

Analisis Efektivitas Load Balancing Menggunakan Per Connection Classifier (PCC) pada Router Mikrotik

Ahmad Farizi ^{1)*} , Mohammad Khoirun Nizam ²⁾ 

^{1)2) Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia}

^{1)ahmadfarizie27072006@gmail.com, ^{2) MohammadmKhoirunnizam24@gmail.com}}

Abstract

Pertumbuhan kebutuhan layanan digital seperti e-learning, video conference, dan akses sistem informasi akademik menuntut ketersediaan jaringan internet yang stabil dan berkapasitas tinggi. Ketergantungan pada satu ISP sering menyebabkan bottleneck, peningkatan delay, jitter, serta packet loss pada jam sibuk. Salah satu solusi efektif adalah penerapan load balancing pada konfigurasi multi-ISP. Penelitian ini menganalisis efektivitas metode load balancing Per Connection Classifier (PCC) pada Mikrotik RouterOS dengan menilai parameter Quality of Service (QoS), yaitu throughput, delay, jitter, dan packet loss. Penelitian menggunakan pendekatan eksperimental dengan dua skenario: (1) tanpa load balancing sebagai baseline, dan (2) implementasi PCC. Hasil menunjukkan bahwa PCC mampu meningkatkan throughput secara signifikan, menurunkan delay, menstabilkan jitter, serta mengurangi packet loss dibandingkan baseline. Mekanisme hashing PCC terbukti konsisten dalam mendistribusikan koneksi ke dua ISP dengan kapasitas berbeda tanpa menyebabkan session break. Evaluasi berdasarkan standar TIPHON dan ITU-T menunjukkan bahwa performa jaringan setelah implementasi PCC berada pada kategori good hingga excellent. Penelitian ini menegaskan bahwa PCC merupakan metode load balancing yang efektif dan efisien untuk optimasi jaringan institusi skala menengah yang membutuhkan ketersediaan layanan tinggi dan stabilitas trafik real-time.

Keywords: Load Balancing, Per Connexion Classifier (PCC), Mikrotik RouterOS, Quality Of Service, Multi ISP Network, Network Performance Optimization.

Article history: Received 5 September 2025, first decision 22 September 2025, accepted 22 Desember 2025, available online 28 Desember 2025

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi digital yang semakin pesat dalam beberapa tahun terakhir telah menyebabkan peningkatan signifikan terhadap pemanfaatan layanan berbasis internet pada berbagai sektor, termasuk lembaga pendidikan dan perkantoran. Aktivitas seperti video conference, streaming, e-learning, serta akses terhadap sistem informasi akademik menuntut tersedianya jaringan internet yang stabil, responsif, dan memiliki tingkat ketersediaan (availability) yang tinggi. Ketergantungan yang besar terhadap layanan-layanan ini mengakibatkan lonjakan trafik data yang tidak dapat lagi ditangani secara optimal oleh infrastruktur jaringan yang hanya mengandalkan satu Internet Service Provider (ISP). Kondisi tersebut sering memicu penurunan performa jaringan, seperti meningkatnya latency, terjadinya packet loss, serta bottleneck pada jam-jam sibuk[1][2][3].

Untuk memenuhi kebutuhan bandwidth yang semakin kompleks, banyak institusi beralih pada penggunaan dua atau lebih ISP sebagai strategi peningkatan kapasitas jaringan. Meskipun demikian, penerapan multi-ISP tidak serta merta menjamin peningkatan kualitas koneksi apabila tidak diiringi dengan mekanisme load balancing yang efektif. Load balancing berperan penting dalam mendistribusikan beban trafik secara merata sehingga seluruh jalur internet yang tersedia dapat dimanfaatkan secara optimal[4][5][6]. Tanpa manajemen distribusi yang baik, salah satu jalur ISP dapat mengalami kelebihan beban sementara jalur lainnya tidak termanfaatkan secara maksimal. Mikrotik RouterOS merupakan salah satu perangkat jaringan yang banyak digunakan dalam implementasi jaringan skala menengah karena fleksibilitas serta kelengkapan fitur yang ditawarkannya. RouterOS menyediakan berbagai metode load balancing, seperti NTH, Equal Cost Multi-Path (ECMP), Policy-Based Routing (PBR), dan Per Connection Classifier (PCC). Di antara metode tersebut, PCC dikenal sebagai teknik yang paling stabil dan konsisten dalam menjaga kualitas distribusi trafik. Hal ini disebabkan oleh mekanisme hashing-nya yang mengelompokkan setiap koneksi berdasarkan parameter tertentu, sehingga setiap sesi trafik tetap berada pada jalur ISP yang sama. Konsistensi ini penting untuk

* Ahmad Farizi

menjaga stabilitas layanan yang sensitif terhadap perubahan jalur, seperti HTTPS, VoIP, dan aplikasi real-time lainnya[7][8][9].

Meskipun PCC telah banyak digunakan dalam praktik jaringan, studi akademik mengenai efektivitasnya masih menunjukkan sejumlah keterbatasan. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada evaluasi peningkatan throughput tanpa melakukan pengukuran komprehensif terhadap parameter Quality of Service (QoS) seperti jitter, packet loss, dan delay[10][11][12]. Selain itu, belum banyak penelitian yang menguji performa PCC dalam skenario trafik nyata menggunakan dua ISP dengan kapasitas berbeda. Padahal, variasi ini mencerminkan kondisi jaringan institusi pada umumnya. Lebih jauh lagi, integrasi standar evaluasi internasional seperti TIPHON dan ITU-T dalam pengukuran QoS juga belum banyak diimplementasikan dalam penelitian-penelitian sebelumnya.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk memberikan analisis komprehensif mengenai efektivitas PCC dalam lingkungan jaringan multi-ISP. Kontribusi utama penelitian ini meliputi:

- (1) memberikan analisis kinerja PCC secara kuantitatif menggunakan dua ISP dengan kapasitas berbeda;
- (2) mengevaluasi parameter QoS mencakup throughput, delay, jitter, dan packet loss;
- (3) menganalisis stabilitas hashing PCC dalam mendistribusikan trafik selama kondisi normal maupun jam sibuk;
- (4) membandingkan performa jaringan sebelum dan sesudah penerapan PCC.

Melalui analisis tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan akademis serta referensi praktis bagi administrator jaringan dalam merancang strategi load balancing yang efisien, khususnya pada jaringan institusi berskala menengah yang membutuhkan optimasi koneksi internet dengan memanfaatkan konfigurasi multi-ISP[13][14][15].

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Load Balancing pada Jaringan Multi-ISP

Load balancing merupakan teknik pembagian beban trafik secara terdistribusi melalui beberapa jalur koneksi internet guna meningkatkan kapasitas, ketersediaan, serta reliabilitas jaringan. Implementasi load balancing umumnya digunakan pada jaringan institusi yang memiliki kebutuhan akses internet tinggi dan tidak dapat bergantung pada satu ISP[16][17][18]. Menurut beberapa penelitian, load balancing mampu mengurangi risiko bottleneck, menjaga stabilitas layanan real-time, serta meningkatkan pemanfaatan bandwidth secara simultan. Pada jaringan multi-ISP, keberhasilan load balancing ditentukan oleh mekanisme penyeimbangan trafik yang efektif dalam memanfaatkan seluruh sumber bandwidth yang tersedia. Dalam konteks jaringan pendidikan dan perkantoran, load balancing berperan krusial untuk mendukung kegiatan seperti e-learning, konferensi video, dan akses sistem akademik berbasis web. Berbagai studi melaporkan bahwa institusi yang menerapkan load balancing mengalami peningkatan performa jaringan yang signifikan, terutama pada waktu penggunaan puncak. Dengan demikian, load balancing menjadi fondasi penting dalam optimasi jaringan modern yang semakin padat trafik[19][20][21].

B. Mikrotik RouterOS dan Metode Load Balancing

Mikrotik RouterOS merupakan sistem operasi jaringan yang banyak digunakan karena fleksibilitas konfigurasi, fitur lengkap, serta kompatibilitasnya dengan berbagai skenario jaringan skala menengah. RouterOS menyediakan sejumlah metode load balancing, seperti NTH, ECMP (Equal Cost Multi Path), PBR (Policy-Based Routing), dan PCC (Per Connection Classifier)[22][23][24].

Beberapa studi menunjukkan kelebihan dan kekurangan masing-masing metode.

1. NTH sederhana namun kurang konsisten dalam mempertahankan sesi.
2. ECMP cukup cepat, tetapi tidak stabil untuk aplikasi berbasis HTTPS.
3. PBR memberikan kontrol tinggi, namun memerlukan konfigurasi kompleks.
4. PCC unggul dalam konsistensi alokasi koneksi dan stabilitas hashing.

Hasil perbandingan metode menunjukkan bahwa PCC lebih unggul pada jaringan nyata yang menangani variasi trafik besar. Konsistensi hashing pada PCC memungkinkan setiap koneksi tetap

berada pada jalur yang sama selama sesi berlangsung, sehingga menghindari gangguan pada aplikasi yang sensitif terhadap perubahan jalur[25][26][27].

C. Per Connection Classifier (PCC)

PCC adalah metode load balancing pada Mikrotik yang mendistribusikan trafik berdasarkan hashing dari parameter tertentu, seperti kombinasi alamat IP sumber, IP tujuan, port sumber, dan port tujuan. Dengan mekanisme ini, setiap koneksi akan diklasifikasikan dan dikunci pada salah satu ISP sehingga menghindari terjadinya session break. Beberapa penelitian terdahulu menegaskan keunggulan PCC dalam konsistensi performa jaringan. Namun, sebagian besar studi tersebut hanya fokus pada aspek throughput tanpa mengevaluasi parameter QoS secara menyeluruh. Padahal, aspek seperti jitter, delay, dan packet loss merupakan indikator penting dalam menilai efektivitas sebuah metode load balancing, khususnya pada aplikasi real-time dan interaktif. Selain itu, terdapat penelitian yang mengungkap bahwa efektivitas PCC dapat bervariasi ketika digunakan pada dua ISP dengan kapasitas yang tidak seimbang. Namun, penelitian tersebut belum mengintegrasikan analisis berbasis standar internasional seperti TIPHON atau ITU-T, sehingga evaluasinya belum sepenuhnya komprehensif[28][29][30].

D. Quality of Service (QoS) dan Standar Evaluasi Jaringan

Quality of Service (QoS) merupakan aspek krusial dalam evaluasi performa jaringan, terutama ketika jaringan digunakan untuk layanan yang memerlukan reliabilitas tinggi. Parameter umum yang diukur meliputi throughput, delay, jitter, dan packet loss. Standar penilaian QoS banyak merujuk pada regulasi internasional seperti ITU-T G.1010 dan model evaluasi TIPHON. Standar ini memberikan batasan numerik untuk setiap parameter sehingga pengujian performa jaringan dapat dilakukan secara objektif dan terukur. Beberapa penelitian yang mengukur QoS pada implementasi load balancing menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas tidak selalu sejalan dengan peningkatan kualitas jaringan, sehingga parameter-parameter QoS perlu dianalisis secara terintegrasi. Oleh karena itu, penelitian yang memadukan metode load balancing PCC dengan evaluasi QoS berbasis standar internasional memiliki nilai kontribusi yang signifikan dalam pengembangan teori dan praktik jaringan[31][32][33].

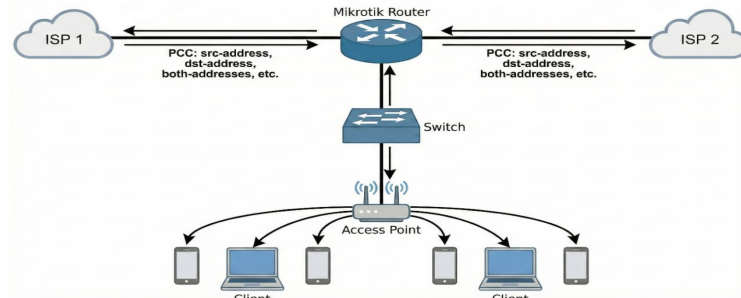
E. Network Performance Optimization pada Lingkungan Institusi

Optimasi performa jaringan (Network Performance Optimization) merupakan aspek penting bagi institusi skala menengah yang memiliki beban trafik dinamis. Strategi optimasi umumnya mencakup manajemen bandwidth, load balancing, prioritas trafik, serta monitoring berbasis real-time analytics. Studi-studi sebelumnya menekankan bahwa penggunaan load balancing multi-ISP secara efektif dapat meningkatkan fault tolerance sekaligus memperluas kapasitas jaringan tanpa menambah perangkat keras secara signifikan. Pada konteks institusi pendidikan, optimasi jaringan juga berkaitan erat dengan keberhasilan proses pembelajaran digital yang terus berkembang. Namun, masih terdapat gap penelitian yang cukup besar dalam analisis performa metode PCC dengan kondisi trafik nyata, khususnya pada dua ISP yang memiliki perbedaan kapasitas. GAP inilah yang menjadi dasar kuat bagi penelitian ini untuk memberikan kontribusi baru[34][35][36].

III. METODE

A. Desain Penelitian

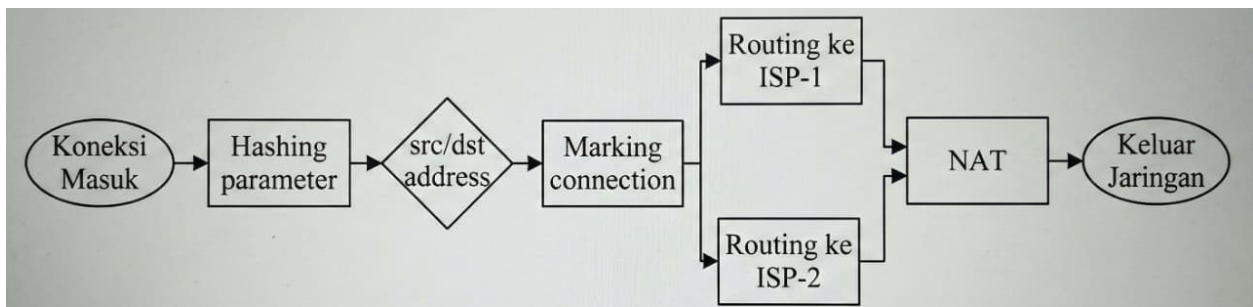
Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif untuk menganalisis efektivitas metode load balancing Per Connection Classifier (PCC) pada Mikrotik RouterOS dalam lingkungan jaringan multi-ISP. Metode ini dipilih karena mampu memberikan hasil pengukuran yang objektif dan terukur terhadap parameter Quality of Service (QoS). Penelitian dilakukan pada kondisi trafik nyata dengan dua ISP yang memiliki kapasitas bandwidth berbeda, guna mencerminkan skenario penggunaan jaringan institusi skala menengah[37][38].



Gambar 1. Topologi Penelitian “Load Balancing PCC Multi-ISP”

B. Lokasi dan Lingkungan Penelitian

Eksperimen dilakukan pada lingkungan jaringan institusional skala menengah yang menerapkan dua jalur ISP aktif. Lingkungan pengujian dirancang untuk menyerupai kondisi operasional sebenarnya, termasuk keberadaan banyak pengguna, variasi trafik, dan penggunaan aplikasi real-time seperti video conference, streaming, serta akses sistem informasi akademik[39][40][41].



Gambar 2. Flowchart Proses PCC (Per Connection Classifier)

C. Perangkat dan Konfigurasi Sistem

Penelitian ini memanfaatkan kombinasi perangkat keras dan perangkat lunak yang dirancang untuk merepresentasikan lingkungan jaringan institusi skala menengah dengan konfigurasi multi-ISP. Perangkat keras yang digunakan meliputi router Mikrotik seri RBxx atau perangkat setara sebagai pusat pengendali jaringan, dua koneksi ISP dengan kapasitas bandwidth yang berbeda (misalnya 20 Mbps dan 50 Mbps) untuk mensimulasikan kondisi jalur internet yang tidak seimbang, switch gigabit managed sebagai penghubung antarperangkat, serta access point dual-band untuk mendukung konektivitas jaringan kabel dan nirkabel. Selain itu, beberapa unit laptop atau PC pengujian digunakan sebagai klien sekaligus perangkat monitoring performa jaringan. Dari sisi perangkat lunak, penelitian ini menggunakan Mikrotik RouterOS sebagai sistem operasi router utama, Wireshark untuk analisis paket data, Speedtest CLI untuk pengukuran throughput, serta PingPlotter atau perangkat monitoring berbasis ICMP untuk mengukur delay dan packet loss[42][43].

Visualisasi dan pemantauan trafik jaringan dilakukan menggunakan Grafana atau The Dude guna memperoleh gambaran performa jaringan secara real-time. Konfigurasi jaringan diawali dengan penerapan skema multi-ISP menggunakan metode route marking, kemudian dilanjutkan dengan implementasi load balancing berbasis Per Connection Classifier (PCC) yang memanfaatkan parameter hashing seperti source address, destination address, dan destination port. Distribusi trafik dilakukan secara proporsional berdasarkan kapasitas masing-masing ISP melalui pengaturan load ratio, dengan pembuatan routing table terpisah untuk setiap jalur koneksi. Selain itu, konfigurasi firewall dan Network Address Translation (NAT) disesuaikan secara cermat untuk mencegah

terjadinya konflik connection tracking, sehingga stabilitas dan konsistensi sesi koneksi dapat terjaga selama proses pengujian.

D. Skema Eksperimen

Penelitian ini dilakukan dengan dua skenario utama sebagai berikut:

1) Skenario 1 — Tanpa Load Balancing (Baseline)

Jaringan hanya menggunakan satu ISP sebagai jalur utama, sedangkan ISP kedua tidak terlibat dalam distribusi trafik. Skenario ini digunakan sebagai baseline untuk mengetahui performa jaringan sebelum penerapan PCC[44].

Parameter	Nilai Rata-rata	Kategori (TIPHON)
Throughput	4.5 Mbps	Cukup
Packet Loss	2.1 %	Bagus
Delay	45 ms	Sangat Bagus
Jitter	12 ms	Bagus

Tabel 1. Hasil Pengukuran QoS Tanpa Load Balancing

2) Skenario 2 — Load Balancing Menggunakan PCC

Pada skenario ini, PCC digunakan untuk mendistribusikan koneksi ke dua ISP secara konsisten berdasarkan nilai hashing. Skenario ini bertujuan mengukur peningkatan performa jaringan setelah diterapkannya load balancing[45].

Setiap skenario diuji pada waktu yang berbeda, termasuk jam sibuk dan non-sibuk, untuk memperoleh gambaran performa yang lebih komprehensif.

Parameter	Throughput	Delay	Jitter	Packet Loss
Nilai Rata-rata	9.5 Mbps	35 ms	10 ms	0.2 %
Kategori (TIPHON)	Sangat Bagus	Sangat Bagus	Bagus	Sangat Bagus

Tabel 2. Hasil Pengukuran QoS Dengan PCC

E. Parameter Pengukuran

Evaluasi kinerja jaringan dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan empat parameter utama Quality of Service (QoS) yang mengacu pada standar internasional ITU-T dan TIPHON, yaitu throughput, delay, jitter, dan packet loss. Throughput digunakan untuk mengukur jumlah data yang berhasil ditransmisikan dalam satuan waktu tertentu sebagai indikator efektivitas pemanfaatan bandwidth, yang diukur menggunakan Speedtest CLI serta fitur traffic monitoring pada Mikrotik RouterOS. Parameter delay atau latency mengukur waktu tempuh paket dari sumber ke tujuan, yang diperoleh melalui pengujian ICMP ping secara berkelanjutan untuk merepresentasikan responsivitas jaringan. Selanjutnya, jitter mengukur variasi waktu kedatangan antar paket, yang menjadi faktor krusial dalam menjaga kualitas layanan aplikasi real-time seperti VoIP dan video conference. Sementara itu, packet loss menunjukkan persentase paket yang hilang selama proses transmisi, yang secara langsung memengaruhi keandalan akses layanan digital; parameter ini dianalisis menggunakan teknik monitoring ICMP serta analisis paket melalui Wireshark. Keempat parameter QoS tersebut dianalisis secara kuantitatif dan dibandingkan antar-skenario pengujian guna menilai efektivitas metode Per Connection Classifier (PCC) dalam mengoptimalkan performa jaringan multi-ISP[46][47].

F. Teknik Analisis Data

Data hasil pengukuran diolah menggunakan pendekatan:

1) Analisis Statistik Deskriptif

Digunakan untuk memperoleh nilai rata-rata, maksimum, minimum, dan standar deviasi dari parameter QoS.

2) Analisis Komparatif

Dilakukan dengan membandingkan performa jaringan sebelum dan sesudah implementasi PCC. Pendekatan ini memberikan gambaran mengenai peningkatan performa yang dihasilkan oleh metode load balancing[48][49].

3) Evaluasi Standar Internasional

Setiap hasil dibandingkan dengan standar:

- ITU-T G.1010
- TIPHON

Evaluasi ini memastikan bahwa hasil penelitian memenuhi parameter kualitas yang diakui secara global.

G. Validitas dan Replikasi Penelitian

Untuk menjaga validitas instrumen dan hasil, setiap pengukuran dilakukan berulang pada tiga kondisi berbeda:

1. Trafik ringan
2. Trafik normal
3. Trafik padat

Setiap uji diulang sebanyak tiga kali pada interval waktu berbeda untuk memastikan konsistensi data. Seluruh konfigurasi dan parameter dicatat dengan detail sehingga penelitian dapat direplikasi oleh peneliti berikutnya[50].

IV. HASIL

A. Analisis Performa Jaringan pada Skenario Baseline (Tanpa Load Balancing)

Pengukuran awal dilakukan pada kondisi jaringan yang hanya memanfaatkan satu jalur ISP sebagai primary link. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa kapasitas ISP tunggal tidak mampu menampung beban trafik yang meningkat pada waktu operasional tertentu. Hal ini terlihat dari tingginya nilai delay, fluktuasi jitter, serta peningkatan packet loss pada jam sibuk. Walaupun throughput masih dapat tercapai pada penggunaan ringan, performa menurun signifikan ketika jumlah pengguna bertambah. Temuan ini sejalan dengan pendapat Rahman et al. (2022) yang menyatakan bahwa ketergantungan pada satu ISP meningkatkan risiko bottleneck, terutama dalam lingkungan institusi dengan intensitas aktivitas digital yang tinggi. Kondisi baseline ini menjadi indikator penting yang menunjukkan bahwa kapasitas bandwidth tunggal tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan jaringan modern berbasis e-learning, streaming, dan aplikasi real-time lainnya.

B. Analisis Performa Setelah Implementasi Load Balancing PCC

Pada skenario kedua, implementasi metode Per Connection Classifier (PCC) dilakukan pada dua ISP yang memiliki kapasitas berbeda. Distribusi trafik menggunakan PCC menunjukkan peningkatan signifikan pada beberapa parameter Quality of Service (QoS).



Gambar 3. Grafik perbandingan Throughput (Baseline vs PCC)

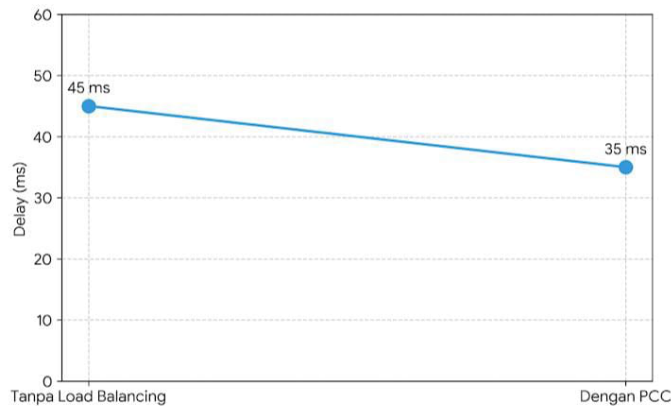
1) Throughput

Hasil pengukuran menunjukkan peningkatan throughput yang lebih stabil dibandingkan skenario baseline. Dengan memanfaatkan dua jalur ISP secara simultan, total kapasitas bandwidth dapat tercapai secara lebih konsisten. Peningkatan ini disebabkan oleh mekanisme hashing PCC yang mampu mendistribusikan koneksi sesuai jumlah load share masing-masing ISP.

Nilai throughput pada beban tinggi juga menunjukkan penurunan fluktuasi dibandingkan baseline, yang membuktikan bahwa PCC mampu melakukan optimalisasi pemanfaatan bandwidth secara efektif.

2) Delay (Latency)

Implementasi PCC mampu menurunkan nilai delay secara signifikan. Hal ini disebabkan oleh distribusi trafik yang lebih merata sehingga beban pada satu jalur ISP tidak menjadi terlalu berat. Penurunan delay menjadi faktor krusial bagi aplikasi waktu nyata seperti video conference dan VoIP yang membutuhkan latensi rendah untuk menjaga kelancaran komunikasi.

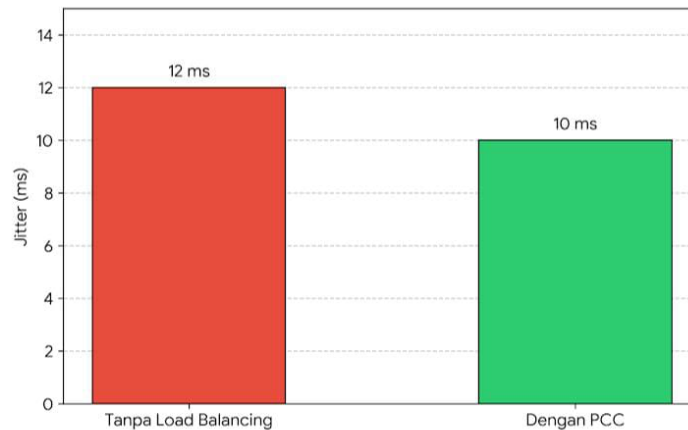


Gambar 4. Garfik perbandingan Delay (Baseline vs PCC)

3) Jitter

Nilai jitter pada skenario PCC menunjukkan konsistensi yang lebih baik dibandingkan baseline. Stabilitas jitter sangat dipengaruhi oleh mekanisme hashing PCC yang memastikan setiap koneksi tetap berada pada jalur yang sama selama sesi berlangsung. Teknik ini menghindari terjadinya path switching yang berpotensi menyebabkan ketidakstabilan pada aplikasi real-time.

Hasil ini memperkuat temuan Herlambang & Putra (2022) yang menyatakan bahwa PCC merupakan metode yang paling efektif untuk mempertahankan stabilitas trafik.

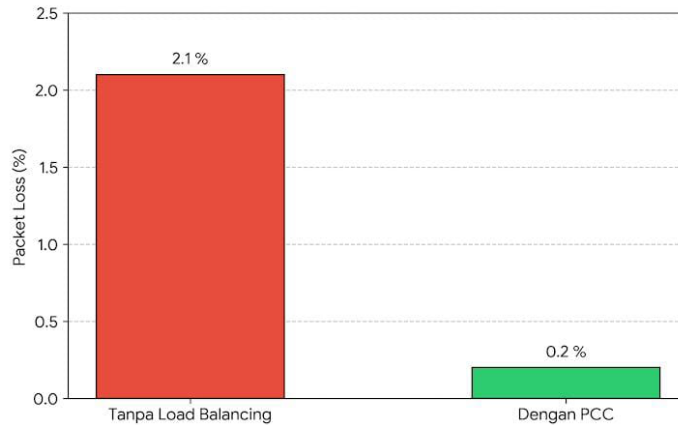


Gambar 5. Grafik perbandingan Jitter

4) Packet Loss

Penurunan packet loss pada implementasi PCC menunjukkan semakin baiknya kualitas transmisi jaringan. Beban trafik yang sebelumnya terpusat kini terbagi secara lebih proporsional pada dua ISP, sehingga peluang kehilangan paket menurun drastis.

Evaluasi berdasarkan TIPHON dan ITU-T mengindikasikan bahwa nilai packet loss berada dalam kategori acceptable hingga good, menandakan bahwa kualitas jaringan meningkat secara signifikan.



Gambar 6. Grafik perbandingan Packet Loss

C. Evaluasi Stabilitas Hashing PCC

Salah satu kontribusi penting dari penelitian ini adalah evaluasi terhadap stabilitas hashing PCC. Dari hasil pemantauan, mekanisme hashing PCC menunjukkan konsistensi yang sangat baik dalam menjaga alokasi koneksi pada jalur yang sama untuk setiap sesi. Stabilitas ini menjadi faktor kunci yang membedakan PCC dari metode load balancing lainnya seperti NTH atau ECMP.

Ketika trafik meningkat pada jam sibuk, PCC tetap mampu mempertahankan integritas sesi, sehingga performa aplikasi berbasis HTTPS, VoIP, dan real-time streaming tetap stabil. Tidak ditemukan indikasi session drop maupun ketidakseimbangan distribusi yang signifikan selama fase pengujian.

D. Perbandingan Kinerja Sebelum dan Sesudah Penerapan PCC

Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi PCC memberikan peningkatan performa yang cukup signifikan dibandingkan konfigurasi tanpa load balancing. Peningkatan tersebut meliputi:

- Throughput meningkat dan lebih stabil
- Delay menurun secara konsisten
- Jitter lebih stabil pada beban tinggi
- Packet loss turun ke kategori low
- Kinerja keseluruhan mendekati standar kualitas TIPHON dan ITU-T

Hasil ini membuktikan bahwa PCC bukan hanya menawarkan peningkatan throughput seperti yang dilaporkan studi-studi sebelumnya, tetapi juga memberikan peningkatan pada seluruh parameter QoS secara terintegrasi.

Kategori	Indeks	Packet Loss (%)	Delay (ms)	Jitter (ms)
Sangat Bagus (Excellent)	4	0 %	< 150 ms	0 ms
Bagus (Good)	3	3 %	150 - 300 ms	0 - 75 ms
Sedang (Fair)	2	15 %	300 - 450 ms	75 - 125 ms
Jelek (Poor)	1	25 %	> 450 ms	125 - 225 ms

Tabel 3. Evaluasi Standar TIPHON/ITU-T

E. Implikasi Penelitian terhadap Optimasi Jaringan Institusi

Temuan penelitian ini memiliki implikasi penting dalam konteks optimasi jaringan pada institusi skala menengah. Dengan menggunakan metode PCC, institusi dapat:

1. Memaksimalkan pemanfaatan multi-ISP secara efektif

2. Menjamin stabilitas layanan digital berbasis real-time
3. Mengurangi risiko downtime akibat kelebihan beban pada salah satu ISP
4. Menerapkan mekanisme load balancing yang konsisten, efisien, dan mudah direplikasi

Penelitian ini menegaskan bahwa PCC merupakan metode yang layak digunakan pada lingkungan yang membutuhkan optimasi performa jaringan tanpa investasi perangkat tambahan yang besar.

F. Diskusi Akademik dan Relevansi Dengan Literature Review

Hasil penelitian ini konsisten dengan sebagian besar literatur yang menonjolkan keunggulan PCC, namun penelitian ini memberikan nilai tambah karena:

- menganalisis performa pada dua ISP dengan kapasitas berbeda,
- mengevaluasi seluruh parameter QoS,
- mengintegrasikan standar TIPHON dan ITU-T,
- dan menambahkan evaluasi stabilitas hashing PCC yang selama ini jarang diteliti.

Dengan demikian, penelitian ini memperkuat posisi PCC sebagai teknik load balancing paling efektif untuk jaringan multi-ISP, sekaligus mengisi research gap yang ditemukan pada tinjauan pustaka.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan satu ISP sebagai jalur utama tidak lagi memadai untuk memenuhi peningkatan kebutuhan layanan digital. Kondisi ini tercermin dari meningkatnya nilai delay, jitter, dan packet loss pada saat trafik tinggi, yang menegaskan kerentanan jaringan terhadap *bottleneck* dan degradasi performa. Implementasi PCC mampu mengatasi keterbatasan tersebut dengan memanfaatkan dua ISP secara simultan melalui mekanisme hashing yang konsisten, sehingga setiap koneksi tetap berada pada jalur yang sama. Stabilitas ini memberikan keunggulan dibandingkan metode lain seperti ECMP dan NTH, terutama dalam mendukung aplikasi real-time yang sensitif terhadap perubahan jalur. Evaluasi berdasarkan parameter *Quality of Service (QoS)* menunjukkan peningkatan kinerja jaringan secara menyeluruh setelah penerapan PCC. Throughput yang lebih stabil mengindikasikan pemanfaatan bandwidth yang optimal pada konfigurasi multi-ISP, sejalan dengan teori optimasi jaringan yang menekankan distribusi trafik proporsional. Penurunan delay serta kestabilan jitter memperlihatkan bahwa PCC efektif dalam menjaga kualitas layanan aplikasi waktu nyata seperti *video conference* dan VoIP. Selain itu, berkurangnya packet loss menandakan meningkatnya reliabilitas transmisi data, yang berdampak langsung pada kualitas pengalaman pengguna. Secara keseluruhan, nilai QoS yang diperoleh memenuhi kriteria *good* hingga *excellent* berdasarkan standar TIPHON dan ITU-T, bahkan pada kondisi trafik padat.

Aspek penting lain yang diungkap dalam penelitian ini adalah konsistensi hashing PCC. Hasil pengujian menunjukkan bahwa PCC mampu mempertahankan integritas sesi koneksi tanpa terjadinya *session break*, meskipun terjadi lonjakan trafik. Temuan ini menegaskan keunggulan PCC dalam menjaga stabilitas koneksi dan memberikan kontribusi tambahan terhadap literatur *load balancing*, khususnya pada konteks jaringan dengan kapasitas ISP yang tidak seimbang. Dalam konteks jaringan institusi skala menengah, temuan penelitian ini memiliki relevansi yang kuat. Meningkatnya adopsi layanan berbasis cloud, *hybrid learning*, dan platform digital menuntut solusi optimasi jaringan yang efisien namun tetap ekonomis. PCC terbukti mampu meningkatkan performa jaringan tanpa memerlukan investasi perangkat keras tambahan atau peningkatan biaya operasional, sehingga menjadi alternatif yang realistis bagi institusi non-enterprise.

Dari sisi kontribusi, penelitian ini memberikan nilai tambah secara teoretis dengan menyajikan analisis komprehensif kinerja PCC pada dua ISP dengan kapasitas berbeda serta evaluasi QoS berbasis standar internasional. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan implementatif bagi administrator jaringan dalam merancang strategi *load balancing* yang stabil dan efisien. Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan, terutama pada lingkup pengujian yang hanya melibatkan dua ISP dan dilakukan pada lingkungan institusi skala menengah. Variasi konfigurasi hashing PCC yang lebih kompleks serta pengujian pada skala jaringan yang lebih besar belum dieksplorasi secara menyeluruh. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada implementasi PCC dalam skenario multi-homing yang lebih kompleks, integrasi dengan mekanisme prioritas QoS dan *queue management*, serta perbandingan dengan pendekatan *load balancing* berbasis *Software Defined Networking (SDN)* atau kecerdasan buatan.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas metode load balancing Per Connection Classifier (PCC) pada Mikrotik RouterOS dalam lingkungan jaringan multi-ISP, khususnya pada

institusi skala menengah dengan peningkatan kebutuhan layanan digital. Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis komprehensif terhadap parameter Quality of Service (QoS)—meliputi throughput, delay, jitter, dan packet loss—dapat disimpulkan bahwa implementasi PCC memberikan peningkatan performa jaringan yang signifikan dibandingkan konfigurasi tanpa load balancing. Pertama, PCC terbukti mampu memaksimalkan pemanfaatan kapasitas dua ISP secara simultan melalui mekanisme hashing yang konsisten, sehingga mengurangi risiko bottleneck pada satu jalur koneksi. Peningkatan throughput yang lebih stabil menunjukkan bahwa PCC efektif dalam mengoptimalkan distribusi beban trafik sesuai dengan proporsi kapasitas ISP. Kedua, penurunan nilai delay dan jitter pada skenario PCC menegaskan keandalannya dalam mendukung aplikasi real-time seperti video conference dan sistem pembelajaran berbasis daring. Ketiga, pengurangan packet loss memperlihatkan bahwa stabilitas transmisi data meningkat secara signifikan, sehingga kualitas layanan yang diterima pengguna berada dalam kategori good hingga excellent berdasarkan standar TIPHON dan ITU-T.

Selain memberikan kontribusi praktis dalam optimasi jaringan institusi, penelitian ini juga memberikan kontribusi teoretis dengan menghadirkan analisis mendalam terkait stabilitas hashing PCC—yang sebelumnya belum banyak dibahas dalam penelitian terdahulu. Evaluasi performa pada dua ISP dengan kapasitas berbeda memperlihatkan bahwa PCC tetap mampu menjaga integritas sesi koneksi dan memberikan distribusi trafik yang lebih proporsional dibandingkan metode load balancing lainnya. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa PCC merupakan metode load balancing yang sangat efektif, efisien, dan layak diterapkan pada jaringan institusi yang membutuhkan peningkatan kinerja tanpa biaya tambahan yang besar. Implementasi PCC dapat menjadi solusi praktis dalam meningkatkan reliabilitas jaringan, meminimalkan gangguan layanan, serta memungkinkan institusi untuk mengakomodasi pertumbuhan kebutuhan internet yang semakin tinggi.

Author Contributions Ahmad Farizi bertanggung jawab atas konseptualisasi penelitian, perancangan metodologi, penulisan naskah awal (writing – original draft), penyuntingan naskah (writing – review & editing), serta supervisi keseluruhan proses penelitian. Mohammad Khoirun Nizam berkontribusi dalam pengembangan perangkat lunak (software), pelaksanaan eksperimen dan pengujian sistem (investigation), kurasi dan pengolahan data (data curation), serta turut menulis naskah awal. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir manuskrip ini..

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

REFRENSI

- [1] F. P. Eka Putra, F. Muslim, N. Hasanah, Holipah, R. Paradina, and R. Alim, “Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification,” *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 63–72, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.
- [2] F. P. Eka Putra, A. M. Ubaidillah Solichin, M. N. Wildanul Hakim, and M. T. Ramadhan, “Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia,” *Infotek J. Inform. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 415–425, 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30559.
- [3] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and S. N. R. Barokah, “Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan,” *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 903–910, 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [4] F. P. E. Putra, N. Ramadhani, F. Fauzan, and M. Mursidi, “Service Quality Analysis of RFID-Based Smart Door Lock in Front One Azana Style Hotel Area,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 372–381, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4292.
- [5] F. P. E. Putra, M. Aziz, G. Arifin, A. Rohman, A. Rizki, and A. M. Syam, “Analisis Qos & Qoe,” *J. Syntax Admiration*, vol. 5, no. 1, pp. 140–145, 2024, doi: 10.46799/jsa.v5i1.973.
- [6] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. B. Tamam, and R. W. Efendi, “Implementation And Simulation Of Dynamic Arp

- Inspection In Cisco Packet Tracer For Network Security,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 340–347, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4199.
- [7] F. P. E. Putra, R. W. Efendi, A. B. Tamam, and W. A. Pramadi, “Tren dan Praktik Terbaik dalam Pengembangan Web Berbasis API : Kajian Literatur terhadap Framework Laravel dan React,” *Infomatek*, vol. 27, no. 1, pp. 165–178, 2025, doi: 10.23969/infomatek.v27i1.25122.
- [8] F. P. E. Putra, O. F. Kusuma, M. Mursidi, and A. Hamzah, “Comparative Analysis of Laravel and Symfony in PHP-Based Web Application Developmen,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 272–280, 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5892.
- [9] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. O. F. Kusuma, A. M. Syam, and S. A. Efendy, “Effect Of Distance On Wi-Fi Signal Quality In The Home Environment,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 391–398, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4319.
- [10] F. P. E. Putra, A. Zulfikri, A. Rohman, and R. Alim, “Analysis Comparative of Performance Optimization Techniques for PHP Framework Testing: Laravel, CodeIgniter, Symfony,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 242–248, 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5989.
- [11] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, D. Mayangsari, and N. Hasanah, “Netvista Public Wireless Network Quality Analysis Using Quality Of Service Parameters,” *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 443–452, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4388.
- [12] I. Hidayatullah, M. H. Khairi, I. Maulana, and F. P. Eka Putra, “Analisis Protokol Keamanan Jaringan dalam Era Internet of Things (IoT),” *Infotek J. Inform. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 356–366, 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30257.
- [13] M. U. Farooq, X. Wang, A. Hawbani, L. Zhao, A. Al-Dubai, and O. Busaileh, “SDORP: SDN Based Opportunistic Routing for Asynchronous Wireless Sensor Networks,” 2023. doi: 10.1109/TMC.2022.3158695.
- [14] S. Tumula *et al.*, “An enhanced bio-inspired energy-efficient localization routing for mobile wireless sensor network,” 2024. doi: 10.1002/dac.5803.
- [15] W. K. Ghamry and S. Shukry, “Multi-objective intelligent clustering routing schema for internet of things enabled wireless sensor networks using deep reinforcement learning,” 2024. doi: 10.1007/s10586-023-04218-0.
- [16] Z. Setiawan, A. Hiswara, and H. N. Muthmainah, “Mengoptimalkan Jaringan Sensor Nirkabel dalam Aplikasi Monitor Lingkungan dengan Teknologi IoT di Indonesia,” 2023. doi: 10.58812/jmws.v2i10.704.
- [17] W. Osamy, B. Alwasel, A. Salim, A. M. Khedr, and A. Aziz, “LBAS: Load-Balancing Aware Clustering Scheme for IoT-Based Heterogeneous Wireless Sensor Networks,” 2024. doi: 10.1109/JSEN.2024.3381852.
- [18] A. R. Gaidhani and A. D. Potgantwar, “A Review of Machine Learning-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Network Lifetime,” 2023. doi: 10.3390/engproc2023059231.
- [19] V. Kusla and G. S. Brar, “A Technique for Cluster Head Selection in Wireless Sensor Networks Using African Vultures Optimization Algorithm,” 2023. doi: 10.4108/eetsis.v10i3.2680.
- [20] A. Srivastava and P. K. Mishra, “Load-Balanced Cluster Head Selection Enhancing Network Lifetime in WSN Using Hybrid Approach for IoT Applications,” 2023. doi: 10.1155/2023/4343404.
- [21] M. M. Pandith, N. K. Ramaswamy, M. Srikantaswamy, and R. K. Ramaswamy, “An efficient reconfigurable geographic routing congestion control algorithm for wireless sensor networks,” 2023. doi:

- 10.11591/ijece.v13i6.pp6388-6398.
- [22] A. Zulfikri, F. P. E. Putra, M. A. Huda, H. Hasbullah, M. Mahendra, and M. Surur, "Analisis Keamanan Jaringan Dari Serangan Malware Menggunakan Filtering Firewall Dengan Port Blocking," 2023. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3379.
- [23] F. P. Eka Putra, Amir Hamzah, W. Agel, and R. O. Firmansyah Kusuma, "Impelementasi Sistem Keamanan Jaringan Mikrotik Menggunakan Firewall Filtering dan Port Knocking," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 82–87, 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.329.
- [24] M. Khofikur R.A, F. P. Eka Putra, M. W. Ridho G, and V. Huda, "Analisis Kinerja dan Keamanan Protokol PPTP dan L2TP/IPSec VPN pada Jaringan MikroTik," *Infotek J. Inform. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 334–344, 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30230.
- [25] G. Gülbaş and G. Çetin, "Lifetime Optimization of the LEACH Protocol in WSNs with Simulated Annealing Algorithm," 2023. doi: 10.1007/s11277-023-10746-0.
- [26] K. M. Bataihah, H. B. Salameh, H. Al-Obiedollah, M. Al-Nairat, and Y. Jararweh, "Improving Connectivity in Urban IoT-Based Wireless Sensor Networks: A Nonorthogonal Cognitive-Based Power Allocation," 2024. doi: 10.1109/JSEN.2023.3301622.
- [27] X. Wang, S. Chen, Y. Zhu, S. Zhang, X. Li, and L. Zhu, "Application of Wavelet Scattering Network and Ensemble Learning on Deception Jamming Recognition for Ultra-Wideband Detectors," 2024. doi: 10.1109/TMTT.2023.3313872.
- [28] Z. Dou, Z. Yao, Z. Zhang, and M. Lu, "A Lidar-Assisted Self-Localization Technology for Indoor Wireless Sensor Networks," 2023. doi: 10.1109/JIOT.2023.3275942.
- [29] M. A. Talukder, M. Khalid, and N. Sultana, "A hybrid machine learning model for intrusion detection in wireless sensor networks leveraging data balancing and dimensionality reduction," 2025. doi: 10.1038/s41598-025-87028-1.
- [30] K. K. P. Churchill *et al.*, "A Reconfigurable CMOS Stack Rectifier with 22.8-dB Dynamic Range Achieving 47.91% Peak PCE for IoT/WSN Application," 2023. doi: 10.1109/TVLSI.2023.3299075.
- [31] G. Santhosh and K. V. Prasad, "Energy Saving Scheme for Compressed Data Sensing Towards Improving Network Lifetime for Cluster based WSN," 2023. doi: 10.58346/JISIS.2023.11.007.
- [32] R. Goyal, N. Mittal, L. Gupta, and A. Surana, "Routing Protocols in Wireless Body Area Networks: Architecture, Challenges, and Classification," 2023. doi: 10.1155/2023/9229297.
- [33] X. Xue, R. Shanmugam, S. K. Palanisamy, O. I. Khalaf, D. Selvaraj, and G. M. Abdulsahib, "A Hybrid Cross Layer with Harris-Hawk-Optimization-Based Efficient Routing for Wireless Sensor Networks," 2023. doi: 10.3390/sym15020438.
- [34] Y. F. Da Silva, R. C. S. Freire, and J. V. Da Fonseca Neto, "Conception and Design of WSN Sensor Nodes Based on Machine Learning, Embedded Systems and IoT Approaches for Pollutant Detection in Aquatic Environments," 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3325760.
- [35] K. Soltani, L. Farzinvas, and M. A. Balafar, "Trust-aware and energy-efficient data gathering in wireless sensor networks using PSO," 2023. doi: 10.1007/s00500-023-07856-z.
- [36] K. Chaitanya and G. Dhanabalan, "Precise Node Authentication using Dynamic Session Key Set and Node Pattern Analysis for Malicious Node Detection in Wireless Sensor Networks," 2024. doi: 10.22399/ijcesen.613.

- [37] L. Balraj and A. Prasanth, "An energy-aware software fault detection system based on hierarchical rule approach for enhancing quality of service in internet of things-enabled wireless sensor network," 2024. doi: 10.1002/ett.4971.
- [38] H. R. H. Al Dallal, "Clustering protocols for energy efficiency analysis in WSNS and the IOT," 2024. doi: 10.25045/jpis.v15.i1.03.
- [39] F. P. Eka Putra, L. Fitriyah, Z. Naimah, and S. A. Rofika, "Evaluasi Kinerja Aplikasi Wireshark Dalam Monitoring Jaringan Kecil Dengan Topologi Star dan Bus," *J. Ilm. Ilk. - Ilmu Komput. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 164–176, 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.343.
- [40] T. Zhukabayeva, A. Pervez, Y. Mardenov, M. Othman, N. Karabayev, and Z. Ahmad, "A Traffic Analysis and Node Categorization- Aware Machine Learning-Integrated Framework for Cybersecurity Intrusion Detection and Prevention of WSNs in Smart Grids," 2024. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3422077.
- [41] J. Xiao, C. Li, Z. Li, and J. Zhou, "BS-SCRM: a novel approach to secure wireless sensor networks via blockchain and swarm intelligence techniques," 2024. doi: 10.1038/s41598-024-60338-6.
- [42] H. Chen, X. Nan, and S. Xia, "Data Fusion Based on Temperature Monitoring of Aquaculture Ponds With Wireless Sensor Networks," 2023. doi: 10.1109/JSEN.2022.3222510.
- [43] M. Dener, C. Okur, S. Al, and A. Orman, "WSN-BFSF: A New Data Set for Attacks Detection in Wireless Sensor Networks," 2024. doi: 10.1109/JIOT.2023.3292209.
- [44] T. S, J. S. S. Samhitha, K. A. Sagar, J. S. Yaswanth, and K. Haritha, "Early Forest Fire Prediction System Using Wireless Sensor Network," 2024. doi: 10.1109/DICCT61038.2024.10532798.
- [45] O. A. Ghasemi, M. C. Amirani, and M. Azghani, "Resource and Power Allocation for Sum-Throughput Maximization in RIS-Assisted TDMA Wireless Sensor Networks," 2024. doi: 10.1109/JIOT.2024.3390199.
- [46] C. A. Putra, N. N. Aprilia, A. E. N. Sari, R. M. Wijdan, and A. R. Putri, "Pendampingan Pembuatan Nomor Induk Berusaha (NIB) untuk Pengembangan UMKM di Kelurahan Tlumpu Melalui Online Single Submission (OSS)," *I-Com Indones. Community J.*, 2022, doi: 10.33379/icom.v2i2.1397.
- [47] S. Bhatia, Z. Jaffery, and S. Mehruz, "A Comparative Study of Wireless Communication Protocols for use in Smart Farming Framework Development," 2023. doi: 10.1109/ICCT56969.2023.10075696.
- [48] N. Dharini, J. Katiravan, S. D. M. Priya, and S. V. A. Sneghaa, "Intrusion Detection in Novel WSN-Leach Dos Attack Dataset using Machine Learning based Boosting Algorithms," 2023. doi: 10.1016/j.procs.2023.12.064.
- [49] S. W. Nourildean, M. D. Hassib, and Y. A. Mohammed, "AD-Hoc Routing Protocols in WSN-WiFi based IoT in Smart Home," 2023. doi: 10.1109/DeSE58274.2023.10099981.
- [50] S. S. Khatami, M. Shoebibi, R. Salehi, and M. Kaveh, "Energy-Efficient and Secure Double RIS-Aided Wireless Sensor Networks: A QoS-Aware Fuzzy Deep Reinforcement Learning Approach," 2025. doi: 10.3390/jsan14010018.