsisten. Rata-rata latency untuk akses LMS tercatat sebesar 25 ms, SIA 28 ms, Repository 30 ms, dan Email Kampus 27 ms. Angka-angka ini berada dalam kisaran yang acceptable untuk aplikasi web interaktif. Konsistensi ini terjadi karena PCC mempertahankan satu sesi koneksi pada satu jalur yang sama, sehingga mengurangi risiko *jitter* atau variasi tundaan paket.

Sebaliknya, metode Nth mencatatkan angka latency yang jauh lebih tinggi dibandingkan PCC. Seluruh layanan akademik yang diuji menunjukkan peningkatan latency signifikan, berkisar antara 40 hingga 45 ms. LMS mencapai 40 ms, SIA 42 ms, Repository 45 ms, dan Email Kampus 41 ms. Kenaikan latency ini disebabkan oleh mekanisme kerja Nth yang membagi paket secara bergantian tanpa mempertimbangkan kesinambungan sesi. Akibatnya,

paket data seringkali melewati jalur dengan karakteristik waktu tempuh yang berbeda, yang memaksa *buffer* pada sisi penerima untuk menunggu penyusunan ulang paket (*packet reordering*), sekaligus meningkatkan kemungkinan terjadinya *retransmission* karena timeout, yang secara keseluruhan menurunkan kecepatan respon layanan.

4.3. Perbandingan Packet Loss

Analisis data menunjukkan bahwa metode PCC mampu menjaga latency pada level yang relatif rendah dan konsisten. Rata-rata latency untuk akses LMS tercatat sebesar 25 ms, SIA 28 ms, Repository 30 ms, dan Email Kampus 27 ms. Angka-angka ini berada dalam kisaran yang acceptable untuk aplikasi web interaktif. Konsistensi ini terjadi karena PCC mempertahankan satu sesi koneksi pada satu jalur yang sama, sehingga mengurangi risiko *jitter* atau variasi tundaan paket.

Pengukuran packet loss atau kehilangan paket dilakukan untuk menilai tingkat keandalan transmisi data selama periode pengujian. Semakin rendah persentase packet loss, semakin handal koneksi tersebut dalam mendukung proses transfer data yang kritis.

Tabel 3. Pengukuran packet loss selama simulasi.

Waktu Uji (menit)	PCC Packet Loss (%)	Nth Packet Loss (%)
0–10	0.5	1.2
10–20	0.4	1.3
20–30	0.6	1.5
30–40	0.5	1.4
40–50	0.4	1.3

Dari hasil pengamatan, metode PCC menunjukkan stabilitas yang sangat baik dengan tingkat *packet loss* yang selalu berada di bawah ambang 1%. Selama 50 menit pengujian, persentase kehilangan paket bervariasi hanya dalam rentang tipis antara 0,4% hingga 0,6%. Hal ini membuktikan bahwa distribusi trafik yang seimbang oleh PCC mencegah terjadinya penumpukan paket (*buffer overflow*) pada salah satu jalur ISP, sehingga aliran data dapat berlangsung dengan lancar.

Berbanding terbalik dengan PCC, metode Nth menunjukkan performa yang buruk terkait kehilangan paket. Persentase *packet loss* pada metode ini berkisar antara 1,2% hingga 1,5% sepanjang pengujian, atau hampir tiga kali lipat lebih tinggi dibandingkan PCC. Tingginya *packet loss* pada Nth tidak terlepas dari distribusi trafik yang tidak seimbang seperti yang

terlihat pada data throughput, di mana ISP 1 dipaksa menanggung beban berat di luar kapasitas optimalnya. Kondisi *overload* pada satu jalur menyebabkan banyak paket data yang terbuang (*dropped packets*) oleh router, yang tentu saja sangat merugikan bagi integritas data akses layanan akademik.

4.4. Perbandingan Ketersediaan Layanan

Berbanding terbalik dengan PCC, metode Nth menunjukkan performa yang buruk terkait kehilangan paket. Persentase *packet loss* pada metode ini berkisar antara 1,2% hingga 1,5% sepanjang pengujian, atau hampir tiga kali lipat lebih tinggi dibandingkan PCC. Tingginya *packet loss* pada Nth tidak terlepas dari distribusi trafik yang tidak seimbang seperti yang terlihat pada data throughput, di mana ISP 1 dipaksa menanggung beban berat di luar kapasitas optimalnya. Kondisi *overload* pada satu jalur menyebabkan banyak paket data yang terbuang (*dropped packets*) oleh router, yang tentu saja sangat merugikan bagi integritas data akses layanan akademik.

Parameter terakhir yang diukur adalah persentase *uptime* atau ketersediaan layanan akademik selama periode simulasi 24 jam. Parameter ini merupakan gambaran akhir dari keandalan metode *load balancing* dalam menjaga kontinuitas akses layanan.

Tabel 4. Persentase uptime layanan akademik selama 24 jam.

Layanan Akademik	PCC Uptime (%)	Nth Uptime (%)
LMS	99.5	97.8
SIKAD	99.3	97.5
Repository	99.2	97.6
Email Kampus	99.4	97.7

Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode PCC unggul secara signifikan dalam menjaga ketersediaan layanan. Semua layanan yang diuji mencatatkan tingkat *uptime* di atas 99%. LMS mencapai 99,5%, SIA 99,3%, Repository 99,2%, dan Email Kampus 99,4%. Angka ini mengindikasikan bahwa metode PCC sangat handal dalam menangani trafik kampus dan mencegah gangguan yang berujung pada *downtime*.

Sementara itu, implementasi metode Nth menghasilkan tingkat ketersediaan layanan yang lebih rendah. Persentase *uptime* untuk berbagai layanan berkisar antara 97,5% hingga 97,8%. Meskipun perbedaan angka persentasenya mungkin tampak kecil secara matematis, dalam konteks operasional 24 jam, selisih sekitar 1,5% ini setara dengan kehilangan waktu akses hampir 22 menit per hari. Metode Nth terbukti lebih rentan terhadap gangguan jalur, kemungkinan besar karena ketidakmampuannya mengelola sesi koneksi secara stabil saat terjadi fluktuasi trafik, yang seringkali memicu *timeout* pada koneksi aplikasi akademik.

Berdasarkan serangkaian pengujian yang telah dilakukan, hasil penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa metode PCC (*Per Connection*

Classifier) memiliki unggulan yang signifikan dibandingkan dengan metode Nth dalam konteks pengelolaan gateway jaringan kampus. Perbedaan performa yang tajam antara kedua metode ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pentingnya pemilihan algoritma *load balancing* yang sesuai dengan karakteristik trafik layanan akademik.

Secara umum, temuan ini memperkuat paradigma bahwa dalam lingkungan jaringan yang menangani aplikasi transaksional dan berbasis sesi, seperti Sistem Informasi Akademik (SIA) dan LMS, pendekatan pembagian beban berbasis koneksi (*connection-based*) jauh lebih efektif dibandingkan pendekatan berbasis paket (*packet-based*) [25]. Superioritas metode PCC dalam menghasilkan total throughput yang lebih tinggi, yaitu mencapai 95 Mbps dibandingkan Nth yang tertahan di 80 Mbps, mengindikasikan bahwa mekanisme *hashing* pada PCC mampu memanfaatkan kapasitas kedua ISP secara lebih adil dan efisien. Hal ini mengoreksi asumsi awal bahwa metode *round robin* sederhana seperti Nth akan otomatis membagi beban secara merata [22]. Fakta di lapangan menunjukkan bahwa tanpa mempertimbangkan identitas koneksi, mekanisme pembagian bergantian justru menciptakan ketimpangan beban (*load imbalance*) yang parah, di mana satu ISP mengalami kelebihan beban sementara yang lain menganggur.

Jika dikaitkan dengan kajian literatur mengenai *Quality of Service* (QoS), hasil penelitian ini sejalan dengan teori bahwa stabilitas sesi adalah kunci utama dalam performa aplikasi web [26]. Angka *latency* dan *packet loss* yang jauh lebih rendah pada metode PCC membuktikan bahwa mempertahankan lintasan paket yang sama untuk satu sesi (*session persistence*) sangat krusial untuk mencegah *jitter* dan kehilangan data [27]. Sebaliknya, perilaku metode Nth yang memecah paket dari satu sesi ke jalur yang berbeda-beda memicu masalah *out-of-order packet* yang berdampak pada peningkatan *retransmission*. Kondisi ini menjelaskan mengapa akses layanan kritis menggunakan metode Nth mengalami penurunan kualitas, di mana *latency* melonjak hingga 45 ms dan *packet loss* menyentuh angka 1,5% [8]. Dalam perspektif pengguna, peningkatan delay dan kehilangan paket ini berujung pada pengalaman akses yang lambat dan frustrasi saat menggunakan layanan akademik, terutama saat jam sibuk.

Selain itu, temuan mengenai ketersediaan layanan (*uptime*) memberikan kontribusi penting dalam diskusi mengenai keandalan infrastruktur TI perguruan tinggi [28]. Persentase *uptime* di atas 99% yang mampu dipertahankan oleh metode PCC, dibandingkan dengan rentang 97% pada Nth, menegaskan bahwa stabilitas jaringan bukan hanya soal kecepatan, tetapi juga soal kontinuitas [20]. Dalam banyak literatur yang membahas tentang *network reliability*, selisih kecil sekalipun dalam tingkat ketersediaan dapat berdampak besar pada

operasional institusi. Hasil ini memposisikan metode Nth sebagai solusi yang kurang relevan untuk lingkungan produksi kampus yang menuntut ketangguhan (*resilience*) tinggi, karena kerentanan metode ini terhadap fluktuasi trafik berpotensi menyebabkan gangguan layanan yang sering.

Dengan demikian, posisi hasil penelitian ini dalam kajian ilmiah yang lebih luas adalah sebagai validasi empiris atas rekomendasi teknis yang sering kali hanya berdasarkan asumsi teoritis. Penelitian ini membuktikan bahwa meskipun metode Nth menawarkan kemudahan konfigurasi, kompromi terhadap kualitas layanan yang dihasilkan terlalu besar untuk ditoleransi dalam lingkungan akademik. Sebaliknya, PCC terbukti sebagai metode yang lebih matang dan andal untuk memenuhi mandat perguruan tinggi dalam menyediakan layanan akademik yang prima, sekaligus menjawab tantangan kompleksitas manajemen jaringan modern.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode Per Connection Classifier (PCC) menunjukkan kinerja yang jauh lebih unggul dibandingkan metode Nth dalam pengelolaan gateway jaringan kampus. Metode PCC terbukti efektif dalam mendistribusikan beban trafik secara seimbang, yang tercermin dari total throughput optimal yang mampu mencapai 95 Mbps dengan pemanfaatan bandwidth kedua ISP yang proporsional. Selain itu, PCC secara konsisten mampu menjaga kualitas konektivitas dengan tingkat latency yang rendah dan persentase packet loss minimal, sehingga menghasilkan tingkat ketersediaan layanan (*uptime*) yang mencapai di atas 99% untuk seluruh layanan akademik. Sebaliknya, metode Nth menunjukkan kelemahan signifikan di mana mekanisme pembagian paket bergantian tanpa mempertimbangkan kesinambungan sesi menyebabkan ketimpangan beban pada salah satu ISP, lonjakan latency, serta peningkatan packet loss yang berujung pada penurunan ketersediaan layanan. Dengan demikian, untuk lingkungan kampus yang didominasi layanan akademik berbasis sesi seperti SIA dan LMS yang membutuhkan stabilitas tinggi, metode PCC merupakan pilihan yang paling sesuai dan andal. Sebagai implikasi dari temuan tersebut, pengelola jaringan di perguruan tinggi disarankan untuk mengimplementasikan metode PCC sebagai konfigurasi utama pada gateway demi menjamin kestabilan dan optimalisasi akses layanan akademik. Meskipun demikian, untuk mengoptimalkan efisiensi jaringan secara keseluruhan, pendekatan segmentasi trafik dapat dipertimbangkan, di mana metode Nth masih dapat digunakan secara terkendali untuk jenis trafik non-kritis atau *best-effort* yang toleran terhadap variasi sesi, asalkan didukung dengan manajemen antrian (*queue*) yang ketat agar tidak mengganggu performa layanan prioritas. Bagi peneliti selanjutnya, disarankan untuk mengembangkan kajian terhadap

metode *load balancing* yang lebih adaptif atau cerdas, seperti ECMP dengan *policy-based routing* atau pendekatan berbasis kecerdasan buatan, serta melakukan simulasi pada skenario gangguan jaringan yang lebih kompleks untuk melihat ketahanan sistem dalam kondisi trafik ekstrem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Mustofa and D. Ramayanti, "Implementasi Load Balancing dan Failover to Device Mikrotik Router Menggunakan Metode NTH (Studi Kasus: PT.GO-JEK Indonesia)," *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 7, no. 1, pp. 139–144, 2020, doi: 10.25126/jtiik.2020701638.
- [2] F. Fauzi and R. Irvansyah, "TRANSFORMASI DIGITAL PADA SISTEM KEARSIPAN DI SMAN 1 TAKENGON KABUPATEN ACEH TENGAH," *Manajemen Pendidikan*, vol. 17, no. 1, pp. 36–49, 2022, doi: 10.23917/jmp.v17i1.15911.
- [3] L. Rina and A. Sugiarto, "Learning Management System sebagai Cloud Storage dalam Pembelajaran berbasis Digital pada Jenjang Pendidikan Tinggi," *Kelola Jurnal Manajemen Pendidikan*, vol. 9, no. 2, pp. 163–178, 2022, doi: 10.24246/j.jk.2022.v9.i2.p163-178.
- [4] R. Wandira, A. Fauzi, and F. Nurahim, "Analysis of Factors Influencing Behavioral Intention to Use Cloud-Based Academic Information System Using Extended Technology Acceptance Model (TAM) and Expectation-Confirmation Model (ECM)," *Journal of Information Systems Engineering and Business Intelligence*, vol. 10, no. 2, pp. 179–190, 2024, doi: 10.20473/jisebi.10.2.179-190.
- [5] Y. Yindrizal, S. Susiana, Erizal. N. Erizal.N, M. Zahra, and O. V. Cania, "Student Perceptions of Andalas University Payakumbuh Campus Against the Speed of Access to Academic Information Systems," *Jurnal Sains dan Teknologi Industri*, vol. 21, no. 1, p. 98, 2023, doi: 10.24014/sitekin.v21i1.23247.
- [6] F. L. Witi and A. Mude, "Analisis Jaringan Intranet Di Universitas Flores Menggunakan Quality Of Service (QoS)," *Computer Based Information System Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 7–12, 2020, doi: 10.33884/cbis.v8i1.1797.
- [7] A. Wirawan, R. Gatra, H. Hidayat, and D. Prasetyawan, "Implementasi Load Balancing dengan HAProxy di Sistem Informasi Akademik UIN Sunan Kalijaga," *JISKA (Jurnal Informatika Sunan Kalijaga)*, vol. 9, no. 1, pp. 39–49, 2024, doi: 10.14421/jiska.2024.9.1.39-49.
- [8] F. Hariadi, P. A. R. L. Lede, and U. M. Kalaway, "The Effect Of Load Balancing And Failover Of Two Wide Area Networks With Per Connection Classifier Method On Qos Throughput, Packet Loss, Qos Delay, And Qos Jitter," *JOINCS (Journal of Informatics Network and Computer Science)*, vol. 4, no. 2, 2021, doi: 10.21070/joincs.v4i2.1502.

- [9] N. Nurmiati, L. Surimi, and S. Subardin, "Analisis Kinerja Load Balancing Terhadap Jaringan Internet Menggunakan Metode Equal Cost Multi Path (ECMP)," *Digital Transformation Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 52–62, 2022, doi: 10.47709/digitech.v2i2.1779.
- [10] F. A. Putra and A. Subardono, "Analisis Kinerja Per Connection Classifier dan Failover pada Multiple Gateway Internet Networks," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, vol. 10, no. 4, pp. 319–328, 2021, doi: 10.22146/jnteti.v10i4.2065.
- [11] M. Rademacher, K. Jonas, F. Siebertz, A. Rzyska, M. Schlebusch, and M. Kessel, "Software-Defined Wireless Mesh Networking: Current Status and Challenges," *Comput. J.*, vol. 60, no. 10, pp. 1520–1535, 2017, doi: 10.1093/comjnl/bxx066.
- [12] M. K. Anwar and I. Nurhaida, "Implementasi Load Balancing Menggunakan Metode Equal Cost Multi Path (ECMP) Pada Interkoneksi Jaringan," *InComTech Jurnal Telekomunikasi dan Komputer*, vol. 9, no. 1, p. 39, 2019, doi: 10.22441/incomtech.v9i1.5003.
- [13] Y. Pangestu, D. Setiyadi, and F. N. Khasanah, "Metode Per Connection Classifier Untuk Implementasi Load Balancing Jaringan Internet," *PIKSEL Penelitian Ilmu Komputer Sistem Embedded and Logic*, vol. 6, no. 1, pp. 1–8, 2018, doi: 10.33558/piksel.v6i1.1389.
- [14] S. Mubeen and S. Kumar, "Designing Efficient Source Routing for Mesh Topology Network on Chip Platforms," pp. 181–188, 2010, doi: 10.1109/dsd.2010.57.
- [15] P. Purwanto, K. Kusri, and R. R. Huizen, "MANAJEMEN JARINGAN INTERNET SEKOLAH MENGGUNAKAN ROUTER MIKROTIK DAN PROXY SERVER," *Respati*, vol. 11, no. 32, 2017, doi: 10.35842/jtir.v11i32.117.
- [16] Z. Saharuna, R. Nur, and A. Sandi, "Analisis Quality Of Service Jaringan Load Balancing Menggunakan Metode PCC Dan NTH," *CESS (Journal of Computer Engineering System and Science)*, vol. 5, no. 1, p. 131, 2020, doi: 10.24114/cess.v5i1.14629.
- [17] W. W. Dale, F. Hariadi, and R. M. I. Malo, "The Effect Of Queue Tree On Packet Loss In Bandwidth Management Online Based School Exam," *JOINCS (Journal of Informatics Network and Computer Science)*, vol. 4, no. 2, 2021, doi: 10.21070/joincs.v4i2.1515.
- [18] D. A. Jakaria and N. Durahman, "MENDISTRIBUSIKAN BEBAN TRAFIK DUA JALUR KONEKSI INTERNET DENGAN TEKNIK LOAD BALANCING," *JUTEKIN (Jurnal Teknik Informatika)*, vol. 5, no. 1, 2017, doi: 10.51530/jutekin.v5i1.123.
- [19] I. Sujarwo, D. Desmulyati, and I. Budiawan, "IMPLEMENTASI LOAD BALANCING MENGGUNAKAN METODE PCC (PER CONNECTION CLASSIFIER) DI UNIVERSITAS KRISNADWIPAYANA," *JITK (Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Komputer)*, vol. 5, no. 2, pp. 171–176, 2020, doi: 10.33480/jitk.v5i2.1184.
- [20] 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, pp. 14–20, 2021, doi: 10.56486/jeis.vol1no1.65.
- [21] T. Bonato *et al.*, "REPS: Recycling Entropies for Packet Spraying to Adaptively Explore Paths and Mitigate Failures," *arXiv (Cornell University)*, 2024, doi: 10.48550/arxiv.2407.21625.
- [22] R. Rasna and A. Ashari, "Application of Load Balancing with the Nth Method on Multiple Gateway Internet Networks," *IJCCS (Indonesian Journal of Computing and Cybernetics Systems)*, vol. 13, no. 2, p. 159, Apr. 2019, doi: 10.22146/ijccs.39074.
- [23] A. I. A. Rosyidi and R. T. Wahyuningrum, "Analisis Penggunaan Teknik Load Balancing untuk Optimalisasi Jaringan," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 9, no. 3, pp. 122–124, 2022, doi: 10.21107/triac.v9i3.15389.
- [24] K. G. W. P. Putra, G. S. Santyadiputra, and M. W. A. Kesiman, "Penerapan Manajemen Bandwidth Menggunakan Metode Hierarchical Token Bucket Pada Layanan Hotspot Mikrotik Undiksha," *CESS (Journal of Computer Engineering System and Science)*, vol. 5, no. 1, p. 146, 2020, doi: 10.24114/cess.v5i1.14959.
- [25] C. Fancy and M. Pushpalatha, "Traffic-aware adaptive server load balancing for software defined networks," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems/International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, no. 3, p. 2211, 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i3.pp2211-2218.
- [26] M. S. Ragil, I. Iskandar, and R. M. Candra, "Quality Of Service (QoS) Analysis to Calculate Internet Network Performance Level DISKOMINFOTIK and OPD P3AP2KB Office Riau Province," *Telematika*, vol. 20, no. 3, p. 392, Nov. 2023, doi: 10.31315/telematika.v20i3.10716.
- [27] D. Mo, Q. Li, D. Zarchy, B. Godfrey, and M. Schapira, "PCC: Re-architecting Congestion Control for Consistent High Performance," *arXiv (Cornell University)*, 2014, [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1409.7092.pdf>
- [28] S. C. Sobry *et al.*, "Broadband Services Quality of Experience on Public Higher Educational Institution Users: A Research Direction," *Information Management and Business Review*, vol. 16, pp. 872–879, 2024, doi: 10.22610/imbr.v16i3(i)s.3887.