

Evaluasi Kinerja *Wireless Backhaul Point-to-point* TP-Link CPE220

Performance Evaluation of a TP-Link CPE220 Point-to-Point Wireless Backhaul

¹Hashfi Adha Fadhillah, ²Ichwan Nul Ichsan*

^{1,2}Sistem Telekomunikasi, Kampus Daerah Purwakarta, Universitas Pendidikan Indonesia

^{1,2}Jl. Veteran No. 8, Kabupaten Purwakarta, Jawa Barat, Indonesia

e-mail: hash6677@upi.edu, ichwannul.ichsan90@upi.edu

(received: 4 April 2026, revised: 12 June 2026, accepted: 13 June 2026)

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan dan mengevaluasi kinerja jaringan *wireless backhaul point-to-point* antar gedung menggunakan TP-Link CPE220 berbasis standar IEEE 802.11b/g/n pada lingkungan dengan tingkat interferensi tinggi. Implementasi dilakukan pada dua gedung yang berjarak sekitar 100 meter dengan kondisi *line-of-sight* (LOS), di mana koneksi internet dari gedung kantor didistribusikan ke gedung workshop melalui *wireless backhaul* dan diteruskan menggunakan *router* serta *access point*. Evaluasi dilakukan melalui empat skenario pengujian, yaitu *wireless backhaul*, *router workshop*, *access point* tanpa beban, dan *access point multi-user*. Pengukuran dilakukan sebanyak 15 kali untuk setiap rentang waktu pagi, siang dan sore menggunakan parameter *throughput*, *delay*, *jitter*, dan *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). Hasil pengujian menunjukkan bahwa *throughput download* rata-rata menurun dari 95,27 Mbps pada sisi sumber menjadi 57,13 Mbps pada *wireless backhaul* dan 55,56 Mbps pada *access point* tanpa beban. Pada kondisi *multi-user* dengan 10 perangkat yang melakukan *streaming video* secara simultan, *throughput download* turun menjadi 11,49 Mbps, sedangkan *delay* dan *jitter* meningkat menjadi 367,29 ms dan 66,69 ms. Analisis menunjukkan bahwa degradasi performa terutama disebabkan oleh penurunan kualitas sinyal pada *link backhaul*, interferensi pada pita frekuensi 2,4 GHz, serta peningkatan kontensi kanal pada kondisi *multi-user*. Meskipun demikian, TP-Link CPE220 masih mampu menyediakan konektivitas antar gedung secara stabil untuk kebutuhan jaringan skala kecil hingga menengah dengan *throughput* lebih dari 55 Mbps pada kondisi normal.

Kata kunci: *inter-building connectivity, quality of service (QoS), wireless backhaul, IEEE 802.11, wireless network performance*

Abstract

This study aims to implement and evaluate the performance of a point-to-point wireless backhaul network between two buildings using the TP-Link CPE220 based on the IEEE 802.11b/g/n standard in a high-interference environment. The implementation was carried out between two buildings approximately 100 meters apart under line-of-sight (LOS) conditions, where the Internet connection from the office building was distributed to the workshop building through the wireless backhaul and subsequently forwarded via a router and an access point. The network performance was evaluated under four testing scenarios: the wireless backhaul link, the workshop router, the access point under no-load conditions, and the access point under a multi-user environment. Measurements were conducted 15 times during the morning, afternoon, and evening using throughput, delay, jitter, and Received Signal Strength Indicator (RSSI) as the evaluation parameters. The results show that the average download throughput decreased from 95.27 Mbps at the source to 57.13 Mbps across the wireless backhaul and 55.56 Mbps at the unloaded access point. Under the multi-user scenario, where 10 devices simultaneously streamed video content, the average download throughput declined to 11.49 Mbps, while delay and jitter increased to 367.29 ms and 66.69 ms, respectively. The analysis indicates that the performance degradation was primarily caused by reduced signal quality over the backhaul link, interference within the 2.4 GHz frequency band, and increased channel contention under multi-user conditions. Nevertheless, the TP-Link CPE220 was able to provide stable inter-

<http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>

building connectivity for small- to medium-scale network deployments, sustaining throughput exceeding 55 Mbps under normal operating conditions.

Keywords: *inter-building connectivity, quality of service (QoS), wireless backhaul, IEEE 802.11, wireless network performance*

1 Pendahuluan

Kebutuhan akan konektivitas jaringan internet antar gedung yang andal terus meningkat seiring dengan perkembangan layanan digital dan bertambahnya jumlah pengguna. Namun, pembangunan jaringan berbasis kabel seringkali menghadapi kendala biaya, kompleksitas instalasi, serta keterbatasan infrastruktur, sehingga diperlukan solusi alternatif yang lebih fleksibel. Salah satu solusi yang banyak digunakan adalah *wireless backhaul*, yang memungkinkan distribusi jaringan antar lokasi tanpa ketergantungan pada media kabel [1], [2].

Wireless backhaul memiliki peran penting dalam arsitektur jaringan modern, khususnya pada sistem 5G dan *beyond*, sebagai penghubung antara jaringan akses dan jaringan inti [1], [3]. Selain itu, integrasi antara jaringan akses dan *backhaul* melalui konsep *Integrated Access and Backhaul (IAB)* menunjukkan bahwa efisiensi jaringan dapat ditingkatkan melalui pengelolaan sumber daya yang lebih optimal [4], [5].

Performa *wireless backhaul* dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kualitas sinyal, interferensi, serta kondisi trafik jaringan. Parameter kualitas layanan seperti *throughput*, *delay*, dan *jitter* menjadi indikator utama dalam mengevaluasi performa jaringan, terutama pada lingkungan dengan beban trafik yang tinggi [6], [7]. Meskipun berbagai penelitian telah membahas *wireless backhaul* dari sisi arsitektur dan optimasi, implementasi nyata menggunakan perangkat komersial berbasis IEEE 802.11 pada skenario antar gedung dengan kondisi pengguna tertentu masih terbatas.

Pemilihan standar IEEE 802.11 sebagai basis implementasi didasarkan pada beberapa pertimbangan. Pertama, IEEE 802.11 beroperasi pada pita frekuensi ISM 2,4 GHz yang tersedia secara global tanpa lisensi khusus, sehingga implementasinya tidak memerlukan biaya perizinan spektrum tambahan dan dapat dilakukan oleh siapa pun dengan memenuhi batasan daya transmisi yang berlaku [8]. Hal ini menjadikannya jauh lebih terjangkau dibandingkan teknologi *licensed backhaul* seperti microwave radio atau solusi berbasis 5G NR yang membutuhkan investasi infrastruktur tinggi [1]. Kedua, perangkat berbasis IEEE 802.11 tersedia secara masif di pasaran dengan ekosistem yang matang, menjadikannya solusi yang relevan secara praktis terutama di lingkungan perumahan dan kawasan dengan kepadatan perangkat 2,4 GHz tinggi kondisi yang justru menjadi skenario pengujian dalam penelitian ini. Kondisi lingkungan semacam ini menghadirkan tantangan interferensi nyata yang belum banyak dikaji secara empiris [1], [8].

Selain itu, TP-Link CPE220 dipilih secara spesifik karena merupakan perangkat *outdoor* CPE berbasis IEEE 802.11b/g/n yang banyak digunakan secara nyata di masyarakat, dilengkapi antena terarah 12 dBi untuk koneksi *point-to-point* jarak menengah, dan merepresentasikan kelas solusi *wireless backhaul* berbiaya rendah yang relevan secara praktis, namun masih sangat minim dikaji performanya pada lingkungan dengan kepadatan interferensi tinggi seperti kawasan perumahan dan jalan raya [9].

Meskipun *wireless backhaul* berbasis IEEE 802.11 telah banyak digunakan sebagai solusi konektivitas antar gedung, belum terdapat evaluasi empiris yang komprehensif terhadap performa perangkat komersial kelas rendah seperti TP-Link CPE220 pada kondisi lingkungan nyata dengan interferensi tinggi, khususnya di kawasan perumahan dan tepi jalan raya yang memiliki kepadatan perangkat 2,4 GHz tinggi. Berbagai penelitian yang ada lebih banyak membahas *wireless backhaul* dari sisi arsitektur teoritis dan optimasi algoritmik, sementara kajian berbasis implementasi nyata yang mencakup pengukuran *throughput*, *delay*, *jitter*, dan kekuatan sinyal secara bersamaan pada skenario beban trafik pengguna tertentu masih sangat terbatas [1].

Dengan demikian, penelitian ini merumuskan masalah sebagai berikut: Bagaimana performa *wireless backhaul* antar gedung yang diimplementasikan menggunakan TP-Link CPE220 berbasis IEEE 802.11 dalam kondisi lingkungan dengan interferensi tinggi, diukur berdasarkan parameter *throughput*, *delay*, *jitter*, dan kekuatan sinyal pada jaringan *backhaul* maupun jaringan akses pengguna?

Hasil evaluasi pada skenario tersebut diharapkan dapat memberikan referensi bagi perancangan dan pengembangan jaringan *wireless backhaul* berbasis IEEE 802.11, khususnya pada lingkungan yang menghadapi keterbatasan infrastruktur kabel dan tingkat interferensi yang relatif tinggi. Selain itu, data empiris yang diperoleh dapat menjadi dasar pertimbangan dalam pemilihan perangkat maupun strategi implementasi jaringan *point-to-point* yang efisien dan ekonomis.

2 Tinjauan Literatur

Wireless backhaul merupakan komponen penting dalam sistem jaringan komunikasi modern yang berfungsi sebagai penghubung antara jaringan akses dan jaringan inti. Perannya menjadi semakin krusial dalam mendukung layanan jaringan berkapasitas tinggi, khususnya pada arsitektur jaringan 5G dan *beyond*. *Wireless backhaul* tidak hanya berfungsi sebagai media transport data, tetapi juga berperan dalam menjaga kualitas layanan jaringan secara *end-to-end* [1], [3]

Dalam perkembangan jaringan modern, konsep *Integrated Access and Backhaul (IAB)* menjadi salah satu pendekatan utama dalam meningkatkan efisiensi jaringan. Integrasi antara jaringan akses dan *backhaul* memungkinkan optimalisasi penggunaan spektrum dan peningkatan performa jaringan secara keseluruhan, meskipun menghadapi berbagai tantangan seperti interferensi dan pengelolaan sumber daya [4], [5]

Dari sisi performa, kualitas *wireless backhaul* sangat dipengaruhi oleh parameter kualitas layanan seperti *throughput*, *delay*, dan *jitter*. Penelitian menunjukkan bahwa kondisi interferensi yang tinggi dapat menyebabkan penurunan performa jaringan secara signifikan, terutama pada jaringan *wireless* yang sensitif terhadap gangguan lingkungan [6] Selain itu, pendekatan optimasi seperti penggunaan *beamforming* dan alokasi sumber daya secara paralel terbukti mampu meningkatkan efisiensi transmisi dan mengurangi *delay* pada jaringan *backhaul* [7], [10]

Pada lapisan fisik, teknik *forwarding* pada jaringan *multi-hop* juga memberikan kontribusi terhadap peningkatan performa jaringan dengan mengurangi latensi dan meningkatkan efisiensi transmisi data [11] Selain itu, hasil pengujian berbasis data eksperimental menunjukkan bahwa performa *wireless backhaul* sangat bergantung pada kondisi implementasi nyata, seperti jarak, kualitas sinyal, dan konfigurasi jaringan [12], [13]

Dari perspektif implementasi, *wireless backhaul* banyak digunakan sebagai solusi jaringan pada lingkungan dengan keterbatasan infrastruktur, seperti wilayah rural atau sistem jaringan pendidikan berbasis intranet. Studi menunjukkan bahwa penggunaan *wireless backhaul* mampu meningkatkan aksesibilitas jaringan dengan biaya yang lebih efisien dibandingkan dengan solusi berbasis kabel [9], [14]

Secara keseluruhan, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa *wireless backhaul* memiliki potensi besar dalam mendukung konektivitas jaringan modern [1], [2]. Namun, sebagian besar kajian masih berfokus pada aspek teoritis, arsitektur jaringan 5G, atau teknologi generasi terbaru dengan perangkat berbiaya tinggi dan berlisensi [1]. Sementara itu, implementasi nyata menggunakan perangkat komersial berbasis IEEE 802.11 yang dipilih karena beroperasi pada spektrum tidak berlisensi yang tersedia secara global dan mendukung penerapan tanpa biaya perizinan spektrum tambahan [8] pada skenario antar gedung di lingkungan dengan kepadatan interferensi tinggi seperti kawasan perumahan dan jalan raya, masih sangat minim dikaji. Studi yang ada mengenai perangkat sejenis seperti TP-Link CPE220 baru mencakup evaluasi dalam konteks hotspot dan jaringan *wireless outdoor* umum, belum pada kondisi *multi-user* dan lingkungan terbuka padat yang menjadi fokus penelitian ini. Hal ini menjadi celah penelitian yang relevan secara praktis bagi pengguna dan institusi berskala kecil-menengah yang membutuhkan solusi *wireless backhaul* hemat biaya pada kondisi nyata.

3 Metode Penelitian

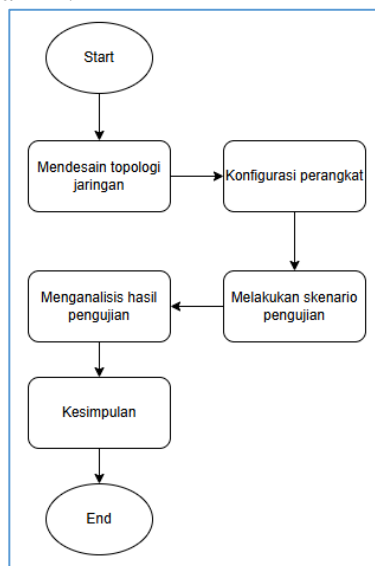
Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan kuantitatif, di mana implementasi jaringan *wireless backhaul* antar gedung dilakukan secara langsung pada lingkungan nyata, kemudian dievaluasi berdasarkan hasil pengukuran parameter kualitas layanan jaringan. Pendekatan ini umum digunakan dalam studi performa jaringan nirkabel karena mampu menggambarkan kondisi operasional sebenarnya dan menghasilkan data yang objektif [12], [13].

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk dua lokasi, lokasi pertama dilakukan pada gedung kantor dari PT. TRIAS yang berlokasi di kecamatan Cileungsi, kabupaten Bogor. Untuk gedung yang kedua merupakan sebuah *workshop* yang dimiliki oleh PT. TRIAS yang berlokasi sekitar 100 Meter dari gedung kantor. Gedung kantor ini yang nantinya akan dijadikan sumber internet untuk gedung *workshop*. Di gedung *workshop* ini rata-rata diisi oleh 4 orang dengan jumlah paling banyak yaitu 10 orang.

3.2 Tahapan Penelitian

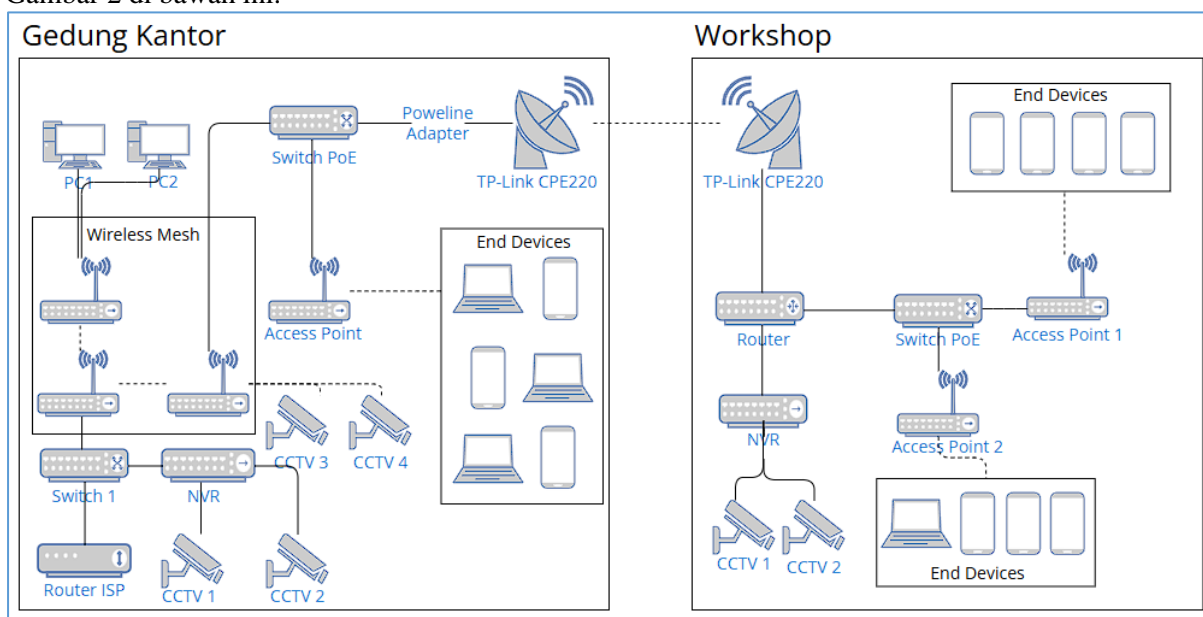
Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan. Tahapan-tahapan tersebut dijelaskan pada diagram alir pada Gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

3.2.1 Desain Topologi Jaringan

Mendesain topologi jaringan dari lokasi penelitian merupakan tahapan awal yang dilakukan pada penelitian ini. Bentuk topologi jaringan yang dimiliki dari kedua gedung tersebut dapat dilihat pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2 Topologi jaringan pada kedua gedung

Gambar 2 di atas merupakan desain dari topologi jaringan yang ada di kedua gedung. *Router ISP* yang ada pada gedung kantor yang nantinya akan menjadi sumber internet untuk gedung *workshop*. Dari *router ISP* dihubungkan ke *switch 1* kemudian diteruskan ke *wireless mesh* yang selanjutnya

terhubung dengan *switch PoE* yang terhubung ke *powerline adapter* yang terhubung langsung ke TP-Link CPE220 yang dijadikan pengirim. Pada gedung *workshop* data yang dikirim dari gedung kantor ditangkap dengan TP-Link CPE220 yang kemudian diteruskan ke *router* dan dijadikan sumber internet utama untuk gedung tersebut. Dari *router* tersebut terkoneksi dengan CCTV dan juga *access point* yang sudah disiapkan sebelumnya sebagai penyebar koneksi Wi-Fi yang ada di gedung *workshop*.

3.2.2 Konfigurasi perangkat

Konfigurasi perangkat dilakukan pada perangkat TP-Link CPE220 diatur pada mode *bridge* karena penelitian ini *point-to-point* fungsinya agar kedua jaringan yang terpisah dapat seperti terhubung secara fisik. Untuk *router* yang ada di *workshop* dikonfigurasi untuk pengalamatan IP, *routing* jaringan, distribusi *bandwidth*, dan juga koneksi ke *access point* yang ada pada gedung tersebut. Terkait detail konfigurasi perangkat TP-Link dapat dilihat pada tabel 1 berikut.

Tabel 1 Konfigurasi perangkat wireless backhaul

Parameter	Tx	Rx
Perangkat	TP-Link CPE220	TP-Link CPE220
Standar	IEEE 802.11b/g/n	IEEE 802.11b/g/n
Frekuensi Operasi	2.4 GHz	2.4 GHz
Channel Width	20/40 MHz	20/40 MHz
TX Power	8 dBm	-
Antenna Gain	12 dBi	12 dBi
Mode Operasi	Bridge	Bridge
Firmware Version	2.2.3	2.2.3
Jarak Link	150 m	150 m

3.2.3 Skenario pengujian

Dilakukan empat skenario pengujian pada penelitian ini untuk mengevaluasi performa jaringan secara bertahap. Empat skenario itu akan dijabarkan pada tabel 2 berikut.

Tabel 2 Skenario pengujian perangkat

Skenario pengujian	Titik Pengujian	Media Koneksi	Perangkat yang Diuji	Parameter Pengujian
Pengujian <i>wireless backhaul</i>	<i>Router Outdoor</i> (Rx) - <i>workshop</i>	<i>Wireless</i>	TP-Link CPE220	<i>Throughput, Delay, Jitter</i>
Pengujian melalui <i>router</i>	<i>Router workshop</i>	<i>Wired</i>	<i>Router</i>	<i>Throughput, Delay, Jitter</i>
Pengujian terhubung dengan <i>access point</i>	<i>Access point workshop</i>	<i>Wireless</i>	<i>Access point</i>	<i>Throughput, Delay, Jitter</i>
Pengujian <i>multi user</i>	<i>Access point workshop</i>	<i>Wireless</i>	<i>Access point</i>	<i>Throughput, Delay, Jitter</i>

Pada skenario *multi-user* digunakan 10 perangkat *smartphone* berbasis Android dan IOS yang terhubung ke *access point* secara bersamaan. Seluruh perangkat berada pada jarak 3–8 meter dari *access point* tanpa penghalang utama. Setiap perangkat melakukan streaming video YouTube dengan resolusi 720p selama 10 menit untuk menghasilkan beban trafik yang relatif konstan. Pengukuran dilakukan pada salah satu perangkat klien menggunakan aplikasi *Speedtest by Ookla* saat seluruh perangkat aktif melakukan streaming.

3.2.4 Teknik pengumpulan data

Data dikumpulkan melalui pengukuran dengan menggunakan aplikasi *speedtest by Ookla* pada setiap skenario pengujian. Pengujian dilakukan sebanyak 15 kali per skenario dan dibagi pada interval

<http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>

waktu yang berbeda, yaitu pada pagi hari, siang hari, dan sore hari untuk mendapatkan hasil yang konsisten.

Pengujian dilakukan dalam kondisi jaringan normal dan saat terdapat beban trafik. Data yang diperoleh dari setiap percobaan kemudian diolah dengan menghitung nilai rata-rata untuk masing-masing parameter pengujian, yaitu *throughput*, *delay*, *jitter*, *RSSI*.

3.2.5 Kondisi Pengujian

Pengujian dilakukan pada kondisi cuaca cerah tanpa hujan untuk meminimalkan pengaruh redaman atmosfer terhadap sinyal *wireless*. Jalur komunikasi antara kedua perangkat TP-Link CPE220 berada pada kondisi *line-of-sight* (LOS) dengan beberapa bangunan, pepohonan dan kabel listrik yang melintang di sekitar area pengujian. Lingkungan pengujian berada pada kawasan perumahan dan jalan raya yang memiliki potensi interferensi dari perangkat Wi-Fi lain yang beroperasi pada pita frekuensi 2,4 GHz. Pengukuran dilakukan pada pagi hari (07:30 – 09:30 WIB), siang hari (11:00 – 13:00 WIB), dan sore hari (17:00 – 19:30WIB).

3.2.6 Teknik analisis data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan metode deskriptif kuantitatif, dengan membandingkan hasil pengukuran pada setiap skenario. Analisis dilakukan untuk menilai performa koneksi jaringan *wireless backhaul*, mengidentifikasi pengaruh *router* terhadap jaringan, mengevaluasi kualitas jaringan WiFi di *workshop*, menganalisis dampak jumlah pengguna terhadap performa jaringan. Pendekatan ini digunakan untuk memperoleh gambaran performa jaringan secara *end-to-end* [5].

Data hasil pengukuran *throughput*, *delay*, *jitter*, dan RSSI dari setiap skenario pengujian dianalisis secara deskriptif dan inferensial. Untuk setiap parameter dihitung nilai rata-rata (mean), *standard deviation* (SD), serta *coefficient of variation* (CV) guna mengetahui tingkat variasi dan konsistensi hasil pengukuran. Selain itu, interval kepercayaan (*confidence interval*) 95% dihitung untuk memperkirakan rentang nilai parameter yang mewakili kondisi sebenarnya dari sistem yang diuji. Perbandingan performa antar skenario dilakukan berdasarkan nilai rata-rata dan parameter statistik yang diperoleh untuk mengevaluasi pengaruh *wireless backhaul*, *router*, *access point*, dan kondisi *multi-user* terhadap kualitas layanan jaringan.

4 Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini untuk menampilkan hasil yang didapatkan dari melakukan skenario pengujian yang sudah dibuat sebelumnya. Pengujian dilakukan pada tiga waktu yang berbeda. Pengujian 1 dilakukan pada pagi hari sekitar pukul 07:30 – 09:30, pengujian 2 dilakukan pada siang hari sekitar pukul 11:00 – 13:00, pengujian 3 dilakukan pada sore hari sekitar pukul 17:00 – 19:30. Untuk melakukan pengujian ini dan untuk skenario pengujian menggunakan sebuah aplikasi *speedtest by Ookla*. Dikarenakan aplikasi tersebut sudah cukup detail dan parameter yang ditampilkan juga cukup sesuai yang dibutuhkan dari penelitian ini.

4.1 Pengujian Gedung Kantor

Sebelum melakukan skenario pengujiannya, perlu terlebih dahulu menguji jaringan internet yang ada di Gedung kantor.

Tabel 3 Pengujian 1 jaringan internet gedung kantor

Parameter	Pengujian 1 (mean)	Pengujian 2 (mean)	Pengujian 3 (mean)
<i>Downlaod</i>	96.93 Mbps	92,8 Mbps	96,13 Mbps
<i>Upload</i>	67,4 Mbps	61,6 Mbps	65,6 Mbps
<i>Delay</i>	25,73 ms	28,87 ms	26,53 ms
<i>Jitter</i>	6,47 ms	7,73 ms	6,93 ms
RSSI	-41,4 dBm	-44,2 dBm	-42,3 dBm

Hasil pengujian jaringan internet di kantor dapat dilihat pada Tabel 3. Alasan mengapa *throughput* yang tinggi pada ketiga pengujian di gedung kantor. Hal tersebut dikarenakan ketika

<http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>

melakukan pengujian kondisi pada gedung kantor hanya ada sedikit orang saja sehingga *throughput* yang dihasilkan tinggi. Pada pengujian ke 2 atau pada siang hari mengalami sedikit penurunan dikarenakan ketika melakukan pengujian kondisi gedung kantor sudah ada lebih banyak orang sehingga menyebabkan ada beberapa perangkat yang sedang terhubung dengan jaringan WiFi kantor. Karena hal tersebut jaringan WiFi kantor memiliki sedikit beban trafik pada pengujian siang hari. Pengujian pada gedung kantor ini juga untuk melihat seberapa baik performa TP-Link CPE220 dalam mempertahankan kualitas internet yang didapat dari gedung kantor ini.

4.2 Pengujian *wireless backhaul*

Pengujian pada perangkat TP-Link CPE220 dengan cara menghubungkan perangkat *handphone* dengan TP-Link CPE220 secara *wireless*. Bertujuan untuk mengetahui performa murni dari *wireless backhaul* sebelum diteruskan ke perangkat lain.

Tabel 4 Pengujian *wireless backhaul*

Parameter	Pengujian 1 (mean)	Pengujian 2 (mean)	Pengujian 3 (mean)
<i>Downlaod</i>	62,4 Mbps	52,4 Mbps	56,6 Mbps
<i>Upload</i>	39,27 Mbps	33,2 Mbps	35,33 Mbps
<i>Delay</i>	181,67 ms	238,2 ms	229,13 ms
<i>Jitter</i>	42,06 ms	52,73 ms	51,67 ms
RSSI	-80,3 dBm	-84,87 dBm	-82,93 dBm

Jika melihat pada Tabel 4 ini kualitas jaringan mengalami penurunan yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan hasil pengujian di gedung kantor sebelumnya. Dari segi *throughput* disini menurun sekitar 35% pada pagi hari, 57 % di siang hari, dan 40% di sore hari. Pada siang hari dan sore mendapatkan hasil yang lebih rendah dibanding pagi hari, dikarenakan pada siang dan sore hari disekitar area pengujian terdapat lebih banyak orang yang sedang beraktivitas di luar rumah dan terkoneksi dengan WiFi rumah nya masing masing. Sehingga terdapat interferensi terhadap pita 2,4 GHz. Dikarenakan hal tersebut nilai RSSI justru turun drastis hingga ke angka -84 dBm pada siang hari, yang pada pengujian sebelumnya hanya berkisar -44 – 41 dBm. Karena hal tersebut juga nilai *delay* dan *jitter* meningkat hingga 181 – 238 ms dan 42 – 52 ms.

4.3 Pengujian *router workshop*

Tujuan pengujian ini untuk mengetahui apakah jaringan internet yang berasal dari *wireless backhaul* itu berhasil terdeteksi oleh *router* atau tidak. Jika terdeteksi apakah ada penurunan performa atau tidak.

Tabel 5 Pengujian *router workshop*

Parameter	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
<i>Downlaod</i>	61 Mbps	51,73 Mbps	56 Mbps
<i>Upload</i>	36,87 Mbps	32,27 Mbps	34,6 Mbps
<i>Delay</i>	22,3 ms	24,6 ms	23,6 ms
<i>Jitter</i>	1,73 ms	2,73 ms	2,3 ms
RSSI	-40,13 dBm	-40,4 dBm	-40 dBm

Jika dilihat dari hasil yang ditampilkan pada Tabel 5 di atas ternyata untuk *throughput* mengalami cukup sedikit penurunannya menjadi sekitar 51,73 – 61 Mbps. Untuk nilai *delay*, *jitter*, dan juga RSSI bisa lebih kecil karena pengujian ini dilakukan dengan cara menghubungkan perangkat penguji langsung dengan kabel. Berarti *router* tidak menjadi *bottleneck* utama dalam sistem. Dengan menggunakan media kabel sebagai transmisi terbukti dapat menjaga kestabilan transmisi dengan baik.

4.4 Pengujian *access point* (tanpa beban)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui performa murni yang disalurkan langsung dari *router* sebelum dilakukan pengujian *multi-user*.

Tabel 6 Pengujian *access point* (tanpa beban)

Parameter	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
<i>Downlaod</i>	60,67 Mbps	50,47 Mbps	55,53 Mbps
<i>Upload</i>	36,3 Mbps	32,67 Mbps	34,27 Mbps
<i>Delay</i>	25 ms	26,87 ms	26,4 ms
<i>Jitter</i>	2,7 ms	3,93 ms	3,6 ms
RSSI	-45,07 dBm	-45 dBm	-45,2 dBm

Pada pengujian skenario yang ketiga hasilnya dapat dilihat pada Tabel 6. Pada pengujian ini, *access point* masih mampu mempertahankan kualitas layanan yang baik, dapat dilihat dari nilai *throughput* yang tidak mengalami penurunan yang signifikan dibanding pengujian *router workshop* sebelumnya. Pada *delay* juga mengalami sedikit penurunan ke 25 – 26,87 ms. Hal tersebut dikarenakan pengujian ini dilakukan secara *wireless*.

4.5 Pengujian *access point multi-user*

Pada pengujian ini 10 perangkat *handphone* berbasis Android dan IOS terhubung dengan *access point*. Kemudian 10 perangkat ini melakukan *streaming* video pada platform YouTube dengan kualitas 720p selama kurang lebih 10 menit. Hal tersebut dilakukan untuk meningkatkan beban trafik pada jaringan ini. Melakukan pengujian ini untuk mengetahui performa jika jaringan internet ini dibebankan dengan trafik yang lumayan besar.

Tabel 7 Pengujian *access point multi-user*

Parameter	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
<i>Downlaod</i>	14,07 Mbps	9 Mbps	11,4 Mbps
<i>Upload</i>	7,7 Mbps	6,2 Mbps	6,73 Mbps
<i>Delay</i>	318,07 ms	433,2 ms	350,6 ms
<i>Jitter</i>	61,6 ms	73,47 ms	65 ms
RSSI	-74,07 dBm	-75 dBm	-74,93 dBm

Tabel 7 menunjukkan penurunan performa paling signifikan dibandingkan seluruh skenario pengujian. *Throughput download* dan *upload* turun menjadi 9–14,07 Mbps dan 6,2-7,7 Mbps, sedangkan *delay* dan *jitter* meningkat hingga mencapai 318,07–433,2 ms dan 61,6–73,47 ms. RSSI mengalami penurunan dibanding pengujian sebelumnya, yaitu sekitar -74 – 75 dBm. Penurunan performa yang signifikan ini disebabkan peningkatan jumlah pengguna aktif yang melakukan *streaming* video secara bersamaan menyebabkan kapasitas jaringan harus dibagi ke seluruh perangkat sehingga terjadi peningkatan antrean paket dan penurunan *bandwidth* yang diterima masing-masing pengguna.

4.6 Analisis Statistik

Analisis statistik deskriptif dilakukan menggunakan *standard deviation* (SD), *coefficient of variation* (CV), dan *confidence interval* (CI) 95% untuk mengevaluasi tingkat konsistensi hasil pengukuran pada setiap skenario pengujian.

Tabel 8 Analisis statistik

Skenario	Parameter	Mean	SD	CV (%)	CI 95%
----------	-----------	------	----	--------	--------

Gedung Kantor	Download (Mbps)	95,27	2,24	2,35	94,61 – 95,92
	Upload (Mbps)	64,87	3,08	4,75	63,97 – 65,77
	Delay (ms)	27,04	2,30	8,49	26,37 – 27,72
	Jitter (ms)	7,04	1,07	15,12	6,73 – 7,36
	RSSI (dBm)	-42,64	1,35	3,17	-43,04 – -42,25
Wireless Backhaul	Download (Mbps)	57,13	4,40	7,70	55,85 – 58,42
	Upload (Mbps)	35,93	2,88	8,01	35,09 – 36,77
	Delay (ms)	216,27	42,76	19,77	203,77 – 228,76
	Jitter (ms)	48,67	6,36	13,06	46,81 – 50,52
	RSSI (dBm)	-82,71	2,16	2,61	-83,34 – -82,08
Router Workshop	Download (Mbps)	56,24	4,06	7,22	55,06 – 57,43
	Upload (Mbps)	34,58	2,25	6,51	33,92 – 35,24
	Delay (ms)	23,51	1,63	6,94	23,03 – 23,99
	Jitter (ms)	2,27	0,84	36,91	2,02 – 2,51
	RSSI (dBm)	-40,18	0,65	1,62	-40,37 – -39,99
Access point Tanpa Beban	Download (Mbps)	55,56	4,45	8,02	54,25 – 56,86
	Upload (Mbps)	34,42	2,02	5,86	33,83 – 35,01
	Delay (ms)	26,09	1,40	5,35	25,68 – 26,50
	Jitter (ms)	3,40	1,07	31,60	3,09 – 3,71
	RSSI (dBm)	-45,09	0,76	1,69	-45,31 – -44,87
Access point Multi-user	Download (Mbps)	11,49	2,60	22,62	10,73 – 12,25
	Upload (Mbps)	6,87	1,42	20,74	6,45 – 7,28
	Delay (ms)	367,29	66,33	18,06	347,91 – 386,67

Jitter (ms)	66,69	7,18	10,76	64,59 – 68,79
RSSI (dBm)	-74,67	1,02	1,37	-74,97 – -74,37

Hasil pada Tabel 8 menunjukkan bahwa sebagian besar parameter memiliki nilai CV di bawah 10%, yang mengindikasikan variasi data relatif rendah dan hasil pengukuran yang konsisten. Nilai CV tertinggi ditemukan pada skenario *access point multi-user*, khususnya pada parameter *throughput*, yang menunjukkan adanya fluktuasi performa akibat peningkatan beban trafik. Selain itu, rentang CI 95% yang relatif sempit pada sebagian besar parameter menunjukkan bahwa nilai rata-rata yang diperoleh cukup representatif dalam menggambarkan kondisi jaringan selama pengujian.

4.7 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa performa jaringan mengalami degradasi secara bertahap dari sisi sumber internet hingga ke pengguna akhir. Pada pengujian gedung kantor diperoleh *throughput download* rata-rata sebesar 95,27 Mbps dengan nilai *coefficient of variation* (CV) hanya 2,35% dan *confidence interval* (CI) 95% sebesar 94,61–95,92 Mbps. Nilai CV yang rendah menunjukkan bahwa koneksi internet sumber memiliki tingkat kestabilan yang sangat baik selama pengujian. Selain itu, rentang CI yang sempit menunjukkan bahwa rata-rata pengukuran memiliki tingkat kepercayaan yang tinggi dan representatif terhadap kondisi jaringan sebenarnya. Meskipun demikian, hasil pengujian menunjukkan adanya sedikit penurunan performa pada siang dan sore hari dibandingkan pagi hari. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh meningkatnya aktivitas masyarakat di sekitar lokasi pengujian yang menyebabkan bertambahnya trafik jaringan dan kepadatan kanal pada pita frekuensi 2,4 GHz. Peningkatan interferensi pada jaringan nirkabel diketahui dapat menyebabkan penurunan *throughput* serta meningkatkan variasi performa jaringan akibat bertambahnya gangguan pada proses transmisi data [6].

Penurunan performa mulai terlihat secara signifikan pada segmen *wireless backhaul* menggunakan TP-Link CPE220. *Throughput download* rata-rata turun menjadi 57,13 Mbps atau sekitar 40% lebih rendah dibandingkan sumber internet, sedangkan *delay* meningkat menjadi 216,27 ms dengan nilai CV sebesar 19,77%. Nilai CV *delay* yang jauh lebih tinggi dibandingkan *throughput* menunjukkan bahwa kualitas layanan pada *link backhaul* lebih dipengaruhi oleh fluktuasi waktu transmisi daripada kapasitas kanal itu sendiri. Selain itu, nilai RSSI rata-rata sebesar -82,71 dBm menunjukkan bahwa kualitas sinyal berada pada kondisi yang relatif lemah. Berdasarkan model propagasi *Free Space Path Loss* (FSPL), sinyal pada frekuensi 2,4 GHz akan mengalami redaman yang meningkat seiring bertambahnya jarak dan kondisi lingkungan propagasi [15]. Dalam kondisi lapangan, redaman tersebut semakin meningkat akibat adanya pepohonan, bangunan, kabel listrik, serta interferensi dari jaringan Wi-Fi lain yang menggunakan kanal yang sama. Oleh karena itu, nilai RSSI aktual yang diperoleh lebih rendah dibandingkan kondisi teoritis dan berdampak langsung terhadap penurunan kualitas *link* [5], [12].

Pada kondisi RSSI yang rendah, perangkat IEEE 802.11 secara otomatis mengaktifkan mekanisme *Adaptive Rate Control* untuk mempertahankan reliabilitas komunikasi ketika kualitas kanal menurun [16]. Mekanisme ini bekerja dengan menurunkan *modulation and coding scheme* (MCS) ketika kualitas sinyal menurun atau tingkat *packet error* meningkat. Akibatnya, *throughput* efektif akan berkurang meskipun koneksi tetap dapat dipertahankan. Fenomena tersebut menjelaskan mengapa *throughput* pada *wireless backhaul* mengalami penurunan yang cukup besar meskipun koneksi tetap stabil selama pengujian. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini konsisten dengan temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa kualitas kanal radio memiliki pengaruh langsung terhadap kapasitas aktual jaringan *wireless backhaul* berbasis IEEE 802.11 [13].

Pada pengujian *router workshop*, *throughput download* rata-rata sebesar 56,24 Mbps dengan CV 7,22%, sedangkan *delay* rata-rata sebesar 23,51 ms dengan CV 6,94%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa performa jaringan relatif stabil setelah diteruskan melalui *router*. Bahkan, jika dibandingkan dengan *wireless backhaul*, *delay* mengalami penurunan yang sangat signifikan. Hasil ini mengindikasikan bahwa *router* bukan merupakan bottleneck utama dalam sistem. Penggunaan media kabel Ethernet mampu mengurangi variasi transmisi yang sebelumnya muncul pada media nirkabel sehingga kualitas layanan menjadi lebih konsisten. Temuan ini memperlihatkan bahwa degradasi

<http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>

performa yang terjadi sebelumnya lebih banyak disebabkan oleh kualitas *link wireless* daripada proses routing itu sendiri [5].

Pada pengujian *access point* tanpa beban, *throughput download* rata-rata sebesar 55,56 Mbps dengan CV 8,02%, sedangkan *delay* rata-rata sebesar 26,09 ms dengan CV hanya 5,35%. Nilai CV yang rendah menunjukkan bahwa performa jaringan pada *access point* masih relatif stabil meskipun koneksi kembali menggunakan media nirkabel. Nilai RSSI rata-rata sebesar -45,09 dBm juga menunjukkan kualitas sinyal yang sangat baik. Menariknya, *confidence interval delay* berada pada rentang yang sempit, yaitu 25,68–26,50 ms, yang menunjukkan bahwa waktu transmisi relatif konsisten pada seluruh periode pengujian. Hasil ini menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa beban, *access point* masih mampu mempertahankan kualitas layanan yang baik dan tidak menyebabkan degradasi performa yang signifikan. Penurunan *throughput* yang terjadi dibandingkan koneksi kabel lebih banyak disebabkan oleh overhead komunikasi *wireless* yang memang merupakan karakteristik dasar jaringan IEEE 802.11 [6].

Skenario yang menunjukkan degradasi performa paling signifikan adalah pengujian *access point multi-user*. *Throughput download* rata-rata turun menjadi 11,49 Mbps dengan nilai CV sebesar 22,62%, sedangkan *upload* memiliki CV sebesar 20,74%. Nilai CV yang melebihi 20% menunjukkan bahwa performa jaringan menjadi jauh lebih fluktuatif ketika sepuluh perangkat secara bersamaan melakukan streaming video 720p. Selain itu, *delay* meningkat hingga rata-rata 367,29 ms dengan CI 95% sebesar 347,91–386,67 ms. Rentang CI yang relatif lebar menunjukkan bahwa variasi performa antar pengujian menjadi lebih besar dibandingkan skenario lainnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa jaringan tidak hanya mengalami penurunan performa, tetapi juga kehilangan konsistensi kualitas layanan.

Fenomena tersebut dapat dijelaskan melalui mekanisme *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA) yang digunakan pada standar IEEE 802.11 [16]. Ketika jumlah pengguna aktif meningkat, setiap perangkat harus bersaing untuk memperoleh akses ke kanal transmisi yang sama. Akibatnya, probabilitas terjadinya kontensi kanal, *backoff delay*, dan antrean paket menjadi lebih tinggi. Kondisi tersebut menyebabkan *throughput* per pengguna menurun serta meningkatkan *delay* dan *jitter* secara signifikan [5], [6]. Temuan ini memperkuat hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa peningkatan kepadatan pengguna dan persaingan akses medium memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa jaringan akses nirkabel [5].

Jika dibandingkan berdasarkan nilai CV, skenario gedung kantor merupakan kondisi yang paling stabil, sedangkan skenario *multi-user* merupakan kondisi yang paling tidak stabil. Temuan ini menunjukkan bahwa kualitas layanan jaringan tidak hanya ditentukan oleh kekuatan sinyal atau kualitas *link wireless backhaul*, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh tingkat kepadatan trafik yang harus dilayani secara simultan. Oleh karena itu, peningkatan performa jaringan tidak cukup dilakukan melalui optimasi kualitas sinyal saja, tetapi juga perlu didukung oleh pengelolaan *bandwidth*, pemilihan kanal yang optimal, penerapan *quality of service* (QoS), serta pengaturan kapasitas jaringan akses sesuai jumlah pengguna yang dilayani. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperkuat temuan berbagai penelitian terkini bahwa performa *wireless backhaul* berbasis IEEE 802.11 sangat dipengaruhi oleh kombinasi kualitas kanal radio, interferensi lingkungan, mekanisme adaptasi laju transmisi, dan tingkat beban trafik jaringan [3], [5], [6], [12].

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil. Pertama, pengujian hanya dilakukan pada satu lokasi dan satu pasangan perangkat TP-Link CPE220 sehingga hasil penelitian belum dapat digeneralisasikan untuk seluruh kondisi lingkungan. Kedua, penelitian belum melakukan pengukuran spektrum menggunakan *spectrum analyzer* sehingga tingkat interferensi hanya diidentifikasi berdasarkan kondisi lingkungan dan perubahan parameter performa jaringan. Ketiga, pengujian dilakukan pada pita frekuensi 2,4 GHz sehingga hasil dapat berbeda apabila diterapkan pada pita frekuensi lain seperti 5 GHz atau 6 GHz. Keempat, skenario *multi-user* hanya menggunakan sepuluh perangkat dengan pola *trafik streaming video* sehingga karakteristik performa dapat berbeda untuk aplikasi lain seperti VoIP, konferensi video, atau transfer data berkapasitas besar. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu melakukan analisis spektrum secara langsung, menguji lebih banyak variasi jumlah pengguna, serta membandingkan performa pada beberapa kanal dan pita frekuensi yang berbeda untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai performa *wireless backhaul* berbasis IEEE 802.11.

5 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengevaluasi kinerja *wireless backhaul* berbasis TP-Link CPE220 pada jaringan PT. TRIAS menggunakan parameter *throughput*, *delay*, *jitter*, dan RSSI. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *throughput download* rata-rata menurun dari 95,27 Mbps pada sumber internet menjadi 57,13 Mbps pada *wireless backhaul* dan 11,49 Mbps pada skenario *access point multi-user*. Sebaliknya, *delay* rata-rata meningkat dari 27,04 ms menjadi 216,27 ms pada *wireless backhaul* dan mencapai 367,29 ms pada kondisi *multi-user*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kualitas kanal radio dan peningkatan jumlah pengguna aktif memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa jaringan.

Meskipun terjadi penurunan performa, *wireless backhaul* TP-Link CPE220 masih mampu menyediakan konektivitas yang memadai untuk area *workshop* pada jarak sekitar 100 meter. Untuk meningkatkan kualitas layanan, disarankan melakukan optimasi arah antena, pemilihan kanal yang lebih optimal, serta penerapan manajemen *bandwidth* dan *Quality of Service (QoS)* guna mengurangi dampak interferensi dan kepadatan trafik.

Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada evaluasi *wireless backhaul* dengan variasi jarak, kondisi lingkungan, jumlah pengguna, serta perbandingan teknologi yang lebih baru seperti IEEE 802.11ac dan IEEE 802.11ax untuk memperoleh gambaran performa yang lebih komprehensif.

Referensi

- [1] B. Tezergil and E. Onur, "Wireless Backhaul in 5G and Beyond: Issues, Challenges and Opportunities," Jul. 20, 2021, *arXiv*: arXiv:2103.08234. DOI: 10.48550/arXiv.2103.08234.
- [2] H. Lin, M. A. Kishk, and M. -S. Alouini, "Virtual Backhaul Connectivity for Enhanced Coverage in Fiber-Less Areas," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 31, No. 4, pp. 324–330, Aug. 2024, DOI: 10.1109/MWC.012.2300371.
- [3] I. Sawad, R. Nilavalan, and H. Al-Raweshidy, "Backhaul in 5G Systems for Developing Countries: A Literature Review," *IET Communications*, Vol. 17, No. 6, pp. 659–669, Apr. 2023, DOI: 10.1049/cmu2.12578.
- [4] Y. Sadovaya *et al.*, "Integrated Access and Backhaul in Millimeter-Wave Cellular: Benefits and Challenges," May 18, 2022, *arXiv*: arXiv:2205.09202. DOI: 10.48550/arXiv.2205.09202.
- [5] M. Khadmaoui-Bichouna, J. M. Alcaraz-Calero, and Q. Wang, "Empirical Evaluation of 5G and Wi-Fi Mesh Interworking for Integrated Access and Backhaul Networking Paradigm," *Computer Communications*, Vol. 209, pp. 429–443, Sep. 2023, DOI: 10.1016/j.comcom.2023.07.007.
- [6] V. S. Khandetskyi, V. V. Gerasimov, and N. V. Karpenko, "Performance Analysis of Wireless Computer Networks in Conditions of High Interference Intensity," *RIC*, No. 3, p. 148, Oct. 2023, DOI: 10.15588/1607-3274-2023-3-15.
- [7] L. Liu, C. Hua, J. Yu, and J. Xu, "Joint Beamforming for Delay Optimal Transmission in Cache-Enabled Wireless Backhaul Networks," *Journal of Communications and Information Networks*, Vol. 8, No. 2, pp. 141–154, Jun. 2023, DOI: 10.23919/JCIN.2023.10173730.
- [8] K. Saifullin, H. Al-Shatri, and M.-S. Alouini, "Communications Over Unlicensed sub-8 GHz Spectrum: Opportunities and Challenges," 2024, *arXiv*. DOI: 10.48550/ARXIV.2412.11002.
- [9] G. Gemmi, L. Cerda-Alabern, and L. Maccari, "A Realistic Open-Data-based Cost Model for Wireless Backhaul Networks in Rural Areas," in *2022 18th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, Thessaloniki, Greece: IEEE, Oct. 2022, pp. 55–63. DOI: 10.23919/CNSM55787.2022.9964562.
- [10] M. Yu, Y. Pi, A. Tang, and X. Wang, "Coordinated Parallel Resource Allocation for Integrated Access and Backhaul Networks," *Computer Networks*, Vol. 222, p. 109533, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109533>.
- [11] C. Huang, A. Tang, B. Zhai, and X. Wang, "Physical Layer forwarding for 5G Multi-Hop Backhaul Networks," *Computer Networks*, Vol. 207, p. 108830, Apr. 2022, DOI: 10.1016/j.comnet.2022.108830.
- [12] T. Ferreira *et al.*, "Experimental mmWave WiGig-based Backhaul Network Dataset," *Data in Brief*, Vol. 52, p. 109954, Feb. 2024, DOI: 10.1016/j.dib.2023.109954.
- [13] M. Mackay, A. Raschella, and O. Toma, "Modelling and Analysis of Performance Characteristics in a 60 Ghz 802.11ad Wireless Mesh Backhaul Network for an Urban 5G

- Deployment.*” Accessed: Jan. 25, 2026. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1999-5903/14/2/34?utm_source=chatgpt.com
- [14] J. Rarugal and N. L. Sermona, “*Development and Evaluation of Remote Learning Management System using Intranet Network for Hinterland Schools,*” *Procedia Computer Science*, Vol. 234, pp. 1633–1641, Jan. 2024, DOI: 10.1016/j.procs.2024.03.167.
- [15] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, “*Modeling Air-to-Ground Path Loss for Low Altitude Platforms in Urban Environments,*” in *2014 IEEE Global Communications Conference*, Austin, TX, USA: IEEE, Dec. 2014, pp. 2898–2904. DOI: 10.1109/GLOCOM.2014.7037248.
- [16] “*IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,*” *IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016)*, pp. 1–4379, Feb. 2021, DOI: 10.1109/IEEESTD.2021.9363693.