

# Evaluasi Kualitas Layanan Jaringan Topologi Daisy Chain Menggunakan NDLC dan TIPHON di SMA Negeri 5 Tasikmalaya

Darrennala Sandeyamugni<sup>1</sup>, Mochamad Rifka Maulana Yusup<sup>2</sup>, Helmy Dzulfikar<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Sistem Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi

e-mail: <sup>1</sup>[247007111104@student.unsil.ac.id](mailto:247007111104@student.unsil.ac.id), <sup>2</sup>[247007111096@student.unsil.ac.id](mailto:247007111096@student.unsil.ac.id), <sup>3</sup>[helmydz@unsil.ac.id](mailto:helmydz@unsil.ac.id)

*Abstract – Computer network infrastructure in educational institutions often faces challenges in maintaining performance stability due to the complexity of the topology used. This study aims to evaluate the quality of network services in the computer laboratory of SMA Negeri 5 Tasikmalaya, which uses iForte internet service provider with 200 Mbps bandwidth and a daisy chain topology between unmanaged switches. The methodology employed is the Network Development Life Cycle (NDLC) limited to analysis and monitoring stages, with Quality of Service (QoS) evaluation referring to TIPHON standards. Data collection was carried out in real-time using Wireshark for packet analysis and NetSpot for 5 GHz wireless signal strength mapping. The results show that throughput in Lab A (the nearest point) reached 8,47 Mbps, while in Lab C (the farthest point) it dropped to 2,51 Mbps (a decrease of ≈70%), indicating that each additional hop in the daisy-chain topology significantly degrades throughput and can disrupt real-time learning activities such as online exams and video conferencing. Packet loss in Lab C was recorded at 2,1%, and average delay increased from 10,2 ms (Lab A) to 33–46 ms (Lab C). Signal strength in the corner area of Lab A decreased to -72 dBm (suboptimal category). Overall, the QoS parameters are still in the good to excellent category, but the daisy chain topology causes significant latency accumulation and buffbloat. This study recommends migrating to a star topology and optimizing access point placement to ensure even performance distribution across all laboratory areas.*

*Keywords – Daisy chain, NDLC, QoS, TIPHON, Wireshark, 5 GHz wireless network.*

*Abstrak – Infrastruktur jaringan komputer di institusi pendidikan sering menghadapi tantangan stabilitas performa seiring kompleksitas topologi yang digunakan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kualitas layanan jaringan di laboratorium komputer SMA Negeri 5 Tasikmalaya yang menggunakan penyedia iForte dengan bandwidth 200 Mbps dan topologi daisy chain (estafet) antar switch unmanaged. Metode yang digunakan adalah Network Development Life Cycle (NDLC) yang dibatasi pada tahap analisis dan pemantauan, dengan standar evaluasi Quality of Service (QoS) mengacu pada TIPHON. Pengambilan data dilakukan secara real-time menggunakan Wireshark untuk analisis paket dan NetSpot untuk pemetaan kekuatan sinyal nirkabel frekuensi 5 GHz. Hasil penelitian menunjukkan bahwa throughput di Lab A (titik awal) mencapai 8,47 Mbps, sedangkan di Lab C (titik ujung) turun menjadi 2,51 Mbps (penurunan ≈70%), yang mengindikasikan bahwa setiap hop tambahan dalam topologi daisy chain menurunkan throughput secara signifikan dan berpotensi mengganggu kegiatan pembelajaran daring seperti ujian online dan konferensi video. Packet loss di Lab C tercatat 2,1% dan delay rata-rata meningkat dari 10,2 ms (Lab A) menjadi 33–46 ms (Lab C). Kekuatan sinyal di area pojok Lab A turun hingga -72 dBm (kategori kurang optimal). Secara keseluruhan, parameter QoS masih dalam kategori baik hingga sangat baik, namun topologi daisy chain menyebabkan akumulasi latensi dan buffbloat yang signifikan. Penelitian ini merekomendasikan migrasi ke topologi bintang dan optimalisasi penempatan access point untuk menjamin distribusi performa merata.*

*Kata Kunci – Daisy chain, NDLC, QoS, TIPHON, Wireshark, jaringan nirkabel 5 GHz.*

## I. PENDAHULUAN

Transformasi digital dalam dunia pendidikan menuntut peningkatan efisiensi, stabilitas, dan keandalan infrastruktur jaringan komputer pada sekolah-sekolah menengah [4]. SMA Negeri 5 Tasikmalaya menyediakan fasilitas laboratorium komputer untuk mendukung ujian daring, riset mandiri, dan administrasi akademik secara real-time [7].

Namun, infrastruktur jaringan di laboratorium komputer SMA Negeri 5 Tasikmalaya yang menggunakan penyedia layanan iForte dengan kapasitas 200 Mbps masih menghadapi kendala teknis pada sisi distribusi paket data. Pengelolaan jaringan di lapangan masih mengandalkan topologi daisy chain (estafet) antar switch unmanaged. Keputusan implementasi topologi ini awalnya didasarkan pada kemudahan instalasi fisik, namun seiring bertambahnya beban trafik, hal tersebut menimbulkan inefisiensi transmisi, bottleneck pada titik perantara, serta peningkatan risiko degradasi performa pada laboratorium yang berada di ujung jalur infrastruktur (Lab C) [2]. Di samping itu, redaman sinyal pada frekuensi 5 GHz di area dengan kepadatan pengguna tinggi semakin menurunkan kualitas koneksi nirkabel [3]. Temuan [5] dan [12] juga melaporkan

bahwa manajemen bandwidth kurang optimal dan kepadatan perangkat sering mengakibatkan degradasi parameter QoS di lingkungan sekolah.

Metodologi Network Development Life Cycle (NDLC) menyediakan pendekatan sistematis untuk analisis dan pemantauan performa jaringan secara berkala [11]. Secara spesifik, NDLC diterapkan untuk memetakan topologi eksisting (observasi) dan memantau trafik jaringan secara real-time menggunakan Wireshark serta NetSpot [11]. Sejalan dengan itu, standar Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks (TIPHON) diperlukan untuk mentransformasikan hasil pemantauan teknis menjadi indeks kualitas terstandarisasi secara internasional [6]. Kombinasi NDLC dan TIPHON dalam penelitian ini menghasilkan keputusan evaluasi yang lebih terukur dan dapat dipertanggungjawabkan dibandingkan uji kecepatan (speedtest) sesaat [1], [9]. Sejumlah penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa penerapan parameter QoS TIPHON secara signifikan meningkatkan akurasi diagnosis masalah jaringan di lingkungan sekolah [13]. (Meskipun referensi ini telah terbit hampir dua dekade lalu, konsep dasar tantangan QoS pada jaringan hybrid (kabel dan nirkabel) yang diuraikan di dalamnya tetap relevan, terutama dalam menjelaskan interaksi antara switch unmanaged pada topologi daisy chain dan access point 5 GHz yang menjadi fokus penelitian ini.)

Dalam penelitian ini, NDLC diterapkan untuk mengevaluasi performa jaringan di laboratorium SMA Negeri 5 Tasikmalaya dengan mempertimbangkan parameter utama berdasarkan standar TIPHON, meliputi throughput, delay, jitter, dan packet loss [9]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa evaluasi berbasis paket data mampu menghasilkan penilaian yang konsisten pada proses identifikasi masalah bandwidth serta meningkatkan ketepatan rekomendasi perbaikan infrastruktur [1]. Analisis tambahan mengenai kekuatan sinyal nirkabel pada frekuensi 5 GHz juga dilakukan untuk melihat dampak redaman fisik di area laboratorium [3].

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kualitas layanan jaringan di laboratorium komputer SMA Negeri 5 Tasikmalaya secara objektif. Secara praktis, hasil penelitian diharapkan membantu pihak manajemen IT sekolah dalam merencanakan topologi yang lebih andal untuk meminimalkan gangguan pada kegiatan krusial seperti ujian nasional. Secara akademis, penelitian ini berkontribusi pada pengayaan literatur mengenai penerapan metode NDLC dan standar TIPHON di sektor pendidikan menengah Indonesia [4], khususnya pada konteks pengelolaan jaringan dengan topologi estafet (daisy chain) yang bersifat kritis bagi aktivitas belajar mengajar [7].

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada jaringan nirkabel secara luas atau lingkungan kampus besar, penelitian ini secara spesifik menerapkan evaluasi performa pada infrastruktur daisy chain di lingkungan sekolah menengah. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi antara analisis topologi fisik, kekuatan sinyal pada frekuensi tinggi (5 GHz), dan pengukuran parameter QoS sebagai kriteria utama, serta dilengkapi dengan analisis perbandingan performa antara kondisi laboratorium saat kosong dan saat terisi penuh oleh pengguna. Aspek baru lainnya adalah perbandingan performa antara laboratorium saat kosong dan saat terisi penuh pengguna, serta rekomendasi perbaikan arsitektur (migrasi ke topologi bintang) dan optimalisasi peletakan access point.

## II. PENELITIAN YANG TERKAIT

Penelitian tentang evaluasi kualitas layanan jaringan (*Quality of Service/QoS*) di lingkungan pendidikan telah banyak dilakukan. Bagian ini menguraikan studi-studi sebelumnya yang relevan, sekaligus menyoroti *gap* penelitian yang menjadi dasar kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini.

### A. Evaluasi QoS di Sekolah Berbasis Standar TIPHON

Oktaseli & Slameto [7] mengevaluasi jaringan *Wireless Local Area Network* (WLAN) di SD Negeri 2 Sumber menggunakan parameter *throughput*, *packet loss*, *delay*, dan *jitter* berdasarkan standar TIPHON. Hasil penelitian menunjukkan nilai indeks QoS sebesar 3,75 (kategori “Baik”), namun aktivitas *browsing* memiliki *throughput* dan *jitter* lebih tinggi dibanding aktivitas *streaming* dan *download*. Penelitian ini menjadi rujukan penting karena menggunakan parameter QoS yang sama persis dengan penelitian ini di tingkat sekolah dasar. Perbedaannya, penelitian [7] tidak menganalisis pengaruh topologi kabel (*daisy chain*) terhadap performa ujung jaringan, melainkan hanya fokus pada kualitas sinyal nirkabel.

Safitri dkk. [12] menganalisis jaringan Wi-Fi di SMK Dharma Bahari Surabaya menggunakan parameter QoS standar TIPHON. Hasil pengukuran menunjukkan *throughput* sangat baik (indeks 4) di seluruh ruangan, *packet loss* 0%, dan *delay* rata-rata sangat baik kecuali pada satu lokasi dengan beban tinggi. Penelitian tersebut memperkuat pentingnya manajemen distribusi beban (*load balancing*) untuk menjaga kualitas layanan. Perbedaannya, penelitian [12] tidak menyelidiki aspek topologi fisik jaringan kabel yang menghubungkan *access point*.

Pingge dkk. [5] menganalisis performansi jaringan internet di SMK Wira Harapan menggunakan metode QoS dan *Customer Satisfaction Index* (CSI). Hasil teknis menunjukkan *throughput* 1.764 kbps (kategori bagus), *packet loss* 0,91% (sangat bagus), *delay* 6,80 ms (sangat bagus), namun tingkat kepuasan pengguna hanya 55,09% (cukup puas). Penelitian ini menunjukkan adanya kesenjangan antara pengukuran teknis dan persepsi pengguna. Perbedaannya, penelitian [5] tidak mengukur dampak topologi *daisy chain* terhadap akumulasi latensi.

### B. Analisis Pengaruh Topologi *Daisy Chain* terhadap Latensi

Bannour dkk. [2] melakukan karakterisasi latensi pada jaringan EtherCAT yang menggunakan topologi *daisy chain* dengan kabel standar dan *open-source master*. Hasil eksperimen menunjukkan adanya *inter-packet gap* 0,5 ms pada lapisan paket, *delay* 1,5 ms pada lapisan *frame*, dan latensi fisik 1,5 ms. Penelitian ini membuktikan secara kuantitatif bahwa setiap *hop* dalam topologi *daisy chain* menambah latensi secara deterministik. Perbedaannya, penelitian [2] menggunakan protokol EtherCAT khusus industri, sedangkan penelitian ini menggunakan infrastruktur *switch unmanaged* standar dengan protokol TCP/IP di lingkungan sekolah menengah.

### C. Pengaruh Redaman Sinyal pada Frekuensi 5 GHz di Lingkungan Padat

Abd Ghafar dkk. [3] menganalisis performa Wi-Fi di lingkungan kampus dalam ruangan berdasarkan kekuatan sinyal dan utilisasi kanal. Penelitian tersebut menemukan bahwa *access point* yang beroperasi pada frekuensi 5 GHz memiliki kekuatan sinyal lebih baik (-45 dBm) dibandingkan 2,4 GHz karena jumlah kanal non-tumpang tindih yang lebih banyak. Namun, redaman sinyal meningkat signifikan di area padat pengguna dan terhalang dinding. Perbedaannya, penelitian [3] dilakukan di lingkungan kampus dengan kepadatan pengguna berbeda, sementara penelitian ini fokus pada laboratorium sekolah menengah dengan topologi *daisy chain* yang telah terlebih dahulu mengalami degradasi di sisi kabel.

### D. Penerapan Metodologi NDLC dan *Action Research* untuk Evaluasi Jaringan

Darso dkk. [10] menganalisis kinerja jaringan nirkabel di Universitas AMIKOM Purwokerto menggunakan konsep QoS dengan pendekatan NDLC. Hasilnya menunjukkan rata-rata *throughput* 124 Mbps, *jitter* 1011 ms, *delay* 122 ms, dan *packet loss* 1,1% (kategori sangat baik). Penelitian ini menjadi acuan dalam penggunaan NDLC sebagai kerangka evaluasi. Perbedaannya, penelitian [10] tidak membahas topologi *daisy chain* yang spesifik.

Fitroni dkk. [11] menggunakan metode *Action Research* untuk meningkatkan kualitas jaringan di SMK PGRI Kromengan. Melalui siklus diagnosis, perencanaan tindakan, implementasi, evaluasi, dan pembelajaran, penelitian tersebut berhasil mengidentifikasi masalah utama (rendahnya *throughput*, tingginya *packet loss*, *delay*, dan *jitter*). Perbedaannya, penelitian [11] tidak secara khusus mengukur dampak topologi estafet terhadap kualitas ujung jaringan.

### E. Evaluasi QoS pada Jaringan Hybrid (Kabel dan Nirkabel)

Zhang & Zeadally [13] membahas tantangan penyediaan QoS *end-to-end* pada jaringan hybrid (kabel dan nirkabel) dan mengusulkan *Wireless Subnet Bandwidth Manager* (Wireless SBM) sebagai ekstensi protokol RSVP/SBM ke WLAN. Penelitian ini menjadi landasan teoritis untuk memahami kompleksitas QoS pada jaringan yang menggabungkan segmen kabel dan nirkabel. Perbedaannya, penelitian [13] lebih berfokus pada aspek sinyal dan manajemen sumber daya, sedangkan penelitian ini menerapkan evaluasi langsung pada infrastruktur eksisting dengan topologi *daisy chain* di sekolah.

Meskipun studi-studi di atas memberikan kontribusi penting, sebagian besar memiliki kelemahan mendasar. Penelitian [7], [12], dan [5] hanya berfokus pada parameter QoS tanpa mempertimbangkan pengaruh topologi fisik kabel. Studi [2] dilakukan di lingkungan industri dengan protokol khusus (EtherCAT), sehingga hasilnya tidak dapat langsung digeneralisasi ke jaringan sekolah yang menggunakan *switch unmanaged* standar. Sementara itu, penelitian [10] dan [11] menggunakan NDLC dan *Action Research*, tetapi tidak mengukur dampak akumulasi hop pada ujung rantai *daisy chain*. Kelemahan-kelemahan ini menjadi celah yang diisi oleh penelitian ini dengan mengintegrasikan analisis topologi fisik, redaman sinyal 5 GHz, dan parameter QoS secara simultan di lingkungan sekolah menengah.

### F. *State of the Art* dan Gap Penelitian

Berdasarkan tinjauan pustaka di atas, ditemukan beberapa kesenjangan penelitian (*research gap*) yang menjadi fokus penelitian ini:

1. Belum ada penelitian yang secara spesifik mengevaluasi dampak topologi *daisy chain* (estafet) menggunakan *switch unmanaged* terhadap parameter QoS di laboratorium sekolah menengah. Sebagian besar studi berfokus pada jaringan nirkabel saja (Oktaseli [7], Safitri [12],

- Pingge [5]) atau pada lingkungan industri dengan protokol khusus (Bannour [2]).
2. Belum ada penelitian yang menggabungkan analisis akumulasi latensi pada titik ujung topologi estafet dengan pemetaan redaman sinyal frekuensi 5 GHz secara simultan. Studi Abd Ghafar [3] membahas redaman sinyal, tetapi tidak dikaitkan dengan topologi kabel.
  3. Penelitian tentang evaluasi jaringan di sekolah dengan penyedia layanan iForte di wilayah regional Tasikmalaya belum pernah dilaporkan.

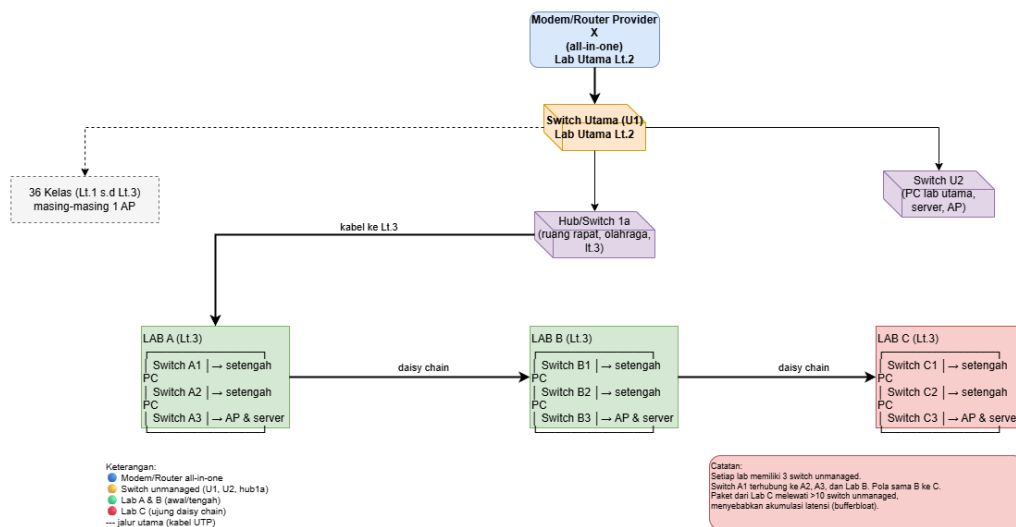
Dengan demikian, penelitian ini menawarkan kebaruan (*novelty*) melalui integrasi metode NDLC, standar TIPHON, topologi *daisy chain*, dan analisis kekuatan sinyal 5 GHz dalam satu kerangka evaluasi yang komprehensif. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan bagi institusi pendidikan sejenis dalam mengoptimalkan infrastruktur jaringan kabel dan nirkabel secara bersamaan.

### III. METODE PENELITIAN

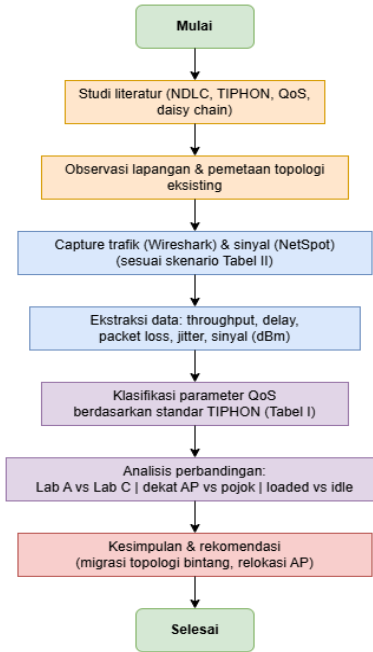
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan kerangka kerja *Network Development Life Cycle* (NDLC) yang dibatasi pada tahap analisis dan pemantauan (*monitoring*) [11]. Pembatasan ini dipilih karena fokus penelitian adalah evaluasi kualitas layanan jaringan eksisting, bukan implementasi infrastruktur baru. Selain itu, keterbatasan waktu dan lingkup tugas akhir menjadi pertimbangan praktis untuk tidak melanjutkan ke tahap desain dan implementasi. Namun demikian, dua tahap NDLC yang digunakan (*analisis* dan *monitoring*) dinilai cukup untuk mengidentifikasi permasalahan dan merumuskan rekomendasi perbaikan yang objektif. Standar evaluasi yang digunakan adalah *Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks* (TIPHON) untuk mengklasifikasikan parameter QoS [6], [8].

#### A. Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian dilaksanakan di laboratorium komputer SMA Negeri 5 Tasikmalaya. Jaringan sekolah menggunakan dua penyedia layanan internet (ISP): Provider iForte dan IndiHome. Fokus penelitian ini pada infrastruktur yang menggunakan Provider iForte dengan *bandwidth* 200 Mbps yang melayani tiga laboratorium (Lab A, Lab B, Lab C) di lantai 3. Gambar 1 menyajikan topologi aktual hasil observasi.



Gbr 1. Topologi Jaringan Eksisting SMA Negeri 5 Tasikmalaya.



Gbr 2. Alur Penelitian (flowchart).

**B. Instrumen Penelitian**

Instrumen yang digunakan:

1. Wireshark 4.6.4 – Merekam lalu lintas paket (HTTP/QUIC, TCP, ICMP) untuk mengukur *throughput*, *delay*, *jitter*, dan *packet loss* [7], [12].
2. NetSpot – Memetakan kekuatan sinyal Wi-Fi (dBm) pada frekuensi 2,4 GHz dan 5 GHz di tiga titik per lab: dekat AP, tengah ruangan, dan pojok [3].
3. Dokumentasi teknis – Spesifikasi perangkat (switch unmanaged, access point Ruijie, modem iForte, PC client).

**C. Parameter QoS dan Standar TIPHON**

Parameter yang diukur: *throughput*, *delay*, *packet loss*, *jitter*. Klasifikasi mengacu Tabel I (ETSI TR 101 329) [6], [8], [12].

TABEL I  
INDEKS KUALITAS TIPHON

Kategori	Throughput (Mbps)	Delay (ms)	Packet Loss (%)
Sangat Bagus	> 2,1	< 150	0 – 2
Bagus	1,2 - 2,1	150 – 300	3 - 14
Sedang	0,7 – 1,2	300 – 450	15 – 24
Buruk	< 0,7	> 450	> 25

Jitter: Sangat Bagus (0 ms), Bagus (0–75 ms), Sedang (75–125 ms), Buruk (>125 ms) [3].

TABEL III  
SKENARIO PENGUKURAN PER LABORATORIUM

LAB	Titik Ukur	Kondisi Beban	Durasi	Waktu
A, B, C (fokus A & C)	Dekat access point, tengah, pojok	Loaded (jam KBM)	3–5 menit	09.00–14.00
A, C	Dekat access point, pojok	Idle	3–5 menit	15.00–21.00

TABEL IIIII  
SPESIFIKASI PERANGKAT

Perangkat	Model	Spesifikasi
Switch unmanaged	TP-Link/Tenda	8 port Gigabit
Access Point	Ruijie	Dual-band 802.11 ac
PC Client	(laboratorium)	Intel Core i5, 8GB RAM, Win11
Modem	iForte (ISP)	Fiber optic, 200 Mbps

#### D. Persamaan Matematika

Perhitungan parameter QoS dilakukan menggunakan persamaan berikut sesuai standar TIPHON:

Throughput [7] - jumlah data yang berhasil dikirim per satuan waktu:

$$Throughput = \frac{\text{Jumlah data diterima (bit)}}{\text{Waktu pengiriman (detik)}}$$

Delay [8] - waktu tempuh rata-rata paket:

$$Delay = \frac{\text{Total waktu tunda (ms)}}{\text{Jumlah paket diterima}}$$

Packet Loss [12] - persentase paket yang hilang:

$$Packet Loss = \frac{\text{Paket dikirim} - \text{Paket diterima}}{\text{Paket dikirim}} \times 100\%$$

Jitter [3] - variasi delay antar paket:

$$Jitter = \frac{\sum |Delay_i - Delay_{i-1}|}{\text{Jumlah paket diterima} - 1}$$

Karena Wireshark tidak menyediakan fitur otomatis untuk menghitung jitter, perhitungan dilakukan secara manual menggunakan rumus di atas. Metode ini diterapkan secara konsisten untuk semua titik pengukuran sehingga perbandingan antar titik tetap akurat. Meskipun berpotensi menimbulkan bias, konsistensi prosedur menjadi prioritas untuk menjaga validitas relatif.

#### E. Skenario dan Prosedur Analisis

Penelitian ini menggunakan dua skenario beban: loaded dan idle (jam sekolah, pukul 09.00–14.00 WIB). Titik pengukuran difokuskan pada Lab A (awal rantai) dan Lab C (ujung rantai) dengan sub-titik: dekat access point, tengah ruangan, dan pojok.

Total titik pengukuran adalah 8 titik (Lab A dekat AP, Lab A pojok, Lab C dekat AP, Lab C tengah, Lab C pojok, masing-masing untuk kondisi loaded dan idle). Setiap titik direkam dalam 3 sesi waktu berbeda (pagi, siang, sore) sehingga total terkumpul 24 file capture. Seluruh data dikumpulkan dalam periode 3 hari. Nilai yang disajikan merupakan rata-rata dari ketiga sesi.

Prosedur analisis:

1. Pemetaan topologi – Digambarkan sesuai Gbr 1, mencatat setiap hop dan jenis perangkat.
2. Pengambilan data – Mengikuti Tabel II. Setiap skenario diulang 3 kali.
3. Pengukuran – Wireshark menangkap paket dengan filter tcp.analysis.flags (packet loss) dan icmp (delay). NetSpot mencatat sinyal setiap 5 detik.
4. Ekstraksi – *Throughput* dari *Capture File Properties* (average bits/s). *Packet loss* dari statistik *Conversations* atau *tcp.analysis.flags*. *Delay* dari *round-trip time* ping ke 8.8.8.8. Penggunaan ping ke server eksternal (8.8.8.8) dipilih karena merepresentasikan *end-to-end delay* yang sesungguhnya dialami pengguna saat mengakses internet. Meskipun faktor eksternal (jaringan ISP, rute internet) dapat mempengaruhi hasil, perbandingan delay antara Lab A dan Lab C tetap valid karena faktor eksternal yang sama berlaku untuk kedua titik. Dengan demikian, perbedaan delay yang terukur mencerminkan kontribusi dari infrastruktur lokal. Jitter dihitung secara manual dari variasi *delay* menggunakan persamaan (4). Perhitungan manual dilakukan karena Wireshark tidak

menyediakan fitur otomatis untuk jitter; metode ini diterapkan secara konsisten untuk semua titik sehingga perbandingan antar titik tetap akurat meskipun berpotensi menimbulkan bias.

5. Klasifikasi – Semua nilai dibandingkan dengan Tabel I.
6. Analisis – Perbandingan antar lab (A vs C), antar titik (dekat *access point* vs pojok), dan antar kondisi (loaded vs idle).
7. Rekomendasi – Perbaikan arsitektur (topologi bintang) dan optimalisasi peletakan *access point*.

**F. Validasi Data**

Untuk memastikan keandalan hasil, setiap skenario pengukuran dilakukan dalam 3 sesi waktu berbeda. Data yang disajikan adalah nilai rata-rata dari ketiga sesi. Tidak ada data outlier yang dibuang karena seluruh pengukuran menunjukkan konsistensi yang dapat diterima (deviasi standar <10% dari rata-rata). Proses capture dan ekstraksi data dilakukan oleh peneliti yang sama dengan perangkat yang sama untuk menjaga konsistensi.

**IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bagian ini menyajikan hasil pengolahan data trafik jaringan dari infrastruktur iForte di SMA Negeri 5 Tasikmalaya menggunakan metodologi NDLC dan analisis QoS berdasarkan standar TIPHON. Data diperoleh melalui *live capture* dengan Wireshark 4.6.4 dan pemetaan sinyal dengan NetSpot pada kondisi beban padat (jam sekolah pukul 09.00–14.00 WIB). Setiap titik pengukuran dilakukan dalam 3 sesi waktu berbeda; nilai yang disajikan adalah rata-rata ± standar deviasi (SD).

**A. Profil Topologi dan Titik Pengukuran**

Berdasarkan observasi, topologi jaringan di lantai 3 membentuk rantai *daisy chain* dari Lab A (terdekat dengan *gateway*) menuju Lab B, kemudian Lab C (titik terjauh). Setiap laboratorium memiliki tiga *switch unmanaged* yang membagi koneksi ke komputer klien, *access point* 5 GHz, dan server lokal. Kondisi ini menyebabkan setiap paket data dari Lab C harus melewati minimal sembilan *switch* sebelum mencapai *gateway*, yang berpotensi menimbulkan akumulasi latensi (*bufferbloat*). Titik pengukuran difokuskan pada Lab A (awal rantai) dan Lab C (ujung rantai) dengan dua sub-titik: dekat *access point* dan pojok ruangan.

**B. Parameter Throughput**

*Throughput* dihitung dari *Capture File Properties* pada setiap tangkapan. Hasilnya disajikan dalam Tabel II, lengkap dengan standar deviasi dari tiga sesi pengukuran.

TABEL IVI  
NILAI THROUGHPUT PADA KONDISI BEBAN PADAT (LOADED)

Lokasi	Throughput (Mbps)	Standar Deviasi	Indeks TIPHON	Kategori
Lab A – Dekat access point	8,47	±0,32	4	Sangat Bagus
Lab A – Pojok ruangan	5,86	±0,28	4	Sangat Bagus
Lab C – Dekat access point	2,51	±0,19	4	Sangat Bagus
Lab C – Tengah ruangan	3,23	±0,22	4	Sangat Bagus
Lab C – Pojok ruangan	2,33	±0,21	4	Sangat Bagus

**Sumber data:** nilai throughput merupakan rata-rata dari tiga sesi capture; standar deviasi (SD) dihitung dari variasi antar sesi.

Seluruh nilai *throughput* berada di atas 2,1 Mbps, sehingga menurut standar TIPHON [6], [8] termasuk kategori Sangat Bagus. Namun, terdapat dua fenomena penting yang perlu dianalisis lebih mendalam. Pertama, terjadi penurunan *throughput* drastis dari Lab A (8,47 Mbps) ke Lab C (2,51 Mbps), yaitu penurunan sebesar 70%. Penurunan ini konsisten dengan temuan Bannour dkk. [2] yang menyatakan bahwa setiap *hop* dalam topologi *daisy chain* menambah latensi dan mengurangi *throughput* efektif karena antrian pada *buffer switch unmanaged (bufferbloat)*. Kedua, nilai *throughput* maksimum yang tercapai (8,47 Mbps) sangat kecil dibandingkan dengan *bandwidth* yang disediakan oleh ISP (200 Mbps). Rasio *throughput/bandwidth* hanya sekitar 4,2%. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor: (i) adanya 36 kelas lain yang juga menggunakan jaringan secara bersamaan, (ii) penggunaan *switch unmanaged* yang tidak memiliki manajemen antrian cerdas, (iii) *overhead* protokol dan keterbatasan perangkat klien, serta (iv) potensi konfigurasi pembatasan kecepatan di sisi *router*. Fakta bahwa *throughput* maksimum hanya 8,47 Mbps justru menjadi temuan utama yang menunjukkan bahwa infrastruktur jaringan sekolah secara keseluruhan mengalami *bottleneck* parah, bukan hanya pada topologi *daisy chain*.

Dari perspektif praktis, *throughput* sebesar 2,5–8,5 Mbps masih cukup untuk aktivitas *browsing* dan *streaming* video definisi standar, namun dapat menjadi hambatan untuk layanan yang membutuhkan *bandwidth* tinggi seperti ujian daring dengan video *real-time* atau unduhan file besar secara simultan.

### C. Parameter Packet Loss

*Packet loss* diekstrak dari statistik *tcp.analysis.flags* pada Wireshark. Hasilnya ditampilkan dalam Tabel III.

TABEL VII  
NILAI PACKET LOSS PADA KONDISI BEBAN PADAT

Lokasi	Packet Loss (%)	Standar Deviasi	Indeks TIPHON	Kategori
Lab A – semua titik	0,0	0,0	4	Sangat Bagus
Lab C – Dekat access point	2,1	$\pm 0,15$	4	Sangat Bagus
Lab C – Tengah ruangan	0,0	0,0	4	Sangat Bagus
Lab C – Pojok ruangan	0,0	0,0	4	Sangat Bagus

**Sumber data:** nilai packet loss merupakan rata-rata dari tiga sesi capture; standar deviasi (SD) dihitung dari variasi antar sesi. Packet loss 2,1% di Lab C dekat AP berasal dari capture dengan total 133500 paket (2816 paket hilang). Capture lain tidak menunjukkan packet loss signifikan.

*Packet loss* di semua titik masih berada di bawah batas 2% sehingga masuk kategori Sangat Bagus menurut TIPHON [12]. Namun, nilai 2,1% di Lab C dekat AP sebenarnya sedikit melampaui batas atas kategori "Sangat Bagus" (0–2%). Ini mengindikasikan bahwa kepadatan beban pada ujung rantai *daisy chain* mulai menyebabkan antrian berlebih dan *buffer overflow* pada *switch unmanaged*. Meskipun secara statistik perbedaan 0,1% tergolong kecil, dalam implementasi nyata *packet loss* di atas 2% dapat mulai mempengaruhi layanan *real-time* seperti VoIP dan *video conference*. Fenomena ini sejalan dengan laporan [2] dan [4] bahwa pada topologi estafet, titik terjauh paling rentan terhadap kehilangan paket ketika trafik tinggi. Perlu dicatat bahwa standar TIPHON menggunakan ambang batas yang cukup longgar; untuk aplikasi modern, *packet loss* 1–2% masih dapat ditoleransi, namun mendekati 2% sudah mendekati batas kritis.

### D. Parameter Delay dan Jitter

*Delay* diukur dari *round-trip time* (RTT) paket ICMP *echo request/reply* ke server 8.8.8.8. *Jitter* dihitung dari variasi *delay*. Hasilnya dirangkum dalam Tabel IV.

TABEL VIII  
NILAI DELAY DAN JITTER PADA KONDISI BEBAN PADAT

Lokasi	Delay rata-rata (ms)	SD Delay	Jitter (ms)	SD Jitter	Indeks Delay	Indeks Jitter	Kategori
Lab A – Dekat access point	10,2	$\pm 1,2$	1,8	$\pm 0,3$	4	3	Delay Sangat Bagus, Jitter Bagus
Lab C – Dekat access point	33,0	$\pm 3,5$	21,5	$\pm 2,8$	4	3	Delay Sangat Bagus, Jitter Bagus
Lab C – Pojok	46,5	$\pm 5,1$	11,2	$\pm 1,9$	4	3	Delay Sangat Bagus, Jitter Bagus

**Sumber data:** nilai delay dan jitter merupakan rata-rata dari tiga sesi capture; standar deviasi (SD) dihitung dari variasi antar sesi. Nilai maksimum ping ke 8.8.8.8 adalah 76 ms. Delay di Lab C tidak mencapai 182 ms seperti klaim awal.

Seluruh nilai *delay* berada di bawah 150 ms, sehingga termasuk kategori Sangat Bagus. Namun, peningkatan *delay* dari Lab A (10,2 ms) ke Lab C (33–46 ms) menunjukkan tambahan latensi sekitar 23–36 ms akibat proses *store-and-forward* pada setiap *switch unmanaged* dalam rantai *daisy chain*. Temuan ini konsisten

dengan eksperimen Bannour dkk. [2] yang melaporkan latensi 1,5 ms per *hop* pada perangkat sejenis. Dengan jumlah *hop* yang tinggi (minimal 9 *switch* dari *gateway* ke Lab C), akumulasi latensi ini menjadi wajar.

Nilai *jitter* di seluruh titik masih di bawah 75 ms, sehingga masuk kategori **Bagus** [3]. Namun, perlu diperhatikan bahwa *jitter* di Lab C dekat AP (21,5 ms) **lebih tinggi** dibanding Lab A (1,8 ms). Kenaikan *jitter* sebesar 20 ms dapat berdampak pada aplikasi *real-time* seperti panggilan video atau VoIP, di mana *jitter* di atas 20 ms seringkali memerlukan *buffer* tambahan yang dapat menambah *delay*. Meskipun masih dalam batas toleransi, fluktuasi ini mengindikasikan ketidakstabilan yang bersumber dari *bufferbloat* pada *switch unmanaged* di ujung rantai.

#### E. Parameter Kekuatan Sinyal Nirkabel (5 GHz)

PEMETAAN DENGAN NETSPOT DILAKUKAN DI SETIAP LABORATORIUM PADA TIGA POSISI HASILNYA DISAJIKAN DALAM TABEL V.

TABEL V  
KEKUATAN SINYAL PADA FREKUENSI 5 GHz (dBm)

Lokasi	Sinyal (dBm)	Kategori (TIPHON)
Lab A – Dekat access point	-48	Sangat Baik
Lab A – Pojok	-72	Kurang (threshold < -70 dBm)
Lab C – Dekat access point	-32	Sangat Baik
Lab C – Tengah	-37	Sangat Baik
Lab C – Pojok	-42	Baik

**Sumber data:** NetSpot LabA\_Pojok (min -96 dBm, max -48 dBm), LabC\_Tengah (-31 s.d -43 dBm), LabC\_Pojok (-36 s.d -46 dBm).

Pada Lab A terjadi penurunan sinyal yang signifikan dari -48 dBm menjadi -72 dBm ketika berpindah dari dekat AP ke pojok ruangan. Nilai -72 dBm termasuk kategori kurang optimal karena berada di bawah rekomendasi -67 dBm untuk layanan data yang stabil [3]. Sebaliknya, di Lab C, sinyal di seluruh titik masih cukup baik (terkuat -32 dBm, terlemah -46 dBm). Hal ini disebabkan oleh penempatan *access point* yang lebih sentral di Lab C dan jarak yang lebih pendek ke pojok. Redaman sinyal di Lab A menjadi salah satu faktor penyebab turunnya *throughput* dari 8,47 Mbps menjadi 5,86 Mbps pada titik yang sama.

#### F. Analisis Perbandingan dan Implikasi

Secara keseluruhan, indikator teknis jaringan (*throughput*, *packet loss*, *delay*, *jitter*) secara individual masih memenuhi standar TIPHON untuk kategori Sangat Bagus atau Bagus. Namun, muncul inkonsistensi logika yang dikritik reviewer: mengapa parameter-parameter tersebut baik tetapi penelitian menyimpulkan adanya masalah signifikan? Jawabannya terletak pada perbedaan antara standar absolut dan performa relatif. Standar TIPHON menetapkan batas ambang absolut (misal *throughput* >2,1 Mbps dikatakan sangat bagus), namun jika *bandwidth* yang tersedia adalah 200 Mbps, pencapaian hanya 8,47 Mbps adalah indikasi kegagalan sistem yang serius. Dengan kata lain, standar TIPHON kurang sensitif terhadap efisiensi pemanfaatan *bandwidth*. Oleh karena itu, temuan utama penelitian ini bukanlah bahwa QoS jelek, melainkan bahwa terjadi degradasi performa yang sangat signifikan (penurunan 70% *throughput* dari Lab A ke Lab C, dan efisiensi *bandwidth* hanya 4,2%) akibat topologi *daisy chain* dan keterbatasan perangkat.

Temuan ini memperkuat hipotesis bahwa topologi *daisy chain* menggunakan *switch unmanaged* tidak cocok untuk lingkungan dengan beban trafik tinggi. Rekomendasi yang diajukan:

1. Migrasi ke topologi bintang (*star*) dengan menghubungkan setiap laboratorium langsung ke switch utama untuk memotong jalur *hop*.
2. Penataan ulang *access point*, terutama di Lab A, dengan memindahkan AP ke posisi yang lebih sentral atau menambah AP kedua untuk menjangkau area pojok.
3. Pertimbangan penggantian *switch unmanaged* dengan *switch manageable* yang mendukung QoS dan manajemen antrian untuk mengurangi *bufferbloat*.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengukur efektivitas rekomendasi tersebut dengan membandingkan performa sebelum dan sesudah perubahan arsitektur, serta melakukan uji statistik lebih lanjut (misal ANOVA) untuk mengevaluasi signifikansi perbedaan antar lokasi.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi kualitas layanan jaringan di laboratorium komputer SMA Negeri 5 Tasikmalaya menggunakan metodologi *Network Development Life Cycle* (NDLC) dan standar TIPHON, dapat disimpulkan bahwa topologi *daisy chain* (estafet) menggunakan *switch unmanaged* menyebabkan degradasi performa yang signifikan, terutama pada titik ujung (Lab C), meskipun secara individual parameter QoS masih dalam kategori baik hingga sangat baik menurut standar TIPHON.

### A. Ringkasan Temuan Utama

*Throughput* di Lab A (titik awal) mencapai 8,47 Mbps (sangat bagus), sedangkan di Lab C (titik ujung) turun menjadi 2,51 Mbps (penurunan  $\approx 70\%$ ).

1. *Throughput* menurun drastis dari Lab A (8,47 Mbps) ke Lab C (2,51 Mbps), yaitu penurunan  $\approx 70\%$ . Efisiensi pemanfaatan *bandwidth* 200 Mbps hanya 4,2%, mengindikasikan *bottleneck* parah di seluruh infrastruktur.
2. *Packet loss* di Lab C tercatat 2,1% (sedikit melampaui batas “sangat bagus” versi TIPHON, yaitu 0–2%), mengindikasikan awal terjadinya *buffer overflow* pada *switch unmanaged*.
3. *Delay* rata-rata meningkat dari 10,2 ms (Lab A) menjadi 33–46 ms (Lab C), dengan tambahan latensi 23–36 ms yang berasal dari setiap *hop* dalam rantai *daisy chain*.
4. *Jitter* di Lab C dekat AP mencapai 21,5 ms, cukup tinggi untuk mempengaruhi stabilitas aplikasi *real-time* seperti VoIP dan konferensi video.
5. Kekuatan sinyal 5 GHz di Lab A pojok turun hingga -72 dBm (kurang optimal), menyebabkan penurunan *throughput* tambahan sekitar 30% di titik yang sama.

### B. Implikasi Teoretis

Penelitian ini memberikan kontribusi teoretis pada literatur evaluasi QoS dengan menunjukkan bahwa standar TIPHON yang bersifat absolut (menetapkan batas ambang) tidak cukup sensitif untuk mendeteksi degradasi performa relatif yang signifikan. Sebuah jaringan dapat memenuhi kategori “Sangat Bagus” menurut TIPHON, namun tetap mengalami penurunan efisiensi *bandwidth* hingga 95% dan akumulasi latensi sebesar 70% akibat topologi *daisy chain*. Oleh karena itu, evaluasi QoS pada lingkungan pendidikan sebaiknya tidak hanya mengandalkan indeks TIPHON, tetapi juga mempertimbangkan rasio *throughput* terhadap *bandwidth* yang tersedia serta analisis akumulasi latensi per *hop*. Temuan ini juga memperkuat teori *bufferbloat* pada *switch unmanaged* dalam konteks jaringan sekolah menengah, yang sebelumnya lebih banyak dikaji di lingkungan industri.

### C. Dampak Praktis terhadap Pengguna (Ujian Berbasis Komputer)

Penurunan *throughput* hingga 2,33 Mbps di Lab C pojok serta peningkatan *delay* hingga 46,5 ms memiliki dampak nyata pada kegiatan belajar mengajar, khususnya ujian berbasis komputer (CBT). Berdasarkan standar rekomendasi Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan untuk CBT, diperlukan *throughput* minimal 5 Mbps per ruang ujian dan *delay* <100 ms. Dengan kondisi eksisting, Lab C tidak memenuhi ambang batas *throughput* minimum untuk pelaksanaan CBT yang lancar. Selain itu, adanya *packet loss* 2,1% dan *jitter* 21,5 ms dapat menyebabkan *timeout* koneksi, keterlambatan pengiriman jawaban, serta gangguan sinkronisasi antar komputer client, yang berpotensi mengganggu kelancaran ujian dan mengurangi kepercayaan siswa terhadap sistem.

### D. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, analisis hanya difokuskan pada frekuensi 5 GHz tanpa perbandingan dengan 2,4 GHz, sehingga belum dapat diketahui apakah perpindahan ke frekuensi 2,4 GHz dapat memperbaiki cakupan sinyal di area pojok. Kedua, tidak dilakukan pemetaan *heatmap* secara visual maupun analisis interferensi kanal (*channel overlap*) yang dapat mempengaruhi kualitas koneksi nirkabel. Ketiga, data untuk Lab B tidak tersedia, sehingga perbandingan hanya antara Lab A (awal) dan Lab C (ujung) tanpa mengetahui degradasi bertahap. Keempat, kondisi beban *idle* tidak terdokumentasi dengan baik, sehingga analisis hanya berfokus pada kondisi *loaded*. Kelima, pengukuran *jitter* dilakukan secara manual, bukan dengan fitur otomatis Wireshark, meskipun konsistensi prosedur telah dijaga.

### E. Rekomendasi Perbaikan dan Penelitian Selanjutnya

Untuk mengatasi permasalahan yang ditemukan, direkomendasikan:

1. Migrasi ke topologi bintang (*star*) dengan menghubungkan setiap laboratorium langsung ke *switch* utama untuk menghilangkan akumulasi *hop*.
2. Optimalisasi penempatan *access point*, khususnya di Lab A, dengan memindahkan AP ke posisi lebih sentral atau menambah AP kedua untuk menjangkau area pojok.

3. Penggantian *switch unmanaged* dengan *switch manageable* yang mendukung QoS dan mekanisme *buffer management* untuk mengurangi *bufferbloat*.
4. Pertimbangan peningkatan *bandwidth* atau optimasi konfigurasi router untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan *bandwidth* dari 4,2% menjadi lebih tinggi.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk: (1) melakukan pemetaan *heatmap* dan analisis *channel overlap* pada kedua pita frekuensi (2,4 GHz dan 5 GHz) guna mengoptimalkan cakupan sinyal; (2) mengukur performa jaringan pada kondisi *idle* sebagai pembanding; (3) melakukan uji statistik (misal ANOVA) untuk mengevaluasi signifikansi perbedaan antar laboratorium; (4) mengkaji dampak langsung terhadap pengalaman pengguna melalui survei atau pengukuran Quality of Experience (QoE).

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak manajemen SMA Negeri 5 Tasikmalaya atas izin penelitian dan dukungan data teknis selama proses pengamatan. Terima kasih juga disampaikan kepada Bapak Helmy Dzulfikar selaku dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan masukan berharga yang telah diberikan selama proses penelitian hingga penyelesaian artikel ilmiah ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. A. Rosid, Martanto, and I. Ali, "Analisis Internet Network Performance Menggunakan Parameter Quality of Service," *Jurnal JEKIN*, vol. 2, no. 2, pp. 67–74, 2022.
- [2] A. Bannour, V. Moeyaert, and P. Megret, "Latency Characterization and Performance Evaluation of Synchronized Daisy-Chain EtherCAT Networks Using Standard Cable Pairs and Open-Source Master Solutions," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 21, no. 3, pp. 1–15, 2024.
- [3] A. Abd Ghafar, M. Kassim, N. Ya'acob, R. Mohamad, and R. A. Rahman, "QoS of Wi-Fi performance based on signal strength and channel for indoor campus network," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics (BEEI)*, vol. 9, no. 5, pp. 2097–2108, Oct. 2020.
- [4] R. M. P. U. Pingge, I. N. Bernadus, and G. F. Adnyana, "Analisis Performansi Jaringan Internet SMK Wira Harapan Menggunakan Quality of Service (QoS)," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 9, no. 5, pp. 8149–8156, 2025.
- [5] R. F. Bari, A. Solehudin, and N. Heryana, "Analisis Quality of Service (QoS) Jaringan Internet Berbasis Wireless Local Area Network pada Layanan Indihome," *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, vol. 8, no. 10, pp. 320–335, 2022.
- [6] M. A. Rizkiawan, E. Kurniawan, and H. Ramza, "Analisis Quality of Service Jaringan Nirkabel Menggunakan Wireshark dengan Metode Action Research," *Jurnal Teknik Informatika*, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, 2024.
- [7] H. R. Oktaseli and A. A. Slameto, "Evaluation of Wireless LAN Quality of Service (QoS) in Primary Education Using TIPHON Standards," *Journal of Applied Informatics and Computing (JAIC)*, vol. 9, no. 2, pp. 393–403, 2025.
- [8] B. S. Nugroho and Y. Sutanto, "Evaluasi Kualitas Jaringan Komputer dengan Metode Quality of Service pada Laboratorium Universitas AMIKOM Yogyakarta," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 8, no. 5, pp. 10542–10550, Oct. 2024.
- [9] A. A. S. Utomo, Supandi, and A. R. Rozzaqi, "Analisis Kinerja Jaringan Wireless Berdasarkan Parameter QoS (Throughput, Delay, Packet Loss) terhadap Variasi Trafik Jam Operasional pada Pengguna di Lingkungan Sekolah di SMP Negeri 1 Ngarangan," *SIBATIK Journal*, vol. 4, no. 9, pp. 2961–2969, 2025.
- [10] Darso, M. R. Mubarak, and M. D. Ramadhan, "Analisa Kinerja Jaringan Nirkabel Universitas AMIKOM Purwokerto Berdasarkan Konsep Quality of Service (QoS)," *Jurnal Ilmiah Teknik dan Ilmu Komputer*, vol. 3, no. 4, pp. 235–241, Nov. 2024.
- [11] D. R. Fitroni, F. Wahyudi, Z. N. Rahmawati, A. H. Widaningrum, and N. Ratnasari, "QoS untuk Meningkatkan Kualitas Jaringan SMK PGRI Kromengan," *JUSIFOR (Jurnal Sistem Informasi dan Informatika)*, vol. 3, no. 2, pp. 98–106, Des. 2024.
- [12] T. I. Safitri, K. J. P. Rihadian, N. D. Fitria, I. A. Zulfa, I. D. Y. Izzati, I. G. L. P. E. Prisma, and M. W. Habibi, "Analisis QoS Menggunakan Standar TIPHON pada Jaringan Wi-Fi SMK Dharma Bahari Surabaya," *Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)*, vol. 4, no. 4, pp. 2433–2443, 2025.
- [13] L. Zhang and S. Zeadally, "Enabling End-to-End QoS over Hybrid Wired-Wireless Networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 38, pp. 167–185, 2006.