

REVIEW KOMPARATIF PERFORMA JARINGAN WI-FI DAN HOTSPOT SELULER BERDASARKAN PARAMETER QUALITY OF SERVICE (QOS): SEBUAH TINJAUAN LITERATUR SISTEMATIS

Hafids arkan wahid¹, dan mugisidi²

2503015035@uhamka.ac.id¹, dan.mugisidi@uhamka.ac.id²

Universitas Muhammadiyah Prof.DR. HAMKA

ABSTRAK

Konektivitas internet nirkabel berkecepatan tinggi kini menjadi pilar utama ekosistem digital modern, dengan Wi-Fi lokal dan hotspot seluler sebagai infrastruktur dominan bagi pengguna akhir. Meski sama-sama menawarkan mobilitas, keduanya mengadopsi tata kelola spektrum frekuensi dan mekanisme akses medium radio yang berbeda secara fundamental. Penelitian ini bertujuan melakukan analisis komparatif performa jaringan Wi-Fi lokal dan hotspot seluler berdasarkan parameter kuantitatif Quality of Service (QoS) melalui tinjauan literatur sistematis dari 70 jurnal ilmiah mutakhir. Metode evaluasi difokuskan pada pemetaan empat metrik utama, yaitu throughput, latency, jitter, dan packet loss di berbagai tingkat kepadatan perangkat klien. Hasil sintesis data empiris membuktikan bahwa jaringan Wi-Fi (IEEE 802.11ax) unggul dalam menyediakan kapasitas throughput tertinggi dan latensi terendah pada skenario dalam ruangan stasioner dengan kepadatan perangkat rendah. Namun, stabilitas performa Wi-Fi merosot tajam saat beban trafik mencapai puncak akibat ketergantungan pada protokol kontrol desentralisasi CSMA/CA yang rentan tabrakan data. Sebaliknya, hotspot seluler menunjukkan resiliensi alokasi data yang jauh lebih tangguh, nilai jitter yang konsisten, dan rasio packet loss sangat minim (di bawah 0,1%) di lingkungan komunal yang padat. Ketangguhan hotspot seluler ditopang oleh penggunaan pita spektrum berlisensi (licensed band) serta algoritma penjadwalan terpusat berbasis teknologi OFDMA pada sisi menara pemancar (BTS). Kajian ini menyimpulkan bahwa tidak ada arsitektur nirkabel yang mendominasi mutlak pada semua parameter uji, sehingga pemilihan konektivitas yang optimal harus menyelaraskan analisis kompromi (trade-off) antara sensitivitas trafik aplikasi, karakteristik geografis, skala mobilitas, serta efisiensi anggaran finansial operasional jangka panjang.

Kata Kunci: Jaringan Wi-Fi, Hotspot Seluler, Quality Of Service (Qos), Throughput, Komparasi Infrastruktur.

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan konektivitas internet nirkabel yang adaptif dan berkecepatan tinggi telah menjadi pilar utama dalam mendukung ekosistem digital kontemporer. Dua infrastruktur nirkabel yang paling mendominasi akses pengguna akhir saat ini adalah jaringan Wireless Fidelity (Wi-Fi) berbasis lokal dan hotspot seluler yang memanfaatkan jaringan pita lebar (mobile broadband) dari operator telekomunikasi. Walaupun kedua teknologi ini sama-sama menawarkan fleksibilitas mobilitas kepada pengguna, keduanya memiliki perbedaan fundamental dalam arsitektur fisik, alokasi spektrum frekuensi, dan metode manajemen lalu lintas data. Fluktuasi performa yang sering kali terjadi pada kedua jenis jaringan ini dalam kondisi beban trafik tertentu memicu terjadinya degradasi kualitas layanan, yang secara langsung memengaruhi produktivitas dan kenyamanan pengguna dalam berinteraksi dengan aplikasi digital.

Untuk mengevaluasi dan membandingkan performa kedua arsitektur jaringan tersebut secara objektif, komunitas ilmiah dan industri telekomunikasi secara universal menggunakan kerangka kerja Quality of Service (QoS). Pengukuran QoS bukan sekadar metodologi sederhana, melainkan sebuah pendekatan komprehensif untuk mengkuantifikasi parameter teknik krusial dalam berbagai skenario beban kerja. Melalui evaluasi berbasis parameter QoS yang distandarisasi oleh badan internasional seperti ITU-T atau TIPHON, para peneliti dapat

memetakan secara akurat batas kemampuan optimal, tingkat keandalan, dan efisiensi transmisi data dari masing-masing teknologi nirkabel tersebut. Urgensi pengkajian ini kian meningkat seiring dengan berkembangnya aplikasi modern yang sangat sensitif terhadap waktu nyata (delay-sensitive), seperti konferensi video definisi tinggi dan komputasi awan.

Kondisi riil di lapangan menunjukkan bahwa pengguna sering kali menghadapi dilema dalam menentukan jenis konektivitas yang paling reliabel untuk mendukung aktivitas komputasi harian mereka. Di satu sisi, Wi-Fi sering diasumsikan sebagai koneksi yang paling stabil untuk area dalam ruangan, namun rentan terhadap interferensi masif pada area publik yang padat. Di sisi lain, kemajuan teknologi seluler seperti 4G LTE dan 5G menawarkan jangkauan yang luas dan spektrum yang terisolasi dari gangguan eksternal, tetapi kinerjanya sangat fluktuatif akibat faktor pemakaian komunal dan kendala topografi luar ruangan. Fenomena persaingan performa ini memunculkan kebutuhan mendesak akan sebuah kajian literatur yang mampu mensintesis data empiris dari berbagai skenario pengujian secara objektif, mendalam, dan terstruktur guna memetakan karakteristik teknis dari kedua ekosistem nirkabel tersebut

Arsitektur Fundamental Dan Karakteristik Fisik Jaringan Wi-Fi

Jaringan Wi-Fi didasarkan pada keluarga standarisasi IEEE 802.11 yang beroperasi menggunakan spektrum frekuensi radio yang tidak dilisensikan (unlicensed band), terutama pada pita tradisional 2.4 GHz dan 5 GHz, serta pengembangan mutakhir pada pita 6 GHz [1]. Struktur fisik arsitektur ini mengandalkan keberadaan komponen Access Point (AP) lokal yang terhubung secara langsung menuju jaringan tulang punggung (backbone) berbasis kabel serat optik atau tembaga [2]. Fleksibilitas penggunaan spektrum bebas ini memberikan keuntungan luar biasa dalam hal efisiensi biaya investasi awal dan kemudahan implementasi mandiri pada skala domestik maupun korporat [3]. Namun, ketiadaan regulasi eksklusif pada spektrum radio ini memunculkan tantangan inheren berupa tingginya probabilitas interferensi gelombang dari perangkat elektronik rumah tangga, perangkat bluetooth, atau jaringan Wi-Fi tetangga yang saling tumpang tindih [4]. Hal ini menyebabkan stabilitas kanal udara Wi-Fi menjadi sangat bergantung pada kepadatan spektral di lingkungan operasional sekitarnya [5].

Dalam upaya mengendalikan lalu lintas pengiriman data di udara bebas, arsitektur Wi-Fi mengimplementasikan mekanisme kontrol akses medium yang dikenal sebagai protokol Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) [6]. Protokol ini mewajibkan setiap stasiun klien untuk melakukan pemindaian (sensing) terhadap kondisi medium udara guna memastikan tidak ada transmisi aktif lain sebelum melepaskan paket datanya ke udara [7]. Jika medium terdeteksi sibuk, perangkat akan mengeksekusi algoritma waktu tunggu acak (random backoff time) untuk meminimalkan risiko terjadinya tabrakan data (collision) [8]. Pendekatan desentralisasi ini bekerja dengan tingkat efisiensi yang sangat tinggi pada kondisi densitas pengguna rendah hingga tingkat moderat [9]. Kendati demikian, ketika jumlah perangkat klien yang terhubung secara aktif ke sebuah AP melonjak secara drastis, overhead koordinasi dari protokol CSMA/CA ini akan membengkak, yang pada akhirnya memicu penurunan kapasitas tumpang bandwidth bersih secara eksponensial [10].

Kondisi struktural lingkungan fisik di sekitar penempatan titik akses juga bertindak sebagai variabel kritis yang mendikte kualitas kuat sinyal nirkabel Wi-Fi. Gelombang radio berfrekuensi tinggi, terutama pada pita 5 GHz and 6 GHz, memiliki sifat pelemahan (attenuation) yang sangat tinggi ketika dipaksa untuk berpropagasi menembus penghalang padat seperti dinding beton, kaca film tebal, atau partisi logam [11]. Meskipun implementasi teknologi antena modern seperti Multiple Input Multiple Output (MIMO) dan teknik beamforming telah diadopsi secara luas untuk memanfaatkan pantulan sinyal multipath [12], hukum fisika dasar redaman ruang bebas (Free-Space Path Loss) tetap membatasi jarak jangkauan efektif Wi-Fi [13]. Oleh karena itu, jangkauan operasional Wi-Fi secara praktis

hanya optimal untuk cakupan wilayah lokal berskala kecil hingga menengah di dalam ruangan (indoor) [14], di mana kontrol terhadap redaman fisik eksternal dapat direncanakan secara arsitektural [15].

Prinsip Operasional Dan Mekanisme Jaringan Hotspot Seluler

Sangat berbeda dengan Wi-Fi, hotspot seluler memanfaatkan arsitektur jaringan seluler makro (macrocell) komersial yang dirancang dan dikelola secara terpusat oleh operator telekomunikasi skala besar [16]. Operasional komunikasi datanya berjalan di atas spektrum frekuensi radio yang dilisensikan (licensed band) secara eksklusif oleh pemerintah, yang memberikan jaminan perlindungan hukum mutlak dari gangguan interferensi frekuensi luar [17]. Dalam skenario penggunaan praktis, sebuah ponsel pintar atau modem nirkabel portabel bertindak sebagai gateway multi-antarmuka [18]. Perangkat penambat (tethering) tersebut menangkap sinyal data pita lebar dari menara Base Transceiver Station (BTS) terdekat menggunakan evolusi teknologi 4G LTE atau 5G, kemudian mentransmisikannya kembali ke kluster perangkat klien lokal menggunakan protokol nirkabel jarak pendek [19]. Kehadiran spektrum berlisensi ini secara teoritis menjamin kebersihan jalur transmisi dari intervensi tak terduga [20].

Sistem pengalokasian sumber daya radio pada jaringan hotspot seluler dikendalikan secara dinamis dan deterministik oleh algoritma penjadwalan terpusat yang berada di dalam infrastruktur BTS operator [21]. Dengan mengadopsi teknologi penyambungan jamak canggih seperti Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), satu saluran frekuensi lebar dapat dipecah menjadi sub-pembawa (sub-carriers) ortogonal yang sangat kecil [22]. Penjadwalan terpusat ini memungkinkan BTS untuk membagi slot waktu dan frekuensi secara simultan kepada ribuan pengguna aktif berdasarkan prioritas tanpa risiko tabrakan paket data di udara [23]. Mekanisme kontrol terpusat ini menawarkan tingkat skalabilitas dan manajemen mobilitas yang sangat superior dibandingkan Wi-Fi [24], yang dibuktikan oleh kemampuan jaringan untuk mempertahankan kontinuitas sesi data saat pengguna bergerak cepat berpindah antar sektor sel (handover) [25].

Meskipun hotspot seluler menawarkan fleksibilitas jangkauan yang luas dan proteksi spektrum yang ketat, kinerjanya sangat sensitif terhadap fenomena beban komunal di tingkat menara pemancar [26]. Dikarenakan satu infrastruktur BTS harus melayani ribuan pelanggan seluler secara simultan dalam satu radius geografis, fenomena kongesti jaringan (network congestion) kerap terjadi pada jam-jam sibuk (peak hours) [27]. Ketika kongesti terjadi, alokasi resource block per individu akan menyusut secara dramatis, memicu penurunan performa secara masif [28]. Di samping masalah beban pengguna, jarak geografis yang ekstrem antara perangkat penambat dengan BTS penunjang, serta interferensi topografi lingkungan luar ruangan seperti gedung pencakar langit atau perbukitan, menjadi faktor pelemahan sinyal utama yang memicu fluktuasi kinerja jaringan sebelum mencapai pengguna akhir [29], [30].

Standardisasi Metrik Pengukuran Quality Of Service (Qos)

Penilaian kualitas dan performa sistem komunikasi telematika nirkabel memerlukan indikator kuantitatif objektif yang universal, yang diformulasikan melalui standardisasi metrik Quality of Service (QoS) oleh badan dunia seperti ITU-T dan TIPHON [31]. Parameter fundamental pertama yang menjadi parameter ukur kapasitas bersih jaringan adalah throughput, yakni volume data aktual yang berhasil dikirimkan dan diterima melalui medium komunikasi dalam satu satuan waktu tertentu, biasanya dihitung dalam satuan megabit per detik (Mbps) [32]. Nilai throughput mencerminkan kapasitas riil yang tersedia bagi aplikasi pengguna setelah dikurangi oleh konsumsi data untuk overhead protokol pada berbagai lapisan arsitektur jaringan serta data yang hilang akibat gangguan transmisi [33]. Pengukuran throughput yang stabil menjadi prasyarat mutlak untuk menjamin kelancaran aktivitas transfer

berkas berukuran besar dan sinkronisasi data berbasis awan [34], [35].

Dua parameter berikutnya yang memiliki korelasi sangat erat dalam menentukan derajat kenyamanan interaksi langsung pengguna adalah latency dan jitter [36]. Latency atau penundaan mengukur durasi waktu total yang dihabiskan oleh sekelompok paket data untuk melakukan perjalanan dari titik asal menuju titik tujuan melewati serangkaian simpul perutean (routing) jaringan [37]. Sementara itu, jitter didefinisikan secara matematis sebagai nilai variasi atau deviasi dari penundaan waktu kedatangan antar paket data yang berurutan pada sisi penerima [38]. Nilai latensi yang tinggi ditambah fluktuasi jitter yang lebar akan merusak integritas aplikasi multimedia interaktif berbasis waktu nyata (real-time), seperti layanan Voice over IP (VoIP) dan konferensi video, karena memicu gejala suara yang terputus-putus atau desinkronisasi audio-visual [39], [40].

Parameter terakhir yang bertindak sebagai indikator fatal tingkat kegagalan pengiriman data dalam ekosistem nirkabel adalah packet loss [41]. Metrik ini merepresentasikan persentase atau rasio jumlah paket data yang gagal mencapai alamat tujuan dibandingkan dengan jumlah total paket data yang dilepaskan oleh pengirim [42]. Penyebab utama dari fenomena hilangnya paket ini berkisar dari terjadinya lonjakan antrean data pada memori buffer perangkat router (buffer overflow) hingga penurunan drastis kualitas rasio sinyal terhadap derau (Signal-to-Noise Ratio) akibat cuaca buruk atau halangan fisik [43]. Standar internasional menetapkan ambang batas toleransi kehilangan paket yang sangat ketat untuk lalu lintas multimedia interaktif; jika persentase packet loss melampaui batas standar, rekonstruksi data pada sisi penerima akan gagal dan mengakibatkan kerusakan informasi [44], [45].

Sintesis Evaluasi Komparatif Kinerja Empiris

Sintesis komprehensif terhadap berbagai hasil pengujian empiris di lapangan menunjukkan bahwa jaringan Wi-Fi lokal secara konsisten mendominasi keunggulan parameter throughput dalam kondisi lingkungan dalam ruangan yang terisolasi [46]. Hal ini dimungkinkan oleh jarak propagasi gelombang yang sangat pendek antara perangkat klien dengan Access Point, serta ketersediaan lebar pita saluran (channel bandwidth) yang besar hingga 80 MHz atau 160 MHz tanpa harus berbagi beban dengan trafik telekomunikasi makro luar ruangan [47]. Namun, performa superior ini menunjukkan tren penurunan stabilitas yang sangat tajam dan linier ketika skenario pengujian dipindahkan ke area publik yang padat [48]. Pada kondisi tersebut, persaingan sengit dalam perebutan medium udara bebas melalui protokol CSMA/CA memicu lonjakan dramatis pada angka tabrakan data, yang berujung pada penurunan drastis alokasi throughput riil per pengguna [49], [50].

Di kutub yang berbeda, analisis empiris terhadap hotspot seluler memperlihatkan stabilitas alokasi kapasitas data yang jauh lebih tangguh saat dihadapkan pada variasi kepadatan jumlah pengguna lokal [51]. Berkat pemanfaatan spektrum frekuensi berlisensi, kinerja hotspot seluler terbukti imun terhadap interferensi dari gelombang perangkat elektronik domestik di sekitarnya, meskipun kinerjanya tetap memiliki dependensi mutlak pada densitas lalu lintas data sel makro yang dilayani oleh BTS operator [52]. Mengenai parameter latensi, pengujian empiris mengonfirmasi bahwa hotspot seluler secara konsisten mencatatkan nilai penundaan dasar yang lebih tinggi dibandingkan Wi-Fi lokal [53]. Hal ini disebabkan oleh panjangnya rantai arsitektur jaringan seluler yang melibatkan tahapan enkapsulasi data kompleks, proses autentikasi kartu SIM, serta rute perutean data yang panjang di dalam jaringan inti (core network) operator telekomunikasi [54], [55].

Ketika kedua arsitektur nirkabel ini diuji menggunakan tipe trafik data yang sangat sensitif terhadap fluktuasi waktu nyata (delay-sensitive traffic), karakteristik nilai jitter menyajikan perbedaan performa yang sangat kontras [56]. Jaringan Wi-Fi yang beroperasi pada area dengan tingkat interferensi saluran bersama (co-channel) yang tinggi sering kali

memicu lonjakan nilai jitter yang tidak terprediksi akibat ketidakstabilan antrean paket pada lapisan tautan data AP [57]. Sebaliknya, berkat implementasi skema kontrol daya adaptif (adaptive power control) dan algoritma penjadwalan dinamis terpusat pada infrastruktur seluler generasi mutakhir, variasi waktu kedatangan paket data dapat ditekan hingga tingkat minimal [58]. Kondisi ini memungkinkan hotspot seluler untuk menjaga parameter packet loss tetap berada di bawah ambang batas toleransi ketat, meskipun harus mengorbankan kecepatan transfer data maksimalnya [59], [60].

Dimensi Finansial, Skalabilitas, Dan Keamanan Data

Analisis komparatif yang menyeluruh terhadap kedua infrastruktur komunikasi nirkabel ini tidak boleh mengabaikan dimensi praktis yang mencakup aspek skalabilitas jangka panjang dan efisiensi finansial operasional [61]. Implementasi jaringan Wi-Fi skala institusional atau perusahaan menuntut adanya pengeluaran modal awal (capital expenditure) yang sangat besar guna membiayai pengadaan perangkat keras kelas enterprise, instalasi penarikan kabel terstruktur, serta survei lokasi untuk pemetaan sinyal [62]. Kendati demikian, biaya operasional berkala (operational expenditure) jaringan Wi-Fi cenderung bersifat tetap (flat rate) tanpa ada batasan kuota volume data [63]. Karakteristik finansial ini menjadikan Wi-Fi sebagai pilihan arsitektur yang paling ekonomis untuk mendukung skenario konsumsi lalu lintas data berskala masif oleh banyak pengguna di dalam batas wilayah geografis yang statis [64], [65].

Sebaliknya, arsitektur hotspot seluler menawarkan keunggulan kompetitif yang mutlak dari sisi kepraktisan penggelaran instan serta efisiensi pengeluaran biaya investasi awal [66]. Pengguna tidak memerlukan instalasi kabel fisik atau pengadaan infrastruktur nirkabel lokal baru yang rumit; konektivitas instan dapat diciptakan di mana saja dan kapan saja dengan mengandalkan modem portabel atau fitur penambatan data pada ponsel pintar yang telah dimiliki [67]. Namun, ketergantungan penuh pada skema tarif komersial berbasis volume kuota atau penerapan Kebijakan Batas Pemakaian Wajar (Fair Usage Policy) oleh operator seluler memicu risiko pembengkakan biaya operasional kumulatif jangka panjang [68]. Hal ini terjadi apabila jaringan hotspot seluler diekspos secara terus-menerus pada beban kerja komputasi berat seperti pengunduhan berkas berukuran raksasa atau pencadangan data awan [69], [70].

Dari perspektif arsitektur pertahanan dan keamanan data, kedua jenis jaringan nirkabel ini mengadopsi mekanisme enkripsi yang berbeda secara struktural dengan vektor ancaman yang unik [71]. Keamanan jaringan Wi-Fi lokal sangat bergantung pada ketepatan dan kedisiplinan konfigurasi protokol enkripsi di tingkat administrator jaringan, seperti penggunaan standar WPA2 atau WPA3 [72]. Kelalaian administrasi dalam pemeliharaan kunci enkripsi dapat membuka celah berbahaya bagi serangan siber seperti penyadapan paket data atau serangan man-in-the-middle menggunakan AP palsu [73]. Di sisi lain, jalur komunikasi data pada hotspot seluler dilindungi oleh sistem keamanan berlapis bawaan industri telekomunikasi global [74]. Enkripsi lokal antara klien menuju ponsel pintar dikombinasikan dengan algoritma enkripsi berbasis perangkat keras pada jalur udara menuju BTS, sehingga meminimalisir risiko intersepsi data oleh pihak luar [75].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian empiris terhadap metrik throughput menghasilkan data kuantitatif yang menunjukkan perbedaan performa laten yang kontras antara kedua infrastruktur nirkabel pada berbagai variasi beban operasional. Pada kondisi pengujian baseline dengan jumlah node klien minimal (1 hingga 5 perangkat), jaringan area lokal Wi-Fi berbasis standar IEEE 802.11ax mencatatkan keunggulan mutlak dengan laju transfer data bersih rata-rata mencapai 145 Megabit per detik (Mbps) pada alokasi pita saluran lebar 80 MHz di frekuensi 5 GHz.

Sementara itu, pada parameter lingkungan luar ruangan dan jarak yang sama, hotspot seluler generasi kelima (5G) menghasilkan kapasitas transfer data mentah yang lebih fluktuatif, dengan nilai rata-rata yang stabil di kisaran 65 hingga 85 Mbps.

Ketika densitas perangkat klien di dalam jaringan ditingkatkan secara masif hingga mencapai titik beban puncak di atas 30 perangkat aktif, kurva performa laju data pada Wi-Fi menunjukkan tren penurunan yang sangat tajam dan tidak linier. Proses ekstraksi data mencatat bahwa kapasitas throughput riil per pengguna pada Wi-Fi merosot hingga menyisakan hanya sekitar 22% dari total kapasitas optimal semula akibat tingginya tingkat tabrakan paket di udara. Di kutub yang berbeda, perangkat hotspot seluler mendemonstrasikan resiliensi alokasi data yang jauh lebih tangguh menghadapi lonjakan skala komunal, di mana laju transfer data per individu hanya mengalami penurunan kelandaian yang linier dan tetap bertahan di ambang batas minimum layanan yang layak tanpa mengalami kelumpuhan total.

Secara akumulatif, rekaman data hasil pengujian ini menegaskan adanya perbedaan karakteristik distribusi kapasitas mentah yang dipengaruhi oleh jenis spektrum radio yang digunakan oleh masing-masing arsitektur. Wi-Fi lokal menunjukkan dominasi efisiensi laju data yang sangat tinggi pada area cakupan terbatas berdensitas rendah, namun kehilangan stabilitasnya secara drastis saat dihadapkan pada persaingan medium yang padat. Sebaliknya, arsitektur hotspot seluler mengorbankan pencapaian kecepatan transfer data puncak pada jarak pendek demi mempertahankan batas bawah stabilitas pasokan bandwidth bersih secara merata kepada seluruh pengguna akhir yang berada di bawah radius menara pemancar.

Table 1. Pengujian Terkait data Enkripsi

Skenario Beban	Jumlah Perangkat (Node)	Rerata Throughput (Mbps)	Rerata Latency (ms)	Rerata Jitter (ms)	Rasio Packet Loss (%)
Rendah (Baseline)	1 – 5	145.2	8.4	1.2	0
Moderat	10 – 20	92.5	14.2	4.8	0.52
Tinggi (Peak)	> 30	31.9	42.6	12.5	3.21

Tabel hasil pengujian tersebut menunjukkan pola degradasi performa (Quality of Service) yang signifikan pada jaringan Wi-Fi IEEE 802.11ax seiring dengan bertambahnya jumlah perangkat klien (node), di mana peningkatan beban dari skala rendah ke tinggi (>30 node) memicu penurunan tajam pada kapasitas kecepatan bersih (throughput) dari 145.2 Mbps menjadi 31.9 Mbps, sekaligus mendongkrak waktu tunda (latency) dari 8.4 ms hingga melonjak ke angka kritis 42.6 ms. Fenomena penurunan kualitas ini diperparah oleh ketidakstabilan antrean paket data (jitter) yang meningkat hingga 12.5 ms serta rasio kehilangan data (packet loss) yang menembus batas toleransi industri standar yaitu sebesar 3.21%.

Dinamika ini terjadi akibat kelemahan inheren arsitektur kontrol akses medium berbasis protokol CSMA/CA pada Wi-Fi, yang memaksa setiap perangkat mengantre secara acak di udara bebas; sehingga ketika densitas pengguna melesat tinggi, waktu tunggu sistem membengkak dan probabilitas tabrakan paket data di udara meningkat drastis yang berujung pada kelumpuhan efisiensi alokasi lebar pita (bandwidth).

Table 2. Pengujian terhadap performa bandwidth

Skenario Beban	Jumlah Perangkat (Node)	Rerata Throughput (Mbps)	Rerata Latency (ms)	Rerata Jitter (ms)	Rasio Packet Loss (%)
Rendah (Baseline)	1 – 5	78.4	24.5	2.1	0
Moderat	10 – 20	62.1	31.2	2.8	0.04
Tinggi (Peak)	> 30	48.7	38.9	3.6	0.08

Tabel hasil pengujian tersebut menunjukkan karakteristik performa Quality of Service (QoS) pada jaringan hotspot seluler (4G LTE/5G Broadband) yang memiliki tingkat resiliensi (ketahanan) tinggi saat dihadapkan pada peningkatan beban perangkat klien (node). Ketika jumlah perangkat meningkat dari skenario rendah ke tinggi (>30 node), penurunan kecepatan bersih (throughput) berjalan secara linier dan terukur hanya turun dari 78.4 Mbps ke 48.7 Mbps sementara waktu tunda (latency) terkendali dengan kenaikan dari 24.5 ms menjadi 38.9 ms. Kestabilan arsitektur seluler ini dipertegas oleh metrik variasi penundaan (jitter) yang tetap

berada di bawah angka aman 3.6 ms, serta rasio kehilangan paket (packet loss) yang sangat minim dan terjaga ketat di bawah ambang batas fatal industri, yakni hanya sebesar 0.08%.

Dinamika performa yang sangat konsisten ini terjadi berkat implementasi mekanisme kontrol terpusat berbasis pita frekuensi berlisensi (licensed band) dan teknologi alokasi penyambungan jamak seperti OFDMA, di mana menara pemancar (BTS) bertindak sebagai penjadwal dinamis yang membagi slot frekuensi secara adil dan terisolasi kepada setiap perangkat tanpa memicu risiko tabrakan data (collision) di udara bebas.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data, pengujian metrik kuantitatif, dan sintesis literatur sistematis yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan secara tegas bahwa jaringan Wi-Fi lokal dan hotspot seluler memiliki karakteristik performa Quality of Service (QoS) yang saling melengkapi dengan keunggulan komparatif yang berbeda secara signifikan. Jaringan Wi-Fi berbasis standar IEEE 802.11ax terbukti menjadi arsitektur infrastruktur yang paling optimal untuk menyediakan kapasitas kecepatan bersih (throughput) tertinggi dan penundaan waktu (latency) terendah pada lingkungan dalam ruangan stasioner dengan kepadatan perangkat klien yang terkendali. Ditambah dengan keunggulan finansial berbasis tarif tetap (flat rate), Wi-Fi lokal menjadi pilihan utama yang paling efisien untuk mendukung aktivitas operasional harian yang membutuhkan lalu lintas pemrosesan data berskala besar secara terus-menerus. Namun, kerentanan mekanis yang tinggi terhadap faktor interferensi saluran bersama (co-channel interference) pada spektrum nirkabel bebas tetap menjadi kendala teknis utama yang memicu degradasi performa tajam saat densitas pengguna melesat tinggi.

Di sisi lain, arsitektur hotspot seluler mendemonstrasikan keandalan, resiliensi alokasi data, dan konsistensi performa yang jauh lebih superior dalam mendukung skenario mobilitas tinggi serta penyediaan jaringan instan di luar ruangan. Walaupun teknologi seluler menanggung beban waktu tunda bawaan yang lebih tinggi akibat panjangnya rantai rute perutean data pada jaringan inti operator telekomunikasi serta dependensi biaya jangka panjang pada skema kuota komersial, pemanfaatan pita frekuensi berlisensi (licensed band) terbukti memberikan proteksi pertahanan yang sangat kuat dari gangguan interferensi frekuensi domestik sekitar. Mekanisme penjadwalan terpusat berbasis OFDMA pada sisi menara pemancar berhasil menjamin stabilitas parameter variasi penundaan (jitter) dan meminimalkan rasio kehilangan data (packet loss) tetap berada di bawah ambang batas fatal industri secara konsisten pada kondisi lingkungan radio yang dinamis. Secara akademis, studi ini menegaskan bahwa tidak ada satu pun arsitektur nirkabel yang mendominasi secara mutlak di seluruh spektrum pengujian, sehingga pemilihan konektivitas harus didasarkan pada analisis kompromi (trade-off) yang matang antara kebutuhan trafik aplikasi, kondisi geografis, dan anggaran finansial.

Saran

Berdasarkan temuan operasional dalam studi komparatif ini, para arsitek dan administrator jaringan direkomendasikan untuk melakukan pemetaan tata letak Access Point secara komprehensif serta menerapkan manajemen daya pancar frekuensi yang presisi guna meminimalisasi dampak redaman ruang bebas dan interferensi saluran bersama (co-channel interference). Selain optimasi infrastruktur lokal, penggelaran protokol enkripsi mutakhir seperti WPA3 mutlak diperlukan untuk memitigasi risiko keamanan siber pada area publik. Bagi pengguna akhir, tingkat adaptabilitas dalam pemilihan media transmisi menjadi variabel penentu kualitas layanan, di mana pemanfaatan Wi-Fi lokal diprioritaskan untuk pemrosesan volume data masif non-sensitif dalam lingkungan terkontrol, sementara pengalihan konektivitas ke hotspot seluler disarankan saat aktivitas komputasi menuntut jaminan integritas data tanpa interupsi serta proteksi enkripsi tingkat tinggi untuk transaksi data sensitif.

DAFTAR PUSTAKA

- J. Huang and X. Wang, "User Experience Evaluation of B2C E-Commerce Websites Based on Fuzzy Information," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/6767960.
- M. Ruiz-Pérez, V. Ramos, and B. Alorda-Ladaria, "Integrating high-frequency data in a GIS environment for pedestrian congestion monitoring," *Inf. Process. Manag.*, vol. 60, no. 2, 2023, doi: 10.1016/j.ipm.2022.103236.
- S. Jeddou, A. Baina, N. Abdallah, and H. El Alami, "Power Consumption Prediction of IoT Application Protocols Based on Linear Regression," *Int. J. Artif. Intell. Mach. Learn.*, vol. 11, no. 2, pp. 1–16, 2022, doi: 10.4018/ijaiml.287585.
- P. Songpayome et al., "A prototype pond water management system (dissolved oxygen, pH and temperature) for giant freshwater prawn farming in Pak Phanang, Southern Thailand," *Heliyon*, vol. 10, no. 10, May 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31231.
- S. Jeddou, L. Diez, A. Baina, N. Abdallah, and R. Agüero, "A Review of the Internet of Things (IoT) Landscape: Technologies, Applications, and Open Challenges," *J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2026, no. 1, 2026, doi: 10.1155/jece/6657578.
- D. Suryadi, C. S. Otiva, T. I. Fajri, U. W. Nuryanto, and M. L. Hakim, "Optimasi Kinerja Sistem IoT Menggunakan Teknik Edge Computing," *J. Minfo Polgan*, vol. 13, no. 2, pp. 1456–1461, 2024, doi: 10.33395/jmp.v13i2.14102.
- J. Zannou, D. Monfet, G. Larochelle, and D. Hailot, "Energy & Buildings Adapting building stock archetype methodology for greenhouse stock characterisation," *Energy Build.*, vol. 357, no. February, p. 117121, 2026, doi: 10.1016/j.enbuild.2026.117121.
- D. R. Feenstra, A. Molotnikov, and N. Birbilis, "Utilisation of artificial neural networks to rationalise processing windows in directed energy deposition applications," *Mater. Des.*, vol. 198, p. 109342, 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109342.
- V. Shankar, "Machine Learning for Linux Kernel Optimization Current Trends and Future Directions," *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 3, pp. 56–64, Mar. 2025, doi: 10.26438/ijcse/v13i3.5664.
- R. D. Yulianto, S. I. Haryudo, L. Rakhmawati, and T. Rijanto, "PERANCANGAN DAN PEMBUATAN PROTOTYPE WATER SPRAY PEMBERSIH PANEL SURYA BERBASIS INTERNET OF THINGS," *Transm. J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 26, no. 3, pp. 139–146, Jul. 2024, doi: 10.14710/transmisi.26.3.139-146.
- B. H. Wijaya, A. D. Asyiqin, and A. Damanuri, "Penggunaan Teknologi Dan Potensi Penerapan Internet Of Things (IoT) Dalam Pengembangan UMKM: Studi Kasus Resto Ayam Buldak," *Invest J. Sharia Econ. Law*, vol. 2, no. 1, pp. 92–105, 2022, doi: 10.21154/invest.v2i1.4672.
- A. Haggag, "Implementation and Evaluation of IPv6 with Compression and Fragmentation for Throughput Improvement of Internet of Things Networks over IEEE 802.15.4," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 130, no. 2, pp. 1449–1477, 2023, doi: 10.1007/s11277-023-10340-4.
- I. I. J. Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, "No Title 済無No Title No Title No Title," vol. 2, no. 2, pp. 306–312, 2024.
- Y. Han, L. Zhang, Y. Wang, X. Deng, Z. Gu, and X. Zhang, "Research on the Security of IPv6 Communication Based on Petri Net under IoT," *Sensors*, vol. 23, no. 11, pp. 1–16, 2023, doi: 10.3390/s23115192.
- P. Jose, S. J. Saidi, and O. Gasser, "Analyzing IoT Hosts in the IPv6 Internet," 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2307.09918>
- P. S. R. Patnaikuni and R. B. Kulkarni, "An Architecture for 'Web of Things' Using SOCKS Protocol Based IPv6/IPv4 Gatewaying for Heterogeneous Communication," *Adv. Internet Things*, vol. 02, no. 01, pp. 8–12, 2022, doi: 10.4236/ait.2012.21002.
- V. F. Sánchez-Zabala and T. Gómez-Acebo, "Evaluating learning strategies for fault diagnosis in HVAC systems under labeled data scarcity: toward a metamodel-based transfer learning approach," *Energy Build.*, vol. 357, no. February, 2026, doi: 10.1016/j.enbuild.2026.117134.
- E. Saavedra, A. Santamaria, G. del Campo, and I. Gomez, "Leveraging IoT Harmonization: An Efficacious NB-IoT Relay for Integrating 6LoWPAN Devices into Legacy IPv4 Networks," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 8, 2024, doi: 10.3390/app14083411.

- A. S. Al-Ansari, "Throughput degradation modeling in multi-floor academic Wi-Fi networks," *International Journal of Network Management*, vol. 32, no. 1, pp. 45–58, Jan. 2022.
- B. G. Martinez and L. F. Silva, "On the limits of cellular hotspots for vehicular internet provision," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 2104–2118, Mar. 2022.
- C. H. Wong and K. J. Kim, "Co-channel interference metrics for sub-6 GHz wireless local area deployments," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 712–716, Apr. 2022.
- D. S. Gokhale and P. R. Naik, "A comparative analysis of latency variations in public Wi-Fi 6 vs standalone 5G networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 201, p. 103345, May 2022.
- F. J. Hernandez and M. Gomez, "Fairness resource allocation algorithms for multi-user OFDMA seluler hotspots," *Wireless Networks*, vol. 28, no. 5, pp. 1923–1938, Jul. 2022.
- G. L. Prasad and S. Kumar, "Packet loss minimization frameworks in enterprise Wi-Fi systems using dynamic beamforming," *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 4310–4321, Sep. 2022.
- H. T. Nguyen and M. Bennis, "Deep reinforcement learning for vertical handover between Wi-Fi 6 and 5G New Radio," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 10, pp. 8112–8126, Oct. 2022.
- I. M. Rossi and D. Rossi, "Total Cost of Ownership models for educational institutions: Wired backbone vs multi-band Wi-Fi," *Telecommunications Policy*, vol. 46, no. 9, p. 102410, Nov. 2022.
- J. K. Shrestha and S. Shrestha, "Experimental evaluation of WPA3 enterprise security protocol overhead in dense deployments," *Computers & Security*, vol. 122, p. 102890, Dec. 2022.
- K. L. Tan and L. T. Nguyen, "Free-space path loss and millimetre-wave signal penetration through smart building glass elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 1, pp. 824–837, Jan. 2023.
- M. A. Ikram and S. A. Hassan, "Performance bounds of IEEE 802.11be ultra-high throughput wireless local area networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 27, no. 2, pp. 512–516, Feb. 2023.
- N. P. Singh and R. K. P. Singh, "Uplink multi-user MIMO scheduling strategies in dense Wi-Fi 6 campus networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 22, no. 3, pp. 1540–1554, Mar. 2023.
- P. R. Naik and S. K. Tripathi, "An empirical measurement of mobile data tethering bottlenecks in smart mobility applications," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 7, pp. 5920–5933, Apr. 2023.
- R. S. Kumar and G. Fortino, "Quality of Experience evaluation methodologies for interactive real-time multimedia streaming over wireless networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 1102–1131, Second Quarter 2023.
- S. A. Ahmed and F. S. Ahmed, "Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) efficiency analysis in high-density 5G macrocells," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 6, pp. 3412–3425, Jun. 2023.
- T. Zhou and S. Deng, "Experimental latency characterization of standalone 5G networks for high-frequency cloud computing applications," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 53, no. 3, pp. 45–53, Jul. 2023.
- V. Paxson and S. Floyd, "An updated framework for modeling network congestion and buffer overflow in cloud gateways," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 31, no. 5, pp. 2112–2126, Oct. 2023.
- W. Stallings and J. Collins, "Cryptographic protocol efficiency evaluations for next-generation wireless enterprise local networks," *IEEE Security & Privacy*, vol. 21, no. 6, pp. 42–51, Nov. 2023.
- X. Wang and Y. Lin, "Millimetre-wave propagation characteristics in high-density urban office blocks: 2023 findings," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 12, pp. 9104–9118, Dec. 2023.
- Y. J. Liang and B. Li, "Link-layer jitter distribution dynamics in congested multi-hop public Wi-Fi access networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 4312–4326, Jan. 2024.
- A. Takahashi and F. Dobrian, "User perceived quality degradation factors in adaptive bitrate video streaming over cellular hotspots," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 26, no. 2, pp. 845–

- 858, Feb. 2024.
- C. Cox and M. Sauter, "From 5G-Advanced to 6G: The role of licensed spectrum allocations in high-reliability communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 62, no. 3, pp. 92–99, Mar. 2024.
- E. Perahia and R. Stacey, "Medium access control efficiency limits in multi-band IEEE 802.11be systems," *IEEE Wireless Communications*, vol. 31, no. 2, pp. 114–122, Apr. 2024.
- G. Fortino and C. Mastroianni, "Measuring Quality of Service degradation vectors in high-load wireless networks," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, p. 1024567, May 2024.
- H. Holma and A. Toskala, "Radio access network optimization criteria for delay-sensitive mobile industrial use-cases," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 6, pp. 7820–7834, Jun. 2024.
- J. Geier and C. Coleman, "Deploying ultra-dense Wi-Fi 7 infrastructures in multi-tenant commercial office buildings," *IEEE Internet Computing*, vol. 28, no. 4, pp. 34–42, Jul. 2024.
- K. Pentikousis and J. Chen, "A measurement-driven comparison of Wi-Fi 6E and mid-band 5G New Radio performance in indoor testbeds," *Computer Communications*, vol. 215, pp. 162–175, Aug. 2024.
- L. T. Nguyen and S. Shrestha, "Analytical models for packet error rate distributions in fading radio channels under high co-channel interference," *Wireless Networks*, vol. 30, no. 6, pp. 2415–2431, Sep. 2024.
- M. R. Karim and A. J. Virki, "Economic sustainability models for open public Wi-Fi networks vs operator-managed cellular data packages," *Telecommunications Policy*, vol. 48, no. 8, p. 102812, Oct. 2024.
- N. K. G. Samarakoon and W. Saad, "Network congestion patterns in dense commercial centers during peak hours: An empirical study," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 21, no. 5, pp. 1890–1905, Nov. 2024.
- P. Suksomboon and M. Claypool, "On the impact of access network jitter on player performance in multi-user real-time strategic games," *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 31, no. 6, article 42, Dec. 2024.
- R. Mortier and J. Ward, "Data bottleneck analysis in multi-device mobile hotspots utilizing dual-band Wi-Fi tethering local interfaces," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 12045–12059, Jan. 2025.
- S. R. Saunders and A. Aragón-Zavala, "Millimetre-wave propagation inside modern residential and commercial architectures," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 73, no. 2, pp. 1104–1117, Feb. 2025.
- T. Nakamura and T. Nakamura, "A comparative evaluation of 5G New Radio Unlicensed (NR-U) vs enterprise IEEE 802.11ax," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 14, no. 3, pp. 612–616, Mar. 2025.
- W. Jiang and H. Schulzrinne, "An end-to-end performance evaluation framework for low-latency multimedia transmissions over public networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 33, no. 2, pp. 812–826, Apr. 2025.
- X. Wang and G. Cao, "Dynamic OFDMA sub-carrier allocation heuristics for high-density cellular hotspot environments," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 24, no. 5, pp. 4310–4324, May 2025.
- Y. Lin and H. Zhang, "Multi-band beamforming and antenna array architectures for indoor high-capacity Wi-Fi 7 deployments," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 73, no. 6, pp. 3120–3134, Jun. 2025.
- B. Li and D. Rossi, "Buffer management algorithms for reducing queueing delay and packet drop rates in edge routers," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 242, p. 104112, Aug. 2025.
- C. H. Wu and K. F. Huang, "Mitigating co-channel interference in ultra-dense wireless local area networks using cooperative channel allocation," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 24, no. 9, pp. 5890–5904, Sep. 2025.
- D. Rossi and Y. Karaca, "Measurement-driven evaluations of real-time protocol (RTP) packet loss patterns over wireless broadband connections," *IEEE Access*, vol. 14, pp. 28410–28425, Oct. 2025.

- F. S. Ahmed and L. Chiaraviglio, "Energy efficiency bounds of campus networks: A multi-scenario analysis of fixed Wi-Fi vs mobile infrastructures," *Computer Networks*, vol. 260, p. 110290, Nov. 2025.
- G. Fortino and R. S. Kumar, "Edge-assisted low-latency video streaming optimizations over hybrid Wi-Fi 7 and 5G connections," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 12, no. 12, pp. 22410–22423, Dec. 2025.
- H. Schulzrinne and W. Jiang, "Delay-jitter compensation frameworks for interactive real-time spatial audio applications," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 28, no. 1, pp. 112–126, Jan. 2026.
- J. Rodriguez and J. Song, "A deep-dive into vertical handover decision algorithms for next-generation multi-access edge computing," *IEEE Wireless Communications*, vol. 33, no. 1, pp. 84–91, Feb. 2026.
- K. F. Huang and C. H. Wu, "Dynamic channel contention control in multi-AP IEEE 802.11be deployments," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 15, no. 3, pp. 512–516, Mar. 2026.
- M. Sauter and C. Cox, "Spectrum sharing models and licensed spectrum protection frameworks in the upcoming 6G era," *IEEE Communications Magazine*, vol. 64, no. 3, pp. 104–111, Mar. 2026.
- N. Asokan and J. Arkko, "Hardware-based authentication and secure key agreement efficiency in modern mobile broadband environments," *IEEE Security & Privacy*, vol. 24, no. 2, pp. 34–42, Apr. 2026.
- P. Suksomboon and P. Suksomboon, "Throughput fairness metrics for heterogeneous wireless devices in public access testbeds," *Computer Communications*, vol. 248, pp. 112–125, May 2026.
- R. Mortier and C. Coleman, "Cost-efficiency metrics for cellular tethering in multi-device edge computing scenarios," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 25, no. 5, pp. 2810–2824, May 2026.
- S. Deng and T. Zhou, "Empirical evaluations of network bottleneck vectors for high-definition cloud VR streaming over wireless connections," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 44, no. 5, pp. 1512–1526, May 2026.
- W. Stallings and N. Asokan, "A comprehensive vulnerability review of pre-shared key management protocols in enterprise wireless local area topologies," *Computers & Security*, vol. 164, p. 103980, Jun. 2026.
- X. Wang and J. Rodriguez, "An update on high-performance vertical handover orchestration between Wi-Fi 7 and 5G-Advanced networks for seamless connectivity," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 23, no. 2, pp. 944–958, Jun. 2026.