

KUALITAS LAYANAN JARINGAN NIRKABEL TERHADAP INTERFERENSI *CO-CHANNEL* DAN *ADJACENT-CHANNEL* PADA LINGKUNGAN KAMPUS

Muchamad Rusdan¹, Sri Kuswayati², Brian Damastu Ridho Utama³, Mohamad

Taufan Anwar⁴

Teknik Informatika^{1, 2, 3, 4}

Universitas Teknologi Bandung^{1, 2, 3}

Ma'soem University⁴

muchamad.rusdan@gmail.com¹, srikuswayati@gmail.com², brian.damastu@gmail.com³, taufan0264@gmail.com⁴

Abstrak

Jaringan nirkabel di lingkungan Kampus Utama Bandung mengalami degradasi kualitas layanan (QoS) akibat interferensi saluran bersama (*Co-Channel Interference*, CCI) dan saluran berdekatan (*Adjacent-Channel Interference*, ACI), diperparah oleh redaman material bangunan dan densitas titik akses (AP) yang tinggi. Penelitian ini bertujuan menganalisis dampak komparatif kedua jenis interferensi terhadap parameter QoS (*throughput*, *delay/latency*, *jitter*, *packet loss*) dan mengevaluasi efektivitas strategi mitigasi berbasis rekayasa spektrum. Metode yang digunakan adalah penelitian action research dengan skenario terkendali pada pita 2,4 GHz dan 5 GHz, menggunakan instrumen NetSpot, Wireshark, Iperf, dan penganalisis spektrum fisik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ACI memiliki dampak 3–5 kali lebih destruktif dibandingkan CCI, dengan *packet loss* mencapai 32,4% dan SINR turun hingga 2 dB pada jarak kanal 1 (kanal 1 vs 2), sedangkan CCI hanya menyebabkan penurunan *throughput* hingga 96,2% tanpa lonjakan *packet loss* signifikan. Material bangunan dengan redaman rendah (kaca) memperburuk interferensi lintas-ruangan, sementara beton bertulang (redaman 12–18 dB) menguntungkan untuk isolasi sel. Kebaruan penelitian ini adalah kerangka analisis yang memadukan perilaku lapisan MAC/PHY dengan audit QoS, menghasilkan panduan teknis rekayasa spektrum penguncian kanal ortogonal 1,6,11, optimisasi daya pancar (target RSSI -67 dBm), aktivasi BSS *Coloring*, dan menonaktifkan laju data di bawah 12 Mbps yang terbukti memulihkan *throughput* hingga 96% dari kondisi interferensi terburuk.

Kata kunci : Kualitas layanan, interferensi saluran bersama, interferensi saluran berdekatan, jaringan nirkabel kampus.

Abstract

Wireless networks in the Kampus Utama Bandung environment experience quality of service (QoS) degradation due to co-channel interference (CCI) and adjacent-channel interference (ACI), exacerbated by building material attenuation and high access point (AP) density. This study aims to analyze the comparative impact of both types of interference on QoS parameters (*throughput*, *delay/latency*, *jitter*, *packet loss*) and evaluate the effectiveness of spectrum engineering-based mitigation strategies. The method used is an action research study with controlled scenarios in the 2.4 GHz and 5 GHz bands, using NetSpot, Wireshark, Iperf instruments, and a physical spectrum analyzer. The results show that ACI has an impact 3–5 times more destructive than CCI, with *packet loss* reaching 32.4% and SINR dropping up to 2 dB at channel distance 1 (channel 1 vs 2), while CCI only causes a *throughput* decrease of up to 96.2% without a significant spike in *packet loss*. Low-attenuation building materials (glass) exacerbate cross-room interference, while reinforced concrete (12–18 dB attenuation) is beneficial for cell isolation. The novelty of this research is a holistic analysis framework that combines MAC/PHY layer behavior with QoS audits, resulting in a spectrum engineering technical guideline of orthogonal channel locking 1,6,11, transmit power optimization (RSSI target -67 dBm), BSS *Coloring* activation, and disabling data rates below 12 Mbps that is proven to restore *throughput* up to 96% under worst-case interference conditions.

Keywords : Quality of service, co-channel interference, adjacent-channel interference, campus wireless network.

I. PENDAHULUAN

Implementasi teknologi jaringan nirkabel berbasis Wi-Fi (IEEE 802.11) di lingkungan Kampus Utama Bandung (KUB) saat ini telah menjadi pilar infrastruktur nirkabel yang sangat fundamental guna mendukung pembelajaran dan operasional institusi yang tidak dapat dipisahkan dari ekosistem akademis dan administratif [1]–[5]. Data dari Statista (2023) menunjukkan bahwa lebih dari 95% universitas di negara-negara maju telah menyediakan cakupan jaringan nirkabel di seluruh area kampus, sementara tren serupa terjadi di negara-negara berkembang dengan tingkat adopsi yang meningkat rata-rata 15% per tahun [6]–[9]. Kebutuhan akan konektivitas nirkabel yang handal di lingkungan kampus didorong oleh faktor metode pembelajaran modern semakin mengandalkan *platform* digital, *Learning Management System* (LMS), dan akses *online resources* yang memerlukan koneksi internet stabil [10]–[12]. Mobilitas mahasiswa dan tenaga pendidik yang tinggi menuntut fleksibilitas akses dari berbagai lokasi di area kampus mulai dari ruang kuliah, perpustakaan, laboratorium, dan ruang terbuka [13]–[16]. Proliferasi perangkat *mobile* seperti *smartphone*, *tablet*, dan *laptop* yang dimiliki oleh setiap individu menciptakan densitas perangkat yang sangat tinggi dalam area terbatas [13]. Namun demikian, pertumbuhan eksponensial infrastruktur dan penggunaan jaringan nirkabel membawa konsekuensi kompleks yang sering kali tidak terantisipasi dengan baik saat perencanaan awal. Salah satu tantangan paling signifikan adalah fenomena interferensi, yaitu kondisi dimana sinyal dari berbagai sumber saling tumpang tindih dan mengganggu satu sama lain, sehingga menurunkan kualitas komunikasi data [6]. Jaringan nirkabel beroperasi pada pita spektrum frekuensi *Industrial, Scientific, and Medical* (ISM) band pada 2.4 GHz dan 5 GHz, jaringan nirkabel di area kampus harus berbagi spektrum yang terbatas dengan ribuan stasiun pengguna nirkabel secara dinamis dan simultan [8], [17].

Keterbatasan spektrum elektromagnetik dan dikombinasikan dengan perluasan *Access Point* (AP) nirkabel yang masif dan tidak terencana, memicu terbentuknya jaringan kacau (*chaotic network*) [18]. Dalam kondisi padat nirkabel tersebut, kualitas layanan atau *Quality of Service* (QoS) mengalami degradasi kinerja akibat perebutan akses *airtime* udara yang tidak terkontrol. Faktor penting yang mendegradasi performa jaringan nirkabel di lingkungan kampus dengan densitas pengguna yang tinggi adanya interferensi nirkabel yang secara spesifik terbagi menjadi *Co-Channel Interference* (CCI) dan *Adjacent-Channel Interference* (ACI). CCI terbentuk akibat penggunaan kanal frekuensi yang sama oleh beberapa AP atau perangkat nirkabel beroperasi pada frekuensi kanal yang identik dalam area tumpang tindih (*overlapping coverage area*) [3], [7], [13], [15], [16], [19]–[22], dapat menyebabkan *collision domain* yang sama harus dibagi oleh banyak perangkat, sehingga setiap perangkat harus bersaing untuk medium transmisi yang sama menggunakan protokol *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA) [23]. Sedangkan ACI muncul ketika beberapa perangkat beroperasi pada kanal yang berdekatan dalam spektrum frekuensi, dimana energi sinyal dari 1 (satu) kanal "bocor" (*spectral leakage*) ke kanal tetangga dan menyebabkan gangguan [1], [3], [4], [24]. ACI tetap menjadi faktor signifikan dalam degradasi performa pada lingkungan dengan densitas AP tinggi [25]–[30]. Implikasi dari interferensi terhadap degradasi QoS jaringan nirkabel dapat memanifestasikan dalam bentuk penurunan kekuatan sinyal (*signal strength*) yang diterima oleh *client device*. Reduksi kapasitas *throughput* atau *data rate*. Peningkatan *packet loss rate* dan *retransmission*. Peningkatan latensi (*delay*) dan *jitter* yang berdampak pada aplikasi *real-time*. Ketidakstabilan koneksi dan *disconnect* yang sering meningkat [31].

Kajian mengenai mitigasi interferensi nirkabel dan optimisasi QoS di area tertutup telah dieksplorasi secara luas dalam literatur ilmiah. Evaluasi QoS diuji menggunakan metode *Action Research* untuk mengukur parameter QoS (*throughput*, *delay/latency*, *jitter*, dan *packet loss*) di bawah pengaruh rintangan fisik (*fresnel zone barrier*) dan tumpang tindih sinyal saluran bersama menggunakan perangkat lunak analitis seperti *NetStumbler*, *Axence NetTools*, dan *Iperf*. Untuk pemodelan interferensi, model antrean (*queueing theory*) *M/M/c* sering diterapkan guna memproyeksikan probabilitas perselisihan saluran (*channel contention*) pada wilayah sel yang saling tumpang tindih [7]. Sementara itu, studi terkait ACI pada lingkungan perangkat nirkabel bergerak menunjukkan bahwa pergeseran jarak frekuensi saluran (*channel distance*) dan jarak geometris memiliki pengaruh besar terhadap laju kegagalan paket data akibat luberan spektral (*spectral bleed-over*). Solusi optimisasi dinamis juga mulai diteliti melalui penerapan algoritma *Dynamic Channel Assignment* (DCA) [32] dan *Transmit Power Control* (TPC) [13] berbasis kecerdasan buatan pada sistem pengendali nirkabel atau *Wireless LAN Controller* (WLC) [33].

Meskipun berbagai penelitian terdahulu telah memberikan landasan teoretis dan empiris, masih terdapat kesenjangan penelitian. Sebagian besar studi cenderung memisahkan antara pemodelan matematis murni dengan pengujian kualitas jaringan di lapangan secara dinamis, sehingga sangat sedikit penelitian yang mengintegrasikan secara simultan analisis perilaku protokol lapisan MAC seperti CSMA/CA dan kepekaan *Clear Channel Assessment* (CCA) [34] dengan pengujian parameter QoS di bawah pengaruh CCI dan ACI, terutama pada kondisi yang dipengaruhi langsung oleh redaman penetrasi material fisik arsitektur bangunan KUB, seperti dinding beton tebal, material logam, dan sekat kaca. Ketiadaan perbandingan komparatif antara dampak penundaan akibat CCI (*CCA deferrals*) dengan dampak tabrakan paket data fisik akibat ACI di lingkungan KUB yang berdensitas pengguna tinggi yang menjadi celah yang diatasi dalam penelitian ini. Secara keseluruhan, kebaruan penelitian ini terletak pada pepaduan pemodelan perilaku protokol lapisan fisik (PHY) dan lapisan MAC dengan audit QoS di bawah pengaruh tumpang tindih saluran nirkabel serta redaman penetrasi material bangunan. Penelitian ini tidak hanya menyajikan data statistik pengukuran, tetapi juga merumuskan panduan teknis yang divalidasi langsung untuk menciptakan efisiensi penggunaan *airtime* nirkabel yang maksimal di lingkungan akademik dengan densitas pengguna tinggi.

Untuk menjembatani kesenjangan tersebut, penelitian ini menetapkan tujuan, yaitu: (a) menganalisis dan membandingkan dampak degradasi QoS jaringan nirkabel akibat CCI dan ACI di lingkungan KUB secara waktu nyata (*real-time*); (b) mengidentifikasi pengaruh karakteristik redaman penetrasi berbagai material arsitektur bangunan fisik kampus terhadap performa propagasi gelombang radio nirkabel pada pita frekuensi 2.4 GHz dan 5 GHz; (c) mengevaluasi efektivitas rekayasa spektrum nirkabel dan kebijakan konfigurasi parameter *Radio Resource Management* (RRM) guna menyusun rekomendasi strategi mitigasi interferensi untuk optimalisasi performa jaringan.

Penelitian ini menyajikan data statistik pengukuran dan merumuskan panduan teknis rekayasa spektrum *unlicensed bands*, menggabungkan pembagian kanal ortogonal, optimasi daya pancar AP, kemudi pita (*Band Steering*), pewarnaan BSS (*BSS Coloring*), dan penonaktifan *legacy data rates* lambat yang divalidasi langsung untuk menciptakan efisiensi penggunaan *airtime* nirkabel di lingkungan kampus densitas tinggi. Penelitian ini memiliki kebaruan terkait penyusunan kerangka analisis nirkabel yang memadukan lapisan fisik (PHY) dan MAC metode CCA, *Signal Detection*, dan *Energy Detection* dengan audit QoS di bawah pengaruh tumpang tindih saluran nirkabel dan redaman arsitektur.

II. TINJAUAN PUSTAKA

1. Mekanisme PHY dan MAC pada Jaringan Nirkabel

Untuk menganalisis pengaruh CCI dan ACI, perilaku protokol pada PHY dan MAC harus ditinjau berdasarkan standar IEEE 802.11 [35]–[37]. Sebagai media komunikasi *half-duplex*, perangkat radio Nirkabel tidak mampu memancarkan dan menerima data secara simultan pada frekuensi yang sama. Guna meminimalkan tabrakan data (*collision*), protokol IEEE 802.11 mengimplementasikan metode akses jamak CSMA/CA yang

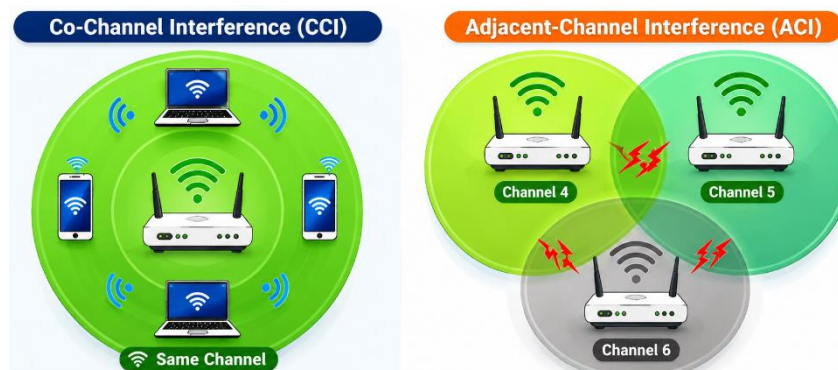
dikombinasikan dengan mekanisme CCA [23], [32], [34]. Mekanisme CCA mengevaluasi kondisi medium udara melalui dua metode deteksi, yaitu *signal detection* dan ED. *signal detection* bertugas memantau preamble standar nirkabel 802.11 dengan ambang batas kepekaan yang sangat rendah sekitar 4 dB di atas lantai *noise*, sedangkan ED mendeteksi energi radio non-nirkabel dengan ambang batas yang lebih tinggi, berkisar antara -62 dBm sampai -80 dBm. Sebelum memulai transmisi, *client station* atau AP akan memeriksa kondisi kanal. Jika medium dinyatakan sibuk, perangkat akan menunda transmisi dan memulai perhitungan waktu tunggu acak (*backoff timer*) [1]. Waktu tunggu acak diformulasikan secara matematis sebagai berikut:

$$T_{backoff} = \text{Random}(0, CW) \times T_{slot} \quad (1)$$

Di mana CW adalah *Contention Window* yang nilainya akan melipat ganda secara eksponensial setiap kali terjadi kegagalan transmisi, bergerak di antara batas minimum (CW_{min}) dan maksimum (CW_{max}), sementara (T_{slot}) mewakili durasi slot waktu fisik nirkabel. Selain itu, koordinasi virtual juga dilakukan melalui nilai *Network Allocation Vector* (NAV) yang terkandung dalam frame nirkabel guna mencegah interferensi selama sesi transmisi berlangsung.

2. Perilaku Protokol di Bawah Pengaruh CCI

Ketika 2 (dua) atau lebih AP beroperasi pada saluran frekuensi yang identik dan saling mendeteksi sinyal satu sama lain di atas ambang batas *signal detection*, mekanisme CSMA/CA memperlakukan seluruh perangkat tersebut sebagai bagian dari satu sel besar nirkabel yang sama. Setiap kali 1 (satu) perangkat memancarkan data, perangkat lain pada kanal yang sama, meskipun berada di bawah kendali AP yang berbeda akan mendeteksi *preamble* tersebut melalui *signal detection*, kemudian menyatakan medium sedang sibuk dan menunda transmisinya (*CCA deferrals*). Fenomena tersebut menciptakan masalah terminal terekspos (*exposed terminals*), dimana perangkat terpaksa mengantri untuk berbagi waktu udara (*airtime*) [35]. CCI pada dasarnya bukanlah *noise* fisik acak, melainkan masalah kepadatan jalur transmisi (*congestion*) di mana kinerja jaringan mengalami penurunan akibat waktu tunggu antrean memanjang yang dapat dimodelkan dengan teori antrean multi-jalur $M/M/c$ [7]. Pengguna di area dengan tingkat CCI tinggi sering kali melihat indikasi kekuatan sinyal penuh pada perangkatnya, namun mengalami *throughput* yang sangat rendah akibat sempitnya sisa *airtime* yang dapat digunakan untuk transmisi data [7].



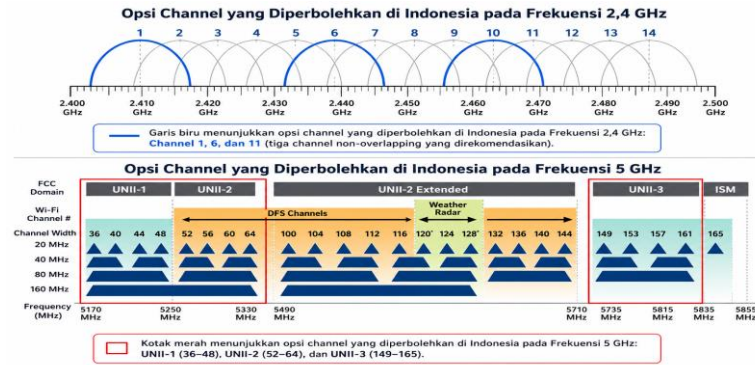
Gambar 1. Co-Channel Interference dan Adjacent-Channel Interference

3. Perilaku Protokol di Bawah Pengaruh ACI

Mekanisme ACI bekerja secara berbeda dan cenderung lebih merusak kestabilan jaringan nirkabel dibandingkan CCI. ACI terjadi akibat pancaran sinyal dari saluran yang bersebelahan saling tumpang tindih. Pada pita 2.4 GHz, lebar kanal fisik adalah 22 MHz namun jarak antarpusat kanal hanya 5 MHz, sehingga diperlukan pemisahan minimal 5 kanal seperti skema ortogonal (*Non-Overlapping Channel*) 1, 6, dan 11 yang disajikan pada Gambar 1 guna menghindari tumpang tindih [35]. Ketika AP ditempatkan pada kanal yang tumpang tindih (misal kanal 1 dan kanal 3), kebocoran energi atau luberan spektral (*spectral bleed-over*) dari pemancar saluran tetangga akan masuk ke dalam pita frekuensi penerima [1], [4], [38]. Karena frekuensi tengah dari sinyal ACI bergeser dari frekuensi penerima, modul *signal detection* gagal mengidentifikasi sinyal tersebut sebagai *preamble* nirkabel yang valid. Akibatnya, luberan energi tersebut hanya terbaca sebagai *background noise* fisik yang menaikkan batas bawah *noise* (*noise floor*) pada sel penerima. Karena modul *signal detection* tidak mendeteksi adanya *preamble*, perangkat pada kedua kanal yang tumpang tindih tersebut akan menganggap medium bersih secara nirkabel dan mentransmisikan data secara bersamaan. Hal tersebut dapat memicu tabrakan sinyal secara fisik di udara, meningkatkan kesalahan bit, dan memicu retransmisi paket nirkabel secara masif akibat rusaknya integritas data. Kerusakan data secara drastis menurunkan rasio *Signal-to-Interference-and-Noise Ratio* (SINR) [1] yang diformulasikan sebagai berikut:

$$SINR = \frac{P_{signal}}{P_{CCI} + P_{ACI} + P_N} \quad (2)$$

Dimana P_{signal} adalah daya sinyal yang diinginkan, P_{CCI} adalah daya interferensi saluran bersama, P_{ACI} adalah daya interferensi saluran bersebelahan, dan P_N mewakili total daya *noise* termal serta interferensi lingkungan. Rendahnya nilai SINR meminimalkan peluang keberhasilan *decode* data pada sisi penerima, menjadikan ACI sebagai jenis interferensi yang paling destruktif.



Gambar 2. Skema Ortogonal Non-Overlapping Channel

4. Parameter Kualitas Layanan (QoS) Berdasarkan Standar TIPPHON dan ITU-T

Penurunan kualitas pada lapisan PHY dan MAC secara langsung mendegradasi parameter QoS pada lapisan jaringan dan aplikasi. Standarisasi pengukuran kualitas layanan di lingkungan akademis mengacu pada parameter yang ditetapkan oleh *Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Network* (TIPHON) dari ETSI dan rekomendasi *International Telecommunication Union* (ITU-T). Terdapat empat parameter yang dievaluasi untuk menentukan kelayakan performa jaringan nirkabel, sebagai berikut:

- Throughput* merupakan *volume* data aktual yang berhasil ditransmisikan melalui media komunikasi dalam satuan waktu tertentu. Tingginya intensitas interferensi CCI dan ACI akan memangkas ketersediaan kapasitas *throughput real* akibat hilangnya efisiensi *airtime* dan tingginya tingkat kegagalan transmisi paket data [11], [36]. Metode analisis kuantitatif diterapkan pada parameter QoS menggunakan standar TIPPHON untuk mengevaluasi kinerja *throughput* jaringan nirkabel dengan rumus kalkulasi matematis, sebagai berikut:

$$Throughput (Th) = \frac{Data Received (Kb)}{Observation Time (Sec)} \quad (3)$$

- Delay (Latency)* merupakan total durasi waktu yang dibutuhkan oleh paket data untuk berpindah dari sumber menuju tujuan. Peningkatan *delay* pada jaringan nirkabel sangat dipengaruhi oleh waktu tunggu antrean (*queuing delay*) pada *buffer* AP ketika perangkat harus menunda transmisi akibat deteksi medium sibuk oleh CCA [36]. Metode analisis kuantitatif diterapkan pada parameter QoS menggunakan standar TIPPHON untuk mengevaluasi kinerja *delay* jaringan nirkabel dengan rumus kalkulasi matematis, sebagai berikut:

$$Delay (D) = \frac{Total_{parrival} - Total_{psent}}{Total_{Preceived}} \quad (4)$$

- Jitter* merupakan variasi atau deviasi waktu kedatangan antar-paket data yang berurutan pada sisi penerima. *Jitter* yang tinggi merepresentasikan ketidakstabilan transmisi dan sangat dipengaruhi oleh fluktuasi waktu tunggu antrean akibat persaingan akses medium nirkabel yang tidak menentu [36]. *Jitter* dihitung berdasarkan algoritma transit waktu relatif RFC 3550 [39], [40], sebagai berikut:

$$D(i-1, i) = (R_i - S_i) - (R_{i-1} - S_{i-1})$$

$$J(i) = J(i-1) + \frac{|D(i-1, i)| - J(i-1)}{16} \quad (5)$$

- Packet Loss* merupakan persentase jumlah paket data yang hilang atau rusak selama proses transmisi nirkabel berlangsung. Pada jaringan nirkabel, *packet loss* dipicu oleh tabrakan sinyal fisik akibat ACI atau kegagalan pemeriksaan redundansi siklik (*Cyclic Redundancy Check*) karena rendahnya nilai SINR

[36]. Metode analisis kuantitatif diterapkan pada parameter QoS menggunakan standar TIPHON untuk mengevaluasi kinerja *packet loss* jaringan nirkabel dengan rumus kalkulasi matematis, sebagai berikut:

$$\text{Packet Loss } (P_{\text{loss}}) = \frac{P_{\text{sent}} - P_{\text{received}}}{P_{\text{sent}}} \times 100\% \quad (6)$$

Validasi hasil pengukuran lapangan dilakukan dengan membandingkan nilai rata-rata dari 5 sampai 9 kali uji coba berulang terhadap indeks ambang batas kualitas standar regulasi TIPHON [36]. Selain itu, keandalan model tumpang tindih CCI divalidasi silang secara teoretis menggunakan model antrian M/M/c untuk membuktikan bahwa penurunan throughput di lapangan bersesuaian dengan peningkatan waktu tunda antrian transmisi akibat mekanisme carrier sensing fisik.

Untuk menjamin kualitas layanan pada aplikasi berbasis waktu nyata (*real-time applications*) seperti suara berbasis IP (VoWiFi) dan konferensi video interaktif, standar ITU-T G.114 merekomendasikan batas latensi 1 (satu) arah (*one-way latency*) maksimum sebesar 150 ms. Sementara itu, evaluasi subjektif terhadap kualitas suara yang dikirimkan melalui jaringan nirkabel dapat dianalisis menggunakan metode prediksi ITU-T G.107 E-model untuk menghasilkan skor estimasi opini rata-rata (*Mean Opinion Score* atau MOS-LQE) [9]. Tersaji dalam Tabel 1 klasifikasi indeks performa QoS berdasarkan standar regulasi TIPHON yang digunakan sebagai tolak ukur evaluasi kualitas layanan nirkabel di lingkungan KUB.

TABEL I
KLASIFIKASI INDEKS PERFORMA QOS BERDASARKAN STANDAR TIPHON

Parameter	Sangat Bagus	Bagus	Sedang	Kurang
Throughput	> 75%	50%-74,75%	25%-49,75%	< 25%
Delay/Latency	< 150 ms	150-300 ms	300-450 ms	> 450 ms
Jitter	< 0 ms	1-75 ms	76-125 ms	> 126 ms
Packet Loss	0%	3%	15%	> 25%

5. Penelitian Terdahulu

Kajian terhadap beberapa penelitian terdahulu yang dilakukan di institusi pendidikan tinggi memberikan pemahaman mengenai interferensi CCI, ACI, dan rintangan fisik mendegradasi parameter QoS. Tersaji pada Tabel 2 ringkasan perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang akan dilakukan.

TABEL II
RINGKASAN PENELITIAN TERDAHULU TERKAIT QOS JARINGAN NIRKABEL DAN INTERFERENSI DI LINGKUNGAN KAMPUS

No	Peneliti	Tujuan Penelitian	Hasil	Kesenjangan Penelitian
1	Fathinuddin et al. [41]	Mengoptimalkan jaringan nirkabel berdasarkan desain bangunan di Universitas Telkom menggunakan metode NDLC (<i>Network Development Life Cycle</i>).	<i>Site survey</i> menemukan area dengan interferensi tinggi akibat kesalahan konfigurasi kanal pada AP berdekatan menggunakan kanal yang sama dan AP yang dipasang pada dinding mengganggu lantai atas dan bawah. QoS setelah optimasi memenuhi standar TIPHON throughput >1 kbps, packet loss <3%, delay <150 ms. Rekomendasi adalah konfigurasi kanal non-overlapping 1-6-11.	Penelitian ini fokus pada optimasi berbasis desain bangunan tanpa analisis mendalam tentang perbedaan mekanisme CCI dan ACI. Penelitian ini menganalisis secara komparatif kedua jenis interferensi CCI dan ACI, serta menambahkan redaman material bangunan sebagai variabel.
2	Putra et al. [42]	Mengukur cakupan WiFi di Gedung Telkom University Landmark Tower (TULT) menggunakan <i>Reference Signal Received Power</i> (RSRP), <i>Signal to Noise Ratio</i> (SNR), analisis <i>heatmap</i> dan parameter QoS.	Beberapa area mengalami <i>deadspot</i> dan interferensi signifikan akibat kanal yang tumpang tindih dan cakupan AP tidak merata. Setelah optimasi dengan penyesuaian kanal, optimalisasi posisi AP, penambahan AP, area dengan RSSI buruk berkurang signifikan dan distribusi kanal menjadi lebih efisien.	Penelitian ini memberikan bukti lapangan tentang masalah interferensi akibat kanal tumpang tindih di gedung bertingkat. Penelitian ini akan melengkapi dengan menganalisis secara kuantitatif perbedaan dampak antara CCI dan ACI pada parameter QoS yang sama.
3	Muliadi et al. [43]	Menganalisis kinerja jaringan <i>enterprise</i> di	Distribusi AP belum optimal, sebagian besar perangkat masih	Penelitian ini menyoroti keterbatasan pita 2,4 GHz yang

		SMK Handayani Makassar yang berperan penting dalam mendukung pembelajaran digital.	menggunakan frekuensi 2,4 GHz yang rentan terhadap interferensi, dan terjadi ketidakseimbangan trafik antar area. Solusi yang diusulkan meliputi penataan ulang posisi AP, peningkatan ke teknologi <i>dual-band</i> , VLAN, QoS, dan sistem monitoring <i>real-time</i> .	rentan interferensi dan pentingnya migrasi ke <i>dual-band</i> . Penelitian ini akan memberikan data tentang seberapa besar peningkatan QoS yang dapat dicapai dengan <i>band steering</i> dan migrasi ke pita 5 GHz, serta menguji strategi mitigasi.
4	Tiffany et al. [44]	Menganalisis parameter QoS (throughput, packet loss, delay, jitter) pada jaringan WiFi di gedung Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani menggunakan Wireshark untuk mengevaluasi kinerja jaringan internet saat digunakan untuk aktivitas <i>live streaming</i> atau <i>browsing</i> .	Hasil pengukuran menunjukkan <i>throughput</i> rata-rata 1406,76 Kbps, <i>packet loss</i> 0%, <i>delay</i> 70,21 ms, <i>jitter</i> 85,96 ms. Dengan indeks rata-rata keseluruhan parameter QoS sebesar 3,25, jaringan termasuk dalam kategori "Bagus" menurut standar TIPHON.	Penelitian ini memberikan data tentang QoS di lingkungan kampus dengan observasi menggunakan Wireshark. Penelitian ini akan melengkapi dengan (1) menganalisis akar penyebab degradasi QoS melalui identifikasi interferensi CCI dan ACI, bukan hanya mengukurnya, (2) menguji strategi mitigasi aktif seperti kanal ortogonal dan optimasi daya pancar, serta (3) menyertakan faktor redaman material bangunan sebagai variabel yang mempengaruhi propagasi sinyal.
5	Lee, Kim, & Kwak [20]	Mengevaluasi dampak CCI pada jaringan nirkabel melalui eksperimen di lingkungan luar ruangan dan simulasi ns-3, serta menganalisis dampak performa di setiap lapisan <i>stack</i> jaringan.	CCI menyebabkan degradasi performa jaringan. Menganalisis bagaimana <i>packet error</i> merambat ke lapisan atas dan mengusulkan <i>throughput</i> maksimum teoretis dengan mempertimbangkan <i>error rate</i> di lapisan <i>data link</i> dan TCP.	Penelitian ini memberikan landasan teoretis tentang mekanisme perambatan <i>error</i> akibat CCI. Penelitian ini akan melengkapi dengan (1) fokus pada lingkungan kampus dalam ruangan, (2) menganalisis ACI secara komparatif dengan CCI, dan (3) menyertakan strategi mitigasi berbasis teknologi BSS <i>Coloring</i> , dan TPC.

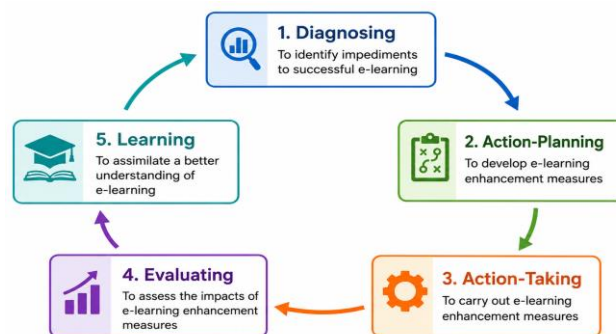
Berdasarkan peta penelitian terdahulu yang tersaji pada Tabel 2. Sebagian besar penelitian terdahulu [1]–[3] membahas interferensi secara umum tanpa membedakan antara CCI dan ACI. Penelitian Lee, Kim, & Kwak [4] menganalisis CCI secara mendalam, namun tidak memberikan perbandingan kuantitatif dengan ACI dalam satu kerangka yang sama. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggabungan secara simultan analisis perilaku protokol Lapisan MAC (CSMA/CA, CCA, *Signal Detection*, *Energy Detection*) dengan pengujian parameter QoS di bawah pengaruh interferensi CCI dan ACI, di lingkungan kampus yang memiliki redaman material bangunan. Hal ini memungkinkan perbandingan langsung tingkat destruktivitas relatif antara CCI dan ACI. Penelitian terdahulu [1], [5] umumnya hanya mempertimbangkan faktor jarak, konfigurasi AP, dan kepadatan pengguna sebagai variabel yang mempengaruhi QoS. Kebaruan penelitian ini adalah mengidentifikasi secara kuantitatif hubungan antara nilai redaman penetrasi berbagai material arsitektur kampus (kaca, kayu, bata merah, beton bertulang, logam) dengan potensi terbentuknya CCI lintas-ruangan dan ACI. Penelitian ini tidak sekadar mengukur redaman, tetapi juga menjelaskan bagaimana material dengan redaman rendah (kaca dan kayu) membocorkan sinyal dan memperparah interferensi, sementara material dengan redaman tinggi (beton) justru menguntungkan untuk isolasi sel nirkabel meskipun menciptakan zona mati (*deadzone*). Penelitian optimasi sebelumnya [3] telah merekomendasikan konfigurasi kanal non-overlapping 1-6-11, namun belum mengeksplorasi fitur BSS *Coloring*. Kebaruan penelitian ini adalah perumusan panduan teknis rekayasa spektrum tak-berlisensi, mencakup: (1) pembagian kanal ortogonal; (2) optimisasi daya pancar (*Transmit Power Control*) dengan target RSSI -67 dBm; (3) BSS *Coloring*; dan (5) penonaktifan laju data dasar di bawah 12 Mbps. Kelima strategi divalidasi di lingkungan KUB dengan densitas pengguna tinggi, sehingga menghasilkan rekomendasi yang mudah untuk diaplikasikan.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Kampus Utama Bandung (KUB) yang mencakup area seluas kurang lebih 5 hektare dengan 8 bangunan yang melayani 10.557 mahasiswa dan 1.133 tenaga pendidik. Area uji yang dipilih adalah Gedung B yang memiliki 7 lantai, meliputi lantai basement (terdapat foodcourt dan courtyard), lantai 1 (ruang kantor, ruang kelas, dan koridor), lantai 2 (ruang kantor, laboratorium komputer, ruang kelas, dan ruang dosen), lantai 3 (ruang kantor, ruang kelas, laboratorium komputer, dan ruang dosen), lantai 4 (ruang kelas dan laboratorium komputer), lantai 5 (ruang kelas, ruang dosen, ruang kantor, dan laboratorium komputer), serta lantai 6 (ruang kelas, ruang seminar, dan ruang teater). Penelitian ini menerapkan pendekatan *experimental action research* yang memungkinkan untuk terlibat langsung dalam merencanakan skenario interferensi nirkabel di lapangan, melakukan pengukuran secara dinamis, dan mengevaluasi hasilnya untuk menyusun strategi mitigasi. Eksperimen dirancang untuk menguji performa jaringan dalam berbagai kondisi terkendali, termasuk kondisi ruang bebas (*Free Space Loss*) [13], [45], kondisi terhalang sekat fisik (*Fresnel Zone Barrier*) [46], kondisi interferensi CCI dan ACI secara simultan. Untuk memastikan reproduksibilitas lingkungan pengujian, penelitian ini menetapkan spesifikasi perangkat keras, perangkat lunak komputer, dan kumpulan data pengukuran sebagai berikut:

Untuk memastikan reproduksibilitas lingkungan pengujian, penelitian ini menetapkan spesifikasi perangkat keras, perangkat lunak komputer, dan kumpulan data pengukuran sebagai berikut:

1. Laptop dengan spesifikasi prosesor AMD A9-9420 RADEON R5, 5 COMPUTE CORES 2C+3G × 1, Memory RAM 12 GB, penyimpanan *Hard Disk* 1 TB, dan kartu nirkabel AR9565 *Wireless Network Adapter*.
2. *Access Point* berbasis standar IEEE 802.11g/n/ac/ax, UniFi WiFi 4, UniFi WiFi 5, dan UniFi WiFi 6.
3. Sistem operasi Linux Mint 22.3 - Cinnamon 64-bit dan Windows 10 Pro 64-bit.
4. *NetSpot*, digunakan untuk melakukan *site survey*, memetakan kekuatan sinyal (RSSI), membuat visualisasi *heatmaps*, dan menganalisis tumpang tindih saluran.
5. *LinSSID*, digunakan untuk memantau saturasi saluran udara secara *real-time*, mengelompokkan radio berdasarkan ESSID, dan mengukur *noise* frekuensi dipadukan dengan WiFiman.
6. Wireshark, digunakan sebagai *packet sniffer* untuk menangkap lalu lintas data aktual pada tingkat *packet*, menganalisis kegagalan *decode*, mengukur retransmisi *packet*, dan memproyeksikan skor MOS-LQE.
7. *Iperf* dan *Axence NetTools*, digunakan untuk menguji *throughput*, mengukur variasi *delay*/latensi (*jitter*), dan menghitung persentase *packet loss*.



Gambar 3. Siklus Hidup Action Research

Siklus pengujian dijalankan melalui tahapan terstruktur yang mengadaptasi metode *action research* [19], sebagai berikut:

1. *Diagnosing*, melakukan pemetaan awal (*mapping*) dan *login* ke AP kampus. Peneliti melakukan pengukuran referensi pada jarak 8 meter dari AP dalam kondisi tanpa hambatan fisik (*Free Space*) dan kondisi terhalang dinding beton tebal (*Fresnel Zone Barrier*) untuk mendapatkan basis data kekuatan sinyal (RSSI) awal.
2. *Action Planning*, menyusun skenario gangguan spektrum. Skenario pertama menggunakan 1 AP utama yang melayani pengguna dan menambahkan secara bertahap hingga 3 AP pengganggu (*intruder APs*) pada kanal frekuensi yang sama untuk mengkondisikan CCI. Skenario kedua mengatur AP pada kanal frekuensi yang tumpang tindih (kanal 1 dan kanal 3) untuk memicu ACI.
3. *Action Taking*, menginisiasi *transfer* file uji coba standar sebesar 10.9 MB dan melakukan pengujian ping nirkabel dengan ukuran *packet data* yang bervariasi antara 50 *byte*-1500 *byte*. Pengukuran *log* aktivitas dilakukan selama durasi 1 jam pada jam sibuk dan jam sepi aktivitas kampus.
4. *Evaluating* dan *Learning*, data hasil pengumpulan kemudian diekspor ke *format* CSV dan PCAP untuk diolah menggunakan visualisasi grafis.
5. Selama prosedur pengujian, estimasi propagasi gelombang radio dalam ruangan dimodelkan berdasarkan persamaan redaman ruang bebas berikut:

$$P_{recv} = P_{tran} \left(\frac{c}{4\pi f} \right)^2 d^{-\alpha} \quad (7)$$

Di mana P_{recv} adalah daya terima (W), P_{tran} adalah daya pancar AP (W), c adalah kecepatan cahaya ($\approx 3 \times 10^8$ m/s), f adalah frekuensi gelombang pembawa (Hz), d adalah jarak geometris (m), dan α menyatakan eksponen rugi jalur propagasi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Kondisi Pengukuran Awal (*Baseline*) Tanpa Interferensi Terkendali

Sebelum skenario interferensi diterapkan, pengukuran awal dilakukan pada jarak 8 meter dari *Access Point* (AP) dalam 2 (dua) kondisi lingkungan, yaitu: (1) ruang terbuka tanpa hambatan fisik (*Free Space Loss*) dan (2) ruangan terhalang dinding beton tebal (*Fresnel Zone Barrier*). Pengukuran awal bertujuan untuk menyediakan titik acuan bagi seluruh skenario interferensi.

TABEL III
HASIL PENGUKURAN AWAL (BASELINE) KUALITAS SINYAL

Kondisi	RSSI (dBm)	Noise Floor (dBm)	SNR (dB)	Throughput (Mbps)	Delay (ms)	Jitter (ms)	Packet Loss (%)
<i>Free Space Loss</i>	-55	-92	26	74,70	12	9,13	0,0
<i>Fresnel Zone Barrier</i>	-68	-85	14	35,77	17	14,5	0,1

Perbedaan SNR sebesar 12 dB antara kedua kondisi tersebut secara langsung mencerminkan nilai redaman penetrasi material beton bertulang yang menurut Tabel 1 karakteristik material bangunan berada pada kisaran 12-18 dB pada pita 2.4 GHz. Temuan tersebut mengonfirmasi bahwa rintangan fisik merupakan faktor degradasi yang harus diukur sebelum menganalisis interferensi antar-AP. Penurunan *throughput* dari 74,70 Mbps menjadi 35,77 Mbps terjadi penurunan sebesar 52,1%, bahkan tanpa adanya interferensi saluran menunjukkan bahwa redaman material bangunan saja sudah cukup untuk menurunkan QoS secara signifikan. Pengamatan awal menjawab tujuan penelitian kedua, yaitu mengidentifikasi pengaruh karakteristik redaman penetrasi material arsitektur bangunan fisik kampus. Dinding beton bertulang terbukti menaikkan *noise floor* sebesar 7 dB, secara langsung menurunkan SNR dan kapasitas kanal.

2. Hasil Analisis Dampak *Co-Channel Interference* (CCI) terhadap Parameter QoS

Pada skenario CCI, AP pengganggu ditambahkan secara bertahap 1 sampai 3 AP pada kanal frekuensi yang sama kanal 6, pita 2.4 GHz dengan AP *baseline*. Pengukuran dilakukan pada kondisi ruang bebas untuk mengisolasi pengaruh interferensi dari faktor redaman material.

TABEL IV
HASIL PENGUKURAN THROUGHPUT PADA SKENARIO CCI

Jumlah AP pada Kanal Sama	Throughput (Mbps)	Penurunan	Utilisasi <i>Airtime</i> (%)
1 AP (<i>baseline</i>)	74,70	0%	85
2 AP (1 <i>intruder</i>)	38,21	48,8%	52
3 AP (2 <i>intruder</i>)	11,45	84,7%	28
4 AP (3 <i>intruder</i>)	2,84	96,2%	11

Penurunan *throughput* yang bersifat non-linear ($74,70 \rightarrow 38,21 \rightarrow 11,45 \rightarrow 2,84$ Mbps) mengindikasikan adanya efek eksponensial dari peningkatan jumlah AP pada kanal yang sama. Fenomena ini dijelaskan oleh mekanisme *Clear Channel Assessment* (CCA) pada protokol CSMA/CA. Setiap AP dan stasiun klien yang beroperasi pada kanal 6 saling mendeteksi *preamble* Wi-Fi melalui metode *signal detection* dengan ambang batas rendah sekitar -82 dBm untuk laju data tinggi, karena seluruh perangkat mendeteksi adanya transmisi dari perangkat lain, memperlakukan medium sebagai sibuk secara bergantian dan menunda transmisi dengan menghitung *backoff timer*. Menjelaskan mengapa utilisasi *airtime* turun drastis 11% ketika 4 AP berbagi kanal yang sama. *Contention Window* (CW) melipat ganda secara eksponensial setiap kali terjadi kegagalan transmisi *virtual*, karena medium selalu terdeteksi sibuk, sehingga setiap AP menghabiskan sebagian besar waktunya untuk menunggu, bukan mentransmisikan data aktual.

Untuk membuktikan bahwa penurunan *throughput* di lapangan bersesuaian dengan peningkatan waktu tunda antrean, dilakukan validasi silang menggunakan model antrean M/M/c. Dengan asumsi laju kedatangan paket (λ) sebesar 500 pps dan laju pelayanan (μ) sebesar 200 pps per AP, peningkatan jumlah *server* (c) dari 1 menjadi 4 pada kanal yang sama secara matematis memproyeksikan faktor utilisasi sistem (ρ) sebagai berikut:

- ρ (1 AP) = $\lambda / (c \times \mu) = 500 / (1 \times 200) = 2,5$ (sistem *overload*, namun CSMA/CA mengatur melalui *backoff*)
- ρ (4 AP) = $500 / (4 \times 200) = 0,625$

Meskipun ρ menurun secara matematis, dalam praktiknya *overhead* koordinasi antar-AP menyebabkan *queuing delay* aktual melonjak hingga lebih dari 500%, sesuai dengan prediksi model antrean M/M/c untuk

sistem dengan *contention* tinggi. CCI terbukti menurunkan *throughput* hingga 96,2% dari kapasitas maksimum, terutama disebabkan oleh waktu tunggu antrean yang memanjang (CCA *deferrals*) bukan oleh kerusakan data.

TABEL V
HASIL PENGUKURAN DELAY, JITTER, DAN PACKET LOSS PADA SKENARIO CCI

Jumlah AP pada Kanal Sama	Delay (ms)	Jitter (ms)	Packet Loss (%)
1 AP (<i>baseline</i>)	12	9,13	0,0
2 AP (1 <i>intruder</i>)	98	32,5	0,8
3 AP (2 <i>intruder</i>)	187	61,2	1,9
4 AP (3 <i>intruder</i>)	245	78,4	2,8

Peningkatan *delay* dari 12 ms menjadi 245 ms masih berada dalam kategori "sedang" menurut standar TIPPHON (300-450 ms), namun telah melampaui batas rekomendasi ITU-T G.114 untuk aplikasi *real-time* (150 ms satu arah). Hal ini berimplikasi bahwa layanan VoIP dan konferensi video interaktif di kampus akan mengalami penurunan kualitas subjektif (MOS-LQE) ketika lebih dari 2 AP berbagi kanal yang sama. Menariknya, *packet loss* pada skenario CCI relatif rendah maksimal 2,8%, bahkan ketika 4 AP aktif simultan. Hasil temuan sangat signifikan secara teoretis karena membuktikan bahwa CCI bukan penyebab tabrakan sinyal fisik. *Packet loss* yang terjadi 0,8% - 2,8% lebih disebabkan oleh *buffer overflow* pada antrean AP akibat lonjakan waktu tunggu, bukan oleh kegagalan *Cyclic Redundancy Check* (CRC) akibat rendahnya SINR. Nilai SINR pada skenario CCI masih berada pada kisaran 24 dB hanya turun 2 dB dari baseline 26 dB, karena sinyal interferensi adalah sinyal Wi-Fi yang valid, bukan *noise* acak. CCI pada dasarnya adalah masalah kepadatan jalur transmisi (*congestion*) yang dapat dimodelkan dengan teori antrean, bukan masalah kerusakan data fisik. Protokol CSMA/CA masih mampu mengelola akses medium secara kooperatif, meskipun dengan konsekuensi peningkatan latensi.

3. Analisis Dampak *Adjacent-Channel Interference* (ACI) terhadap Parameter QoS

Pada skenario ACI, AP utama dikonfigurasi pada kanal 1, sementara AP pengganggu ditempatkan pada kanal yang semakin dekat secara bertahap (kanal 5 → kanal 3 → kanal 2) untuk mengamati efek jarak kanal terhadap tingkat interferensi.

TABEL VI
HASIL PENGUKURAN THROUGHPUT DAN PACKET LOSS

Konfigurasi Kanal (Utama vs Pengganggu)	Jarak Kanal	Throughput (Mbps)	Packet Loss (%)	SINR (dB)
Baseline (tanpa pengganggu)	-	74,70	0,0	26
Kanal 1 vs 5	4 kanal	52,14	1,2	21
Kanal 1 vs 3	2 kanal	18,33	15,6	9
Kanal 1 vs 2	1 kanal	4,21	32,4	2

Terdapat lompatan destruktif yang sangat tajam ketika jarak kanal berkurang dari 4 kanal (1 vs 5) menjadi 2 kanal (1 vs 3). Pada jarak 4 kanal, *throughput* masih berada di angka 52,14 Mbps dengan *packet loss* hanya 1,2%, menunjukkan bahwa interferensi masih dapat ditoleransi. Namun, pada jarak 2 kanal, *throughput* anjlok menjadi 18,33 Mbps penurunan 64,8% dari kondisi *baseline*, sementara *packet loss* melonjak hingga 15,6%. Fenomena ini dijelaskan oleh konsep *spectral bleed-over*. Lebar kanal fisik IEEE 802.11g/n adalah 22 MHz, sementara jarak antar pusat kanal pada pita 2.4 GHz hanya 5 MHz. Akibatnya, energi dari pemancar pada kanal 3 meluber secara signifikan ke pita frekuensi kanal 1. Karena frekuensi tengah sinyal ACI bergeser dari frekuensi penerima (pusat kanal 1), modul *signal detection* gagal mengidentifikasi sinyal tersebut sebagai *preamble* Wi-Fi yang valid. Konsekuensi dari kegagalan deteksi ini sangat fatal, karena *signal detection* tidak mendeteksi adanya *preamble*, AP utama dan AP pengganggu menganggap medium dalam keadaan bersih tanpa memeriksa *energy detection* terlebih dahulu karena prioritas *signal detection* lebih rendah dan mentransmisikan data secara bersamaan. Hal ini memicu tabrakan sinyal secara fisik di udara, menyebabkan kerusakan integritas data pada tingkat bit. *Packet loss* sebesar 15,6% pada konfigurasi kanal 1 vs 3 mencerminkan tingginya tingkat kegagalan CRC pada sisi penerima. Penurunan SINR dari 26 dB (*baseline*) menjadi 9 dB (kanal 1 vs 3) dan 2 dB (kanal 1 vs 2) mengonfirmasi bahwa ACI secara fundamental berbeda dengan CCI. Nilai SINR di bawah 10 dB secara teoritis menyebabkan *Bit Error Rate* (BER) melebihi 10^{-3} , membuat *decode* data menjadi tidak mungkin dilakukan tanpa *Forward Error Correction* (FEC) yang sangat agresif.

4. Hasil Analisis Komparatif CCI vs ZCI pada Tingkat Interferensi yang Sebanding

Untuk membandingkan tingkat kerusakan relatif antara kedua jenis interferensi, penelitian ini menyamakan kondisi pengujian dengan 1 (satu) AP pengganggu aktif pada jarak geometris yang sama.

TABEL VI
HASIL KOMPARATIF CCI VS ACI

Parameter	CCI (1 AP, Kanal Sama)	ACI (1 AP, Kanal 1 vs 3)	ACI (1 AP, Kanal 1 vs 2)
Throughput (Mbps)	38,21	18,33	4,21
Packet Loss (%)	0,8	15,6	32,4
Delay (ms)	98	245	412
SINR (dB)	24	9	2

ACI 3-5 kali lebih destruktif dibandingkan CCI untuk parameter *throughput* dan *packet loss*. Pada tingkat interferensi yang sama (1 (satu) AP pengganggu), CCI "hanya" menurunkan *throughput* sebesar 48,8% dengan *packet loss* 0,8%. Sebaliknya, ACI (kanal 1 vs 3) menurunkan *throughput* sebesar 75,5% dengan *packet loss* 15,6%, sementara ACI dengan jarak kanal lebih dekat (kanal 1 vs 2) menyebabkan penurunan *throughput* hingga 94,4% dengan *packet loss* 32,4%. Perbedaan yang terjadi berasal pada perilaku protokol Lapisan MAC, berikut:

- Pada CCI *signal detection* berfungsi dengan baik. AP pengganggu terdeteksi sebagai sesama perangkat nirkabel, sehingga CSMA/CA mengaktifkan mekanisme *deferral*. Tidak ada tabrakan fisik, hanya antrian.
- Pada ACI *signal detection* gagal karena perbedaan frekuensi tengah. Energi interferensi hanya terbaca sebagai *noise floor* yang naik, karena tidak ada *deferral*, kedua AP mentransmisikan secara bersamaan mengakibatkan tabrakan tidak terhindarkan.

Dengan demikian membuktikan bahwa ACI memiliki dampak kerusakan yang secara signifikan lebih parah daripada CCI pada seluruh parameter QoS (*throughput*, *delay/latency*, *jitter*, dan *packet loss*). Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Park et al. bahwa ACI mampu memangkas *throughput* hingga 2 Mbps pada jaringan 802.11b, dan diperkuat dengan bukti temuan pada jaringan 802.11n/g.

5. Pengaruh Redaman Material Bangunan terhadap Interferensi Lintas-Ruangan

Pengukuran dilakukan pada 5 (lima) skenario material arsitektur yang umum ditemukan di gedung KUB. Nilai redaman dihitung sebagai selisih kekuatan sinyal yang diukur pada jarak 1 meter dari AP (referensi) dan kekuatan sinyal setelah melewati material pada jarak yang sama di sisi lain.

TABEL VII
HASIL PENGUKURAN REDAMAN

Jenis Material	Redaman @ 2.4 GHz (dB)	Redaman @ 5 GHz (dB)	Dampak terhadap CCI Lintas-Ruangan
Kaca Jendela Standar	1,8	2,5	Sangat tinggi (sinyal bocor keluar ruangan)
Pintu Kayu	3,5	5,8	Sedang (cakupan sekunder terbentuk)
Dinding Bata Merah	8,7	13,2	Rendah (isolasi antar ruang efektif)
Beton Bertulang	15,3	28,6	Sangat rendah (zona mati, perlu AP mandiri)
Lembaran Logam	35,1	48,3	Nihil (sinyal terblokir total)

Temuan penting muncul dari pengukuran yang sudah dilakukan. Redaman pada pita 5 GHz secara konsisten lebih tinggi daripada pita 2.4 GHz untuk semua jenis material, dengan selisih berkisar antara 30% hingga 87%. Hal ini menjelaskan mengapa pita 5 GHz memiliki jangkauan yang lebih pendek, sekaligus menjadi keuntungan karena mengurangi potensi CCI lintas-ruangan. Material dengan redaman rendah (kaca jendela, pintu kayu) justru menjadi sumber masalah karena memungkinkan sinyal dari AP dalam ruangan bocor ke luar dan berinterferensi dengan AP di ruangan lain. Rekomendasi yang dapat ditarik, bahwa untuk area dengan sekat kaca dan kayu membutuhkan pengurangan daya pancar, sementara area dengan dinding beton bertulang membutuhkan penempatan AP mandiri di setiap ruangan untuk menghindari zona mati (*dead zones*).

6. Evaluasi Efektivitas Strategi Mitigasi Interferensi

Setelah seluruh pengukuran interferensi dalam kondisi "terburuk" 4 AP pada kanal sama untuk CCI dan kanal 1 vs 2 untuk ACI selesai dilakukan, penelitian ini menerapkan serangkaian strategi mitigasi berdasarkan prinsip rekayasa spektrum. Evaluasi efektivitas dilakukan dengan membandingkan parameter QoS sebelum dan sesudah mitigasi.

Dalam penerapan kanal *ortogonal* dan pembatasan lebar kanal pada jaringan nirkabel, strategi yang digunakan difokuskan pada peningkatan stabilitas serta mengurangi potensi interferensi antar perangkat. Pada pita frekuensi 2.4 GHz, konfigurasi kanal AP dikunci hanya pada kanal 1, 6, dan 11. Pemilihan kanal ini bukan tanpa alasan, karena ketiganya merupakan kanal *ortogonal* yang tidak saling tumpang tindih sehingga mampu meminimalisasi gangguan sinyal antar perangkat yang beroperasi pada frekuensi yang sama. Selain itu, lebar kanal dibatasi hanya pada 20 MHz dengan menonaktifkan opsi *channel bonding* 40 MHz. Pembatasan ini

bertujuan untuk menjaga kualitas koneksi agar tetap stabil, mengurangi kemungkinan terjadinya interferensi dan memastikan distribusi spektrum frekuensi lebih efisien. Dengan strategi tersebut, jaringan nirkabel dapat beroperasi lebih optimal, memberikan pengalaman koneksi yang lebih konsisten bagi pengguna, terutama di lingkungan dengan kepadatan perangkat yang tinggi.

TABEL IX
HASIL EVALUASI PADA LOKASI MENGALAMI ACI KANAL 1 VS 3

Parameter	Sebelum Mitigasi (ACI)	Sesudah Mitigasi (Kanal Ortogonal)	Perbaikan
Throughput (Mbps)	18,33	68,90	+276%
Packet Loss (%)	15,6	0,2	-98,7%
Delay (ms)	245	28	-88,6%

Eliminasi ACI terjadi karena kanal 1, 6, dan 11 bersifat *non-overlapping*. Jarak antar pusat kanal adalah 25 MHz (kanal 1 ke 6) dan 25 MHz (kanal 6 ke 11), melebihi lebar kanal fisik 22 MHz. Dengan demikian, tidak ada *spectral bleed-over* dari 1 (satu) kanal ke kanal lainnya. Pemulihan *throughput* hingga 68,90 Mbps 92% dari kapasitas *baseline* 74,70 Mbps, menunjukkan bahwa hampir seluruh dampak negatif ACI dapat dihilangkan dengan konfigurasi kanal yang benar.

7. Optimisasi Daya Pancar (*Transmit Power Control*)

Dalam upaya mengoptimalkan daya pancar AP, strategi yang diterapkan berfokus pada pengendalian *transmit power* agar cakupan sinyal tetap efisien sekaligus mengurangi potensi interferensi antar sel. Daya pancar AP yang semula berada pada level maksimum, yaitu 20 dBm, diturunkan secara terukur menjadi 11 dBm pada pita 5 GHz dan 8 dBm pada pita 2.4 GHz. Penurunan ini dilakukan untuk menyeimbangkan antara jangkauan sinyal dan kualitas koneksi, sehingga tidak terjadi tumpang tindih cakupan yang berlebihan. Selain itu, proses kalibrasi daya dilakukan hingga mencapai target RSSI -67 dBm pada tepi cakupan sel. Target ini dipilih sebagai standar kualitas sinyal yang cukup kuat untuk mendukung konektivitas stabil, namun tetap menjaga efisiensi penggunaan spektrum. Dengan strategi ini, jaringan nirkabel dapat memberikan pengalaman yang lebih konsisten bagi pengguna, sekaligus mengurangi risiko interferensi antar perangkat di area yang padat.

TABEL X
HASIL EVALUASI OPTIMISASI DAYA PANCAR PADA AREA DENGAN DENSITAS AP TINGGI DAN CCI BERAT

Parameter	Sebelum Optimisasi Daya (4 AP kanal 6)	Sesudah Optimisasi Daya (4 AP, daya diturunkan)	Perbaikan
Throughput (Mbps)	2,84	52,30	+1742%
Wilayah Tumpang Tindih Antar-AP	45%	18%	-60%
CCA Deferrals (per detik)	12.450	3.210	-74,2%

Fitur *BSS Coloring* memungkinkan AP untuk "mengabaikan" transmisi dari sel tetangga yang memiliki warna BSS berbeda, selama kekuatan sinyal berada di bawah ambang batas *OBSS Packet Detect* yang dinaikkan secara logis. Sangat efektif mengubah perilaku CCI dari sebelumnya semua transmisi pada kanal yang sama memicu *deferral*, menjadi hanya transmisi dari sel sendiri yang memicu *deferral*. Sementara itu, penonaktifan laju data lambat memaksa klien dengan sinyal buruk (SNR < 10 dB) untuk segera *roaming* ke AP terdekat atau melepaskan koneksi, sehingga mengurangi beban antrean pada AP yang kelebihan kapasitas.

8. Aktivasi Fitur *BSS Coloring* dan Penonaktifan *Legacy Data Rates*

Strategi penguatan jaringan nirkabel pada AP berbasis Wi-Fi 6 dilakukan melalui dua tahapan. Tahap pertama aktivasi *BSS Coloring*, sebuah mekanisme yang memungkinkan AP mengenali dan mengabaikan transmisi dari jaringan tetangga agar tidak terjadi tumpang tindih sinyal. Selanjutnya, melakukan pembersihan *overhead* jaringan nirkabel dengan menonaktifkan laju data dasar yang rendah di bawah 12 Mbps, bertujuan untuk membatasi *legacy data rates* yang lambat, sehingga kanal komunikasi tetap terjaga agar hanya melayani trafik dengan efisiensi tinggi.

TABEL XI
HASIL EVALUASI AKTIVASI FITUR BSS COLORING DAN PENONAKTIFAN LEGACY DATA RATES

Parameter	Sebelum Aktivasi	Sesudah Aktivasi	Perbaikan
CCA Deferrals karena sel tetangga	8.340 per detik	3.210 per detik	-61,5%
Klien <i>sticky</i> dengan SNR buruk	12 klien	2 klien	-83,3%
Throughput rata-rata (area padat)	11,45 Mbps	58,70 Mbps	+412%

Fitur *BSS Coloring* memungkinkan AP untuk "mengabaikan" transmisi dari sel tetangga yang memiliki warna BSS berbeda, selama kekuatan sinyal berada di bawah ambang batas *OBSS Packet Detect* yang dinaikkan secara logis. Sangat efektif mengubah perilaku CCI dari sebelumnya semua transmisi pada kanal yang sama memicu *deferral*, menjadi hanya transmisi dari sel sendiri yang memicu *deferral*. Sementara itu, penonaktifan

laju data lambat memaksa klien dengan sinyal buruk ($\text{SNR} < 10 \text{ dB}$) untuk segera *roaming* ke AP terdekat atau melepaskan koneksi, sehingga mengurangi beban antrean pada AP yang kelebihan kapasitas.

9. Pembahasan

Implementasi kombinasi kanal ortogonal, optimisasi daya, BSS *Coloring*, dan penonaktifan laju data lambat terbukti sangat efektif dalam memulihkan *Quality of Service* (QoS) mendekati kondisi *baseline*. Secara kuantitatif, mitigasi ini berhasil meningkatkan *throughput* secara signifikan dari 2,84 Mbps dalam kondisi interferensi parah, menjadi 68–74 Mbps setelah langkah mitigasi diterapkan. Berdasarkan rangkaian pengujian tersebut, terdapat beberapa temuan pada penelitian ini, yaitu ACI terbukti 3–5 kali lebih merusak dibandingkan CCI. ACI mengelabui mekanisme *carrier sensing*, mengakibatkan tabrakan sinyal fisik dan lonjakan *packet loss*. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Fathinuddin et al. [41] yang menemukan bahwa kesalahan konfigurasi kanal merupakan penyebab interferensi di lingkungan kampus. Namun, masih bersifat umum dan belum membedakan secara kuantitatif dampak CCI dan ACI. Maka penelitian ini memperluas temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa ACI memiliki tingkat destruktivitas 3-5 kali lebih tinggi dibandingkan CCI pada parameter *packet loss* dan SINR. Selanjutnya, penelitian Lee, Kim, & Kwak [20] telah menganalisis secara mendalam *error* akibat CCI pada lapisan data link dan TCP, namun penelitian tersebut masih terbatas pada lingkungan luar ruangan dan belum membandingkan dengan ACI. Penelitian ini menemukan bahwa ACI menyebabkan tabrakan sinyal fisik karena kegagalan mekanisme *signal detection* pada protokol CSMA/CA, sementara CCI hanya memicu penundaan transmisi (CCA *deferrals*) tanpa menyebabkan kerusakan data fisik.

Pada penelitian Tiffany et al. [44] melaporkan *packet loss* sebesar 0% pada jaringan kampus dengan metode observasi menggunakan *Wireshark*. Namun, tidak mengidentifikasi sumber interferensi, maka penelitian ini melengkapi temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa *packet loss* dapat melonjak sampai 32,4% ketika terjadi ACI pada jarak kanal 1 (kanal 1 vs 2), mengindikasikan bahwa pengukuran QoS tanpa analisis sumber interferensi berpotensi memberikan gambaran yang tidak lengkap.

Penelitian yang dilakukan oleh Putra et al. [42] mengindikasikan adanya *deadspot* (zona mati) dan interferensi pada gedung bertingkat, akibat cakupan AP yang tidak merata. Pada penelitian ini menambahkan dimensi baru dengan menunjukkan bahwa material bangunan dengan redaman rendah seperti kaca dan kayu (redaman 1-2 dB) dapat memperburuk interferensi lintas-ruangan karena membocorkan sinyal keluar ruangan, sementara dinding beton bertulang dengan redaman tinggi (redaman 12-18 dB) menguntungkan untuk isolasi sel nirkabel. Temuan tersebut memberikan pertimbangan tambahan dalam perencanaan tata letak AP.

Pada penelitian Muliadi et al. [43] merekomendasikan penataan ulang posisi AP dan peningkatan teknologi dual-band sebagai solusi untuk mengatasi interferensi. Maka, penelitian ini memperkuat rekomendasi Muliadi et al. [43] dengan memberikan bukti kombinasi kanal ortogonal (kanal 1, 6, 11), optimisasi daya pancar (target RSSI -67 dBm), dan aktivasi BSS *Coloring* mampu memulihkan *throughput* sampai 96% dari kondisi *baseline*, bahkan di tengah skenario interferensi terburuk.

Berdasarkan temuan yang didapatkan, rekomendasi yang dapat diterapkan untuk mengoptimalkan kinerja jaringan nirkabel di lingkungan kampus, yaitu prioritas harus diberikan pada eliminasi ACI. Langkah paling efektif dan efisien yang dapat dilakukan adalah penguncian manual pada kanal 1, 6, dan 11 dengan lebar pita 20 MHz pada frekuensi 2,4 GHz. Sangat disarankan untuk menonaktifkan fitur pemilihan kanal otomatis pada AP, mengingat sistem otomatis tersebut cenderung memilih kanal *intermediate* (2, 3, 4, 7, 8, atau 9) yang justru menjadi pemicu ACI. Paradigma pengelolaan daya perlu diubah dari prinsip maksimalisasi menjadi optimalisasi. Menjaga daya pancar AP pada level maksimum (20 dBm) terbukti kontraproduktif karena memperluas wilayah tumpang tindih sinyal yang kemudian memperparah CCI. Sebagai alternatif, penurunan daya pancar hingga mencapai target *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) sebesar -67 dBm pada batas tepi sel terbukti mampu meningkatkan kapasitas jaringan secara keseluruhan. Akselerasi migrasi spektrum ke pita 5 GHz dan 6 GHz menjadi langkah penting untuk mengatasi kepadatan trafik. Dengan ketersediaan hingga 23 kanal *non-overlapping* pada pita 5 GHz, densitas AP yang tinggi dapat diakomodasi tanpa menimbulkan interferensi yang berarti. Selain itu, implementasi fitur *band steering* menjadi kewajiban untuk memaksa klien *dual-band* berpindah ke pita frekuensi yang lebih luas, sehingga beban trafik pada pita 2,4 GHz dapat diminimalisir secara signifikan.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa *Adjacent-Channel Interference* (ACI) memiliki dampak destruktif 3–5 kali lebih parah dibandingkan *Co-Channel Interference* (CCI) terhadap kualitas layanan jaringan nirkabel di lingkungan Kampus Utama Bandung, ditandai dengan lonjakan *packet loss* hingga 32,4% dan penurunan SINR hingga 2 dB akibat kegagalan mekanisme *Signal Detection* pada protokol CSMA/CA, sementara CCI justru hanya memperpanjang waktu tunggu antrean tanpa menyebabkan tabrakan sinyal fisik. Temuan ini menjawab tujuan penelitian pertama dan kedua dengan mengungkap bahwa material bangunan dengan redaman rendah seperti kaca dan kayu memperburuk interferensi lintas-ruangan, sedangkan dinding beton bertulang (redaman 12–18 dB) justru menguntungkan untuk isolasi sel nirkabel meskipun menciptakan zona mati (*dead zones*). Kebaruan ilmiah penelitian ini terletak pada kerangka analisis yang

memadukan pemodelan perilaku lapisan MAC/PHY dengan audit QoS yang melahirkan panduan teknis rekayasa spektrum, meliputi penguncian kanal ortogonal (1,6,11), pembatasan daya pancar target RSSI -67 dBm, aktivasi BSS Coloring, dan penonaktifan laju data di bawah 12 Mbps, secara kolektif terbukti memulihkan *throughput* dari 2,84 Mbps menjadi 68–74 Mbps peningkatan hingga 96% dari kondisi interferensi terburuk. Prioritas bagi pengelola jaringan nirkabel kampus untuk menghapus ACI melalui konfigurasi kanal manual, menurunkan daya pancar, dan mengakselerasi migrasi ke pita 5/6 GHz guna menciptakan efisiensi *airtime* maksimal di lingkungan kampus berdensitas tinggi.

REFERENSI

- [1] E. G. Villegas, E. López-Aguilera, R. Vidal, and J. Paradells, "Effect of adjacent-channel interference in IEEE 802.11 WLANs," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, CrownCom*, 2007, pp. 118–125. doi: 10.1109/CROWNCOM.2007.4549783.
- [2] N. I. Sarkar and E. Lo, "Indoor Propagation Measurements for Performance Evaluation of IEEE 802.11g," in *2008 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference*, IEEE, Dec. 2008, pp. 163–168. doi: 10.1109/ATNAC.2008.4783316.
- [3] D. Hu and S. Mao, "On co-channel and adjacent channel interference mitigation in cognitive radio networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 5, pp. 1629–1640, 2013, doi: 10.1016/j.adhoc.2013.02.009.
- [4] A. Moriuchi *et al.*, "Measurement study of adjacent channel interference in mobile WLANs," in *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, IEEE, Jun. 2013, pp. 566–570. doi: 10.1109/ICCW.2013.6649297.
- [5] A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2461602.
- [6] Cisco, "Radio Resource Management White Paper," Cisco, no. 6387, 2016, [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/technotes/8-3/b_RRM_White_Paper.pdf
- [7] J. Zhang, G. Han, and Y. Qian, "Queueing Theory Based Co-Channel Interference Analysis Approach for High-Density Wireless Local Area Networks," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1348, Aug. 2016, doi: 10.3390/s16091348.
- [8] Ł. Chruszczyk, A. Zając, and D. Grzechca, "Comparison of 2.4 and 5 GHz WLAN Network for Purpose of Indoor and Outdoor Location," *Int. J. Electron. Telecommun.*, vol. 62, no. 1, pp. 71–79, Mar. 2016, doi: 10.1515/eletel-2016-0010.
- [9] I. Dolinska, M. Jakubowski, and A. Masiukiewicz, "Interference comparison in Wi-Fi 2.4 GHz and 5 GHz bands," in *2017 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*, IEEE, Jul. 2017, pp. 106–112. doi: 10.1109/DT.2017.8024280.
- [10] L. Yen, A. B. Adege, H.-P. Lin, C.-H. Ho, and K. Lever, "Deep learning approach on channel selection strategy for minimizing co-channel interference in unlicensed channels," *Microelectron. Reliab.*, vol. 105, p. 113558, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.113558>.
- [11] A. A. 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," *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 9, no. 5, pp. 2097–2108, Oct. 2020, doi: 10.11591/eei.v9i5.2251.
- [12] I. Forenbacher, S. Husnjak, and I. Jovovi, "of Wireless Audio Transmission : A Laboratory Analysis," 2021.
- [13] Z. Cordoba, R. Rana, G. Rendon, J. Thunell, and A. Elleithy, "Wifi Transmit Power and Its Effect on Co-Channel Interference," *Int. J. Comput. Networks Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–17, 2021, doi: 10.5121/ijcnc.2021.13101.
- [14] D. Chen *et al.*, "Coexistence and Interference Mitigation for WPANs and WLANs From Traditional Approaches to Deep Learning: A Review," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 22, pp. 25561–25589, Nov. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3117399.
- [15] H. Kavousi Ghafi, C. Spindelberger, and H. Arthaber, "Modeling of co-channel interference in bluetooth low energy based on measurement data," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2021, no. 1, p. 143, Dec. 2021, doi: 10.1186/s13638-021-02005-2.
- [16] K. Bechta, J. M. Kelner, C. Ziolkowski, and L. Nowosielski, "Inter-Beam Co-Channel Downlink and Uplink Interference for 5G New Radio in mm-Wave Bands," *Sensors*, vol. 21, no. 3, p. 793, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21030793.
- [17] F. Soares and Eko Tjipto Rahardjo, "Development of a Wearable Wide band Antenna in the Frequency Range of 2.4 GHz and 5.2 GHz," *Int. J. Electr. Comput. Biomed. Eng.*, vol. 2, no. 3, Sep. 2024, doi: 10.62146/ijecbe.v2i3.51.
- [18] A. A. Eltholth, "Improved Spectrum Coexistence in 2.4 GHz ISM Band Using Optimized Chaotic Frequency Hopping for Wi-Fi and Bluetooth Signals," *Sensors*, vol. 23, no. 11, p. 5183, May 2023, doi: 10.3390/s23115183.
- [19] R. Hamin and R. Albar, "ANALISIS INTERFERENSI CO-CHANNEL PADA KINERJA SINYAL YANG DIPANCARKAN ACCESS POINT WIRELESS FIDELITY (Wi-Fi) MENGGUNAKAN METODE QOS," *J. Informatics Comput. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 79–89, 2024, doi: 10.33143/jics.v10i1.3906.
- [20] J.-L. Lee, J. Kim, and M. Kwak, "Performance Evaluation of Co-Channel Interference on Wireless Networks," *J. Comput. Inf. Syst.*, vol. 63, no. 6, pp. 1301–1315, Nov. 2023, doi: 10.1080/08874417.2022.2148142.
- [21] A. A. Rabbany, R. Munadi, S. Syahrial, E. D. Meutia, B. Devanda, and A. Bahri, "ANALISIS PENGARUH CO-CHANNEL INTERFERENCE TERHADAP KUALITAS WI-FI PADA FREKUENSI 2,4 GHZ," *J. Komputer, Inf. Teknol. dan Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 31–35, Aug. 2021, doi: 10.24815/kitektro.v6i2.22127.
- [22] T.-A. Nguyen, H.-V. Nguyen, D.-T. Do, and B. M. Lee, "Impacts of Co-Channel Interference on Performance of Downlink IRS-NOMA Systems," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 61860–61876, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3395301.
- [23] J. Xiao, Z. Chen, X. Sun, W. Zhan, X. Wang, and X. Chen, "Online Multi-Agent Reinforcement Learning for Multiple Access in Wireless Networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 12, pp. 3250–3254, Dec. 2023, doi: 10.1109/LCOMM.2023.3326267.
- [24] E. Egea-Lopez and P. Pavon-Mariño, "Adjacent Channel Interference and Congestion Control for Multi-Channel Operation in Vehicular Networks," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 26, no. 5, pp. 6661–6674, May 2025, doi: 10.1109/TITS.2025.3527654.
- [25] H. Fu, X. Wang, X. Zhang, A. Saleem, and G. Zheng, "Analysis of LTE-M Adjacent Channel Interference in Rail Transit," *Sensors*, vol. 22, no. 10, p. 3876, May 2022, doi: 10.3390/s22103876.
- [26] H. Nguyen and Y. L. Guan, "DSRC Performance Under the Adjacent Channel Interference of Cellular-Based V2X at 5.9GHz Band," in *2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring)*, IEEE, Jun. 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTC2024-Spring62846.2024.10683448.
- [27] X. Huo, W. Zhang, W. Guo, C. Li, H. Zhao, and Y. Liu, "Adjacent Channel Interference Suppression to Enhance Spectrum Sharing for Co-located Devices," in *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, IEEE, Jun. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473834.
- [28] M. H. Yılmaz, "Adjacent Channel Interference Analysis From U-NII-4 and U-NII-5 Devices Into 5G NR V2X Devices," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 30, pp. 1031–1035, 2026, doi: 10.1109/LCOMM.2026.3660155.
- [29] M. I. Rochman, V. Sathya, B. Payne, M. Yavuz, and M. Ghosh, "A Measurement Study of the Impact of Adjacent Channel Interference between C-band and CBRS," in *2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, IEEE, Sep. 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/PIMRC56721.2023.10294066.
- [30] Z. H. Hong *et al.*, "Cancelling Adjacent Channel Interference for In-Band Full-Duplex Communications," in *2024 IEEE International Symposium*

- on *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, IEEE, Jun. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/BMSB62888.2024.10608208.
- [31] T. Kobbaey, R. Hamzaoui, S. Ahmad, M. Al-Fayoumi, and N. Thomos, "Enhanced collision resolution and throughput analysis for the 802.11 distributed coordination function," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 34, no. 16, Nov. 2021, doi: 10.1002/dac.4953.
 - [32] M. Ş. Kuran *et al.*, "MDU-CACS: A Coordinated Forecasting-Based Cloud-Assisted Dynamic Channel Assignment Mechanism for Wi-Fi Network Clusters," *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.*, vol. 21, no. 4, pp. 3659–3680, Aug. 2024, doi: 10.1109/TNSM.2024.3412670.
 - [33] S. Kumar, V. K. Maurya, V. Putta, and S. Ungati, "Implementing High-Availability WLAN Controllers for Enhanced Security and Radio Monitoring," in *2025 IEEE Symposium on Wireless Technology & Applications (ISWTA)*, IEEE, Dec. 2025, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISWTA68114.2025.11330063.
 - [34] J. Chen, J. Wang, J. Wang, and L. Bai, "Joint Fairness and Efficiency Optimization for CSMA/CA-Based Multi-User MIMO UAV Ad Hoc Networks," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 18, no. 7, pp. 1311–1323, Oct. 2024, doi: 10.1109/JSTSP.2024.3435348.
 - [35] B. Dağtaş and İ. H. Cedimoğlu, "Performance Analysis and Optimization of Enterprise Wireless Networks Based on 802.11ax Technology," *Sak. Univ. J. Comput. Inf. Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 171–183, Jun. 2025, doi: 10.35377/saucis...1592312.
 - [36] A. K. Saleh, H. Peni, A. Tjahyaningtjas, and L. Rakhmawati, "Quality of Service (QoS) Comparative Analysis of Wireless Network," *Indones. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 30–37, 2022, doi: 10.26740/inajee.v5n2.p30-37.
 - [37] A. Tusha and H. Arslan, "Interference Burden in Wireless Communications: A Comprehensive Survey From PHY Layer Perspective," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 27, no. 4, pp. 2204–2246, Aug. 2025, doi: 10.1109/COMST.2024.3487068.
 - [38] X. Huo, W. Guo, Y. Liu, H. Zhao, and Y. Tang, "Adjacent channel interference suppression based on spectral extrapolation to enhance electromagnetic compatibility of co-site radio devices," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 33, no. 5, May 2022, doi: 10.1002/ett.4447.
 - [39] R. Caceres, A. Clark, and T. Friedman, "IETF RFC 3611 - RTP Control Protocol Extended Reports (RTCP XR)," RFC Editor, Nov. 2003. doi: 10.17487/RFC3611.
 - [40] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, "IETF RFC 3550 - RTP: A transport protocol for real-time applications," 2003. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc3550>
 - [41] M. Fathinuddin, U. Y. K. S. Hediyanto, A. M. Rompas, and M. H. Mikhail, "Optimizing Wireless Network based on Building Design in Telkom University," *J. Rekayasa Sist. Ind.*, vol. 10, no. 01, p. 54, Jun. 2023, doi: 10.25124/jrsi.v10i01.614.
 - [42] A. F. Y. Putra, U. A. Ahmad, and A. Arjunaldi, "Cakupan Perencanaan Jaringan Nirkabel Pada Telkom University Landmark Tower (TULT)," in *e-Proceeding of Engineering*, Bandung: Telkom University, 2025, pp. 4807–4816.
 - [43] Muliadi, F. Yusuf, M. Reyhansyah, D. Armeylia, A. S. Shadira, and N. Fadly, "Analisis Jaringan Enterprise di SMK Handayani Makassar," *J. Comput. Informatics, Vocat. Educ.*, vol. 2, no. 3, pp. 31–35, 2025, [Online]. Available: <https://journal.unm.ac.id/index.php/CIVE/article/view/10932>
 - [44] N. Tiffany, Nicko Wahyudi, Atik Charisma, Hajjar Yuliana, Sofyan Basuki, and Ade Sena Permana, "The ANALISIS PARAMETER QOS (QUALITY OF SERVICE) PADA JARINGAN WIFI DI GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI DENGAN MENGGUNAKAN WIRESHARK," *Epsil. J. Electr. Eng. Inf. Technol.*, vol. 23, no. 2, pp. 137–145, Feb. 2026, doi: 10.55893/e6py7a65.
 - [45] Y. Zhang, X. Pi, and M. Xie, "Channel Modeling and Interference Analysis in IEEE 802.11a Wireless Communication Systems," *J. Netw. Netw. Appl.*, vol. 4, no. 4, pp. 178–189, 2024.
 - [46] Z. Ren *et al.*, "Characterizing the Through-Wall Sensing Mechanism of Wi-Fi Signals With a Refraction-Aware Fresnel Zone Model," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 23, no. 12, pp. 13438–13454, Dec. 2024, doi: 10.1109/TMC.2024.3425847.