

Comparative Analysis of Two-Ray and COST-231 Propagation Models on Point-to-Point Wireless System BER Performance

Nurhadi Ramadhan^{1*}, Endah Setyowati^{2*}

* Department of Telecommunication System, Universitas Pendidikan Indonesia
nurhadiramadhan@upi.edu¹, endahsetyowati@upi.edu²

Article Info

Article history:

Received 2026-02-19
Revised 2026-03-05
Accepted 2026-04-10

Keyword:

Bit Error Rate,
COST-231,
OFDM,
Two-Ray Model,
Wireless Propagation.

ABSTRACT

This study presents a simulation-based comparative analysis of Two-Ray Ground Reflection and COST-231 Hata propagation models on Bit Error Rate (BER) performance in point-to-point OFDM wireless systems. Evaluation is conducted in a semi-urban campus environment at Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) Purwakarta over 500 m at 1.8 GHz, representing mixed Line-of-Sight/Non-Line-of-Sight conditions with vegetation and building obstacles. The system employs 16-QAM OFDM with 256 subcarriers, a 64-sample cyclic prefix, and Zero-Forcing equalization. Two-Ray integrates zone-specific attenuation (60 dB vegetation, 4.5 dB knife-edge diffraction, 2 dB scattering) yielding 147.4 dB path loss, while COST-231 with flat Rayleigh fading predicts 129.2 dB—an 18.2 dB difference equivalent to 66-fold power ratio. BER performance is assessed through Monte Carlo simulation framework. Despite substantial path loss disparity, both models achieve target BER of 10^{-6} at nearly identical SNR thresholds: 18.5687 dB (Two-Ray) versus 18.5271 dB (COST-231), corresponding to 0.0416 dB marginal difference. Results demonstrate that while BER performance remains equivalent with proper OFDM equalization and adequate cyclic prefix, propagation model choice critically impacts link budget planning. COST-231 offers 18.2 dB lower power requirements for suburban deployments, making it more suitable for practical network planning despite equivalent BER performance. This research provides an integrative framework connecting large-scale propagation modeling with system-level BER evaluation, offering practical guidance for model selection in semi-urban point-to-point deployments.



This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

I. PENDAHULUAN

Performa sistem komunikasi nirkabel sangat ditentukan oleh karakteristik kanal propagasi yang memengaruhi distribusi daya sinyal pada sisi penerima. Dalam sistem komunikasi digital, kualitas transmisi secara kuantitatif direpresentasikan melalui *Bit Error Rate* (BER), yaitu rasio jumlah bit yang diterima secara salah terhadap total bit yang dikirimkan. BER menjadi indikator utama reliabilitas sistem karena berkaitan langsung dengan integritas data, efisiensi spektral, serta efisiensi daya transmisi. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa BER merupakan fungsi eksplisit dari *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), sehingga akurasi estimasi SNR menjadi faktor krusial dalam evaluasi performa komunikasi digital [1], [2], [3]. Dengan demikian, setiap deviasi dalam

estimasi daya terima akibat ketidakterukuran model propagasi akan berimplikasi langsung terhadap validitas prediksi nilai BER.

Dalam sistem komunikasi nirkabel, pelemahan daya sinyal (*path loss*) akibat faktor jarak, frekuensi operasi, tinggi antena, serta kondisi lingkungan merupakan komponen dominan dalam analisis propagasi skala besar. *Path loss* menjadi fondasi utama dalam perhitungan daya terima dan estimasi SNR pada sisi penerima. Oleh karena itu, berbagai model propagasi telah dikembangkan untuk memprediksi rugi-rugi lintasan pada berbagai kondisi lingkungan. Model empiris seperti Okumura-Hata dan pengembangannya, COST-231, banyak digunakan dalam perencanaan jaringan seluler pada lingkungan urban dan semi-urban karena kemudahan implementasi dan validitas statistiknya terhadap

hasil pengukuran lapangan [4], [5], [6]. Evaluasi model tersebut umumnya difokuskan pada akurasi prediksi *path loss* melalui perbandingan data lapangan menggunakan metrik seperti *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Mean Percentage Error*.

Sebagai alternatif dari model empiris yang bersifat statistik, pendekatan berbasis fisika juga dikembangkan untuk merepresentasikan mekanisme propagasi gelombang elektromagnetik secara deterministik. Model *Two-Ray Ground Reflection* mempertimbangkan kontribusi lintasan langsung (*line-of-sight*) dan lintasan pantulan permukaan tanah, sehingga mampu menggambarkan fenomena interferensi konstruktif dan destruktif pada jarak tertentu secara geometris. Model ini relevan untuk skenario *point-to-point* jarak menengah dengan kondisi lingkungan relatif terbuka dan konfigurasi antena yang terdefinisi secara presisi [7]. Pada kondisi tertentu, terutama ketika tinggi antena dan geometri sistem memainkan peran signifikan, model *Two-Ray* dilaporkan memberikan estimasi yang lebih representatif dibandingkan model empiris murni.

Perkembangan sistem komunikasi modern seperti 4G, 5G, serta aplikasi IoT semakin menuntut penggunaan teknik modulasi *multicarrier* seperti *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) yang memiliki efisiensi spektral tinggi dan ketahanan terhadap *multipath* [8], [9], [10]. Dalam sistem OFDM, spektrum dibagi menjadi sejumlah *subcarrier* ortogonal sehingga performa BER dipengaruhi oleh kondisi kanal dan nilai SNR pada masing-masing *subcarrier*. Modulasi 16-QAM, yang menjadi standar umum dalam sistem OFDM, memiliki sensitivitas tinggi terhadap *noise*, sehingga memerlukan estimasi SNR yang sangat akurat untuk mempertahankan target BER agar tetap berada dalam batas toleransi layanan [11], [12].

Sebagian besar penelitian performa sistem komunikasi berbasis OFDM menganalisis BER dengan asumsi model kanal statistik seperti Rayleigh, Nakagami, atau *shadowed fading*, serta mengkaji teknik peningkatan performa seperti *relaying* dan *reconfigurable intelligent surface* (RIS) [13], [14], [15]. Meskipun pendekatan tersebut berfokus pada *small-scale fading* dan distribusi statistik kanal, namun tidak secara eksplisit mengaitkan perbedaan model propagasi *large-scale* terhadap kebutuhan SNR untuk mencapai target BER tertentu pada skenario *point-to-point* jarak menengah [16].

Selain itu, beberapa penelitian menyoroti pentingnya konsistensi definisi dan perhitungan SNR dalam evaluasi performa sistem, menunjukkan bahwa variasi dalam metode kuantifikasi dapat menghasilkan interpretasi performa yang berbeda [17], [18], [19], [20]. Hal ini mempertegas bahwa analisis BER harus dilakukan dengan pendekatan yang konsisten dan berbasis model kanal yang jelas, terutama ketika digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam perencanaan sistem.

Berdasarkan telaah literatur tersebut, diidentifikasi adanya kesenjangan penelitian pada aspek integratif antara pemodelan propagasi skala besar dan evaluasi performa BER

sistem OFDM. Sebagian besar studi membandingkan model propagasi sebatas pada akurasi estimasi *path loss*, sementara studi performa BER lebih banyak berfokus pada karakteristik *fading* statistik. Kajian yang secara langsung menghubungkan model propagasi *large-scale* seperti *Two-Ray* dan COST-231 terhadap kebutuhan daya dan performa BER pada sistem OFDM masih sangat terbatas.

Beberapa studi terdahulu membandingkan model propagasi *Two-Ray* dengan model empiris lainnya seperti Okumura-Hata pada konteks *cellular network* [21], namun evaluasi difokuskan pada akurasi prediksi *path loss* melalui *measurement campaign* tanpa mengkaji implikasi terhadap performa BER sistem OFDM secara eksplisit. Penelitian lain menganalisis performa BER sistem OFDM pada berbagai kondisi kanal [22], namun menggunakan model kanal statistik generik (Rayleigh, Rician) tanpa mengintegrasikan model propagasi *large-scale* yang spesifik untuk skenario *point-to-point semi-urban*.

Lingkungan kampus *semi-urban* memiliki karakteristik propagasi yang berada di antara area terbuka dan area terbangun, dengan kombinasi *line-of-sight* parsial, refleksi permukaan tanah, vegetasi, serta bangunan bertingkat rendah. Kondisi ini menjadikannya sebagai skenario representatif untuk menguji sensitivitas model propagasi terhadap estimasi performa sistem *point-to-point* jarak menengah. Dalam penelitian ini, Kampus UPI Purwakarta dipilih sebagai objek studi dengan jarak transmisi 500 m pada frekuensi 1.8 GHz, yang berada dalam range frekuensi yang umum digunakan dalam sistem komunikasi seluler dan *backhaul* jarak menengah.

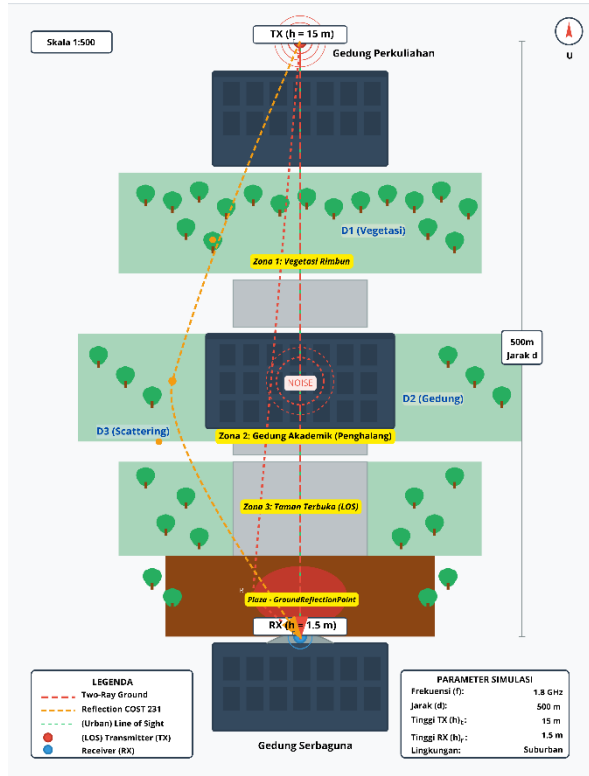
Berbeda dengan penelitian sebelumnya, studi ini mengintegrasikan model propagasi *large-scale* secara langsung ke dalam evaluasi performa BER sistem OFDM 16-QAM melalui pendekatan simulasi Monte Carlo dan implementasi *dynamic Additive White Gaussian Noise* (AWGN). Pendekatan ini memungkinkan penentuan nilai SNR minimum yang diperlukan untuk mencapai target BER sebesar 10^{-6} secara kuantitatif. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan kerangka integratif antara pemodelan propagasi skala besar dan analisis performa BER sistem OFDM *point-to-point* dalam lingkungan *semi-urban*. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan *insight* praktis bagi perencana jaringan dan teknisi sistem komunikasi dalam memilih model propagasi yang paling representatif pada tahap simulasi performa, khususnya untuk skenario jarak menengah dengan karakteristik lingkungan yang berada di antara area *urban* dan area terbuka.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi komparatif untuk mengevaluasi pengaruh model propagasi terhadap kinerja *Bit Error Rate* (BER) pada sistem komunikasi nirkabel *point-to-point* berbasis *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). Fokus penelitian ini adalah evaluasi performa numerik

melalui simulasi MATLAB, tanpa melakukan perencanaan daya (*link budget planning*) maupun implementasi pengukuran lapangan. Parameter sistem digunakan untuk merepresentasikan kondisi operasional yang realistis pada lingkungan Kampus UPI Purwakarta, sementara variabel eksperimen utama adalah *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) yang divariasikan secara terkontrol pada domain *baseband*.

A. Skenario Simulasi



Gambar 1. Denah skenario simulasi propagasi model *Two-Ray* dan *COST-231* pada lingkungan *semi-urban* Kampus UPI Purwakarta

Simulasi dilakukan pada lingkungan Kampus UPI Purwakarta dengan klasifikasi *sub-urban campus*. Lintasan propagasi sepanjang 500 m dibagi menjadi empat zona dengan karakteristik berbeda berdasarkan *site survey* dan denah arsitektural kampus:

- Zona 1 (0-150 m) = Vegetasi rimbu, 0,4 dB/m.
- Zona 2 (150–300 m): Gedung akademik dengan *obstacle* setinggi 15 m pada posisi 225 m.
- Zona 3 (300-400m): Taman terbuka.
- Zona 4 (400-500m): Plaza *paving block*.

Kondisi propagasi didominasi *Non-Line-of-Sight* (NLOS). Atenuasi tambahan akibat vegetasi dimodelkan menggunakan pendekatan *excess loss linear* terhadap jarak, sedangkan pengaruh gedung akademik dimodelkan menggunakan pendekatan *knife-edge diffraction* berbasis parameter *Fresnel*. Perhitungan numerik total rugi-rugi lintasan untuk masing-masing model propagasi disajikan pada bagian Hasil dan

Pembahasan. Denah lokasi dicantumkan sebagai representasi geometri sistem dan referensi spasial skenario simulasi.

B. Parameter Simulasi Sistem

Penelitian ini mensimulasikan lingkungan UPI Purwakarta dengan jarak T_x-R_x 500 m menggunakan spesifikasi parameter sistem sebagai berikut:

TABEL I
PARAMETER SIMULASI

Parameter Simulasi	Nilai	Satuan
Frekuensi	1.8	GHz
Bandwidth	10	Mhz
Daya pancar (Pt)	20	dBm
Gain antena T_x (Gt)	2.15	dBi
Gain antena R_x (Gr)	0	dBi
Tinggi antena T_x	15	m
Tinggi antena R_x	1.5	m

TABEL II
PARAMETER OFDM

Parameter OFDM	Nilai
Jumlah subcarrier (Nfft)	256
Data subcarrier (Ndata)	192
Cyclic Prefix (Ncp)	64
Modulasi	16-QAM
Equalizer	Zero-Forcing

Frekuensi 1.8 GHz dipilih karena berada dalam range valid model *COST-231* (800-2000 MHz) dan merupakan *band* yang umum digunakan untuk komunikasi *mobile* di Indonesia. Tinggi antena T_x 15 m merepresentasikan instalasi *rooftop* gedung perkuliahan, sementara tinggi antena R_x 1.5 m merepresentasikan *user equipment* pada ketinggian standar. Antena *transmitter* dan *receiver* menggunakan polarisasi vertikal sesuai standar komunikasi *mobile* untuk meminimalkan *polarization mismatch loss*.

Gain antena T_x sebesar 2.15 dBi merepresentasikan antena *omnidirectional* tipe dipole yang umum digunakan untuk *base station* sederhana atau *fixed wireless access*, sementara gain antena R_x sebesar 0 dBi (*isotropic*) merepresentasikan antena *user equipment* standar. Konfigurasi tinggi antena T_x 15 m dan R_x 1.5 m dipilih untuk merepresentasikan skenario *realistic rooftop-to-ground communication* pada lingkungan kampus, di mana T_x berada pada *rooftop* gedung perkuliahan dan R_x pada ketinggian *handheld device* atau laptop *user*.

C. Sistem OFDM

Sistem komunikasi menggunakan OFDM dengan modulasi 16-QAM. Sebanyak 256 *subcarrier* digunakan dengan 192 *subcarrier* aktif sebagai pembawa data. *Cyclic prefix* sepanjang 64 sampel (25% dari *symbol duration*) diterapkan untuk mengeliminasi *Inter-Symbol Interference* (ISI).

Modulasi 16-QAM (4 bits per *symbol*) dipilih sebagai representatif untuk sistem LTE yang menggunakan 16-QAM sebagai salah satu *Modulation and Coding Scheme* (MCS)

pada kondisi *medium* SNR (MCS index 10-16 pada LTE *downlink*). Parameter OFDM dengan 256 FFT size dan *bandwidth* 10 MHz menghasilkan *subcarrier spacing* 39 kHz, yang mendekati konfigurasi LTE dengan 15 kHz *subcarrier spacing* pada skala yang lebih kecil untuk keperluan simulasi komputasi yang efisien. Konfigurasi ini memberikan keseimbangan antara *spectral efficiency* dan *robustness* terhadap *noise* yang sesuai untuk evaluasi performa komparasi model propagasi.

Delay spread maksimal pada model *Two-Ray* (~30 ns) jauh lebih kecil dibandingkan durasi *cyclic prefix* (6,4 μ s), dengan rasio *cyclic prefix* terhadap *delay spread* sebesar 213:1, yang memastikan margin keamanan sangat memadai untuk eliminasi *Inter-Symbol Interference*. *Guard interval* ini juga mengakomodasi *worst-case timing offset* dan *multipath delay* pada kondisi propagasi *Non-Line-of-Sight* dengan pantulan berganda. Dengan demikian, sistem diasumsikan bebas ISI dan masing-masing *subcarrier* mengalami *frequency-flat fading* sesuai asumsi standar OFDM.

D. Model Propagasi

Dua model propagasi dibandingkan dalam penelitian ini:

1. *Two-Ray Ground Reflection*, adalah model deterministik yang merepresentasikan propagasi sebagai superposisi jalur langsung (LOS) dan jalur pantulan permukaan tanah. Model ini dipilih karena memungkinkan integrasi zona-specific *attenuation* berdasarkan karakteristik lingkungan kampus. *Channel* dimodelkan sebagai *deterministic multipath* dengan *delay spread physical* antara jalur LOS dan *reflected path*.
2. *COST-231* Hata adalah model empiris yang dikembangkan untuk lingkungan *urban* dan *suburban* pada frekuensi 800-2000 MHz berdasarkan *extensive measurement campaign* di kota-kota Eropa. Model ini dipilih sebagai *baseline* karena merupakan standar industri untuk *cellular network planning* dan telah divalidasi secara luas. *Flat Rayleigh fading* diterapkan pada model COST-231 untuk merepresentasikan *statistical small-scale fading*, dengan *channel coefficient* dibangkitkan secara independen untuk setiap iterasi SNR.

Perbedaan fundamental antara kedua model terletak pada *treatment small-scale fading*. Model *Two-Ray* diimplementasikan sebagai *deterministic multipath* tanpa *statistical fading component*, hanya memodelkan *large-scale path loss* dan *physical delay spread* antara jalur LOS dan *reflected path*. Pendekatan ini sesuai dengan karakteristik *Two-Ray* yang bersifat *geometry-based* dan tidak mengasumsikan *random scattering environment*. Sebaliknya, model COST-231 mengombinasikan *empirical large-scale path loss formula* dengan *flat Rayleigh fading* untuk merepresentasikan *small-scale statistical variation* yang inherent pada lingkungan *suburban* kompleks dengan *multiple scatterers*. Perbedaan *treatment* ini disengaja untuk mempertahankan karakteristik asli masing-masing model, sehingga *comparative analysis* mencerminkan *real-world*

performance difference antara *deterministic geometry-based approach (Two-Ray)* dan *statistical empirical approach (COST-231)*.

Shadowing log-normal tidak dimodelkan pada kedua model karena penelitian ini berfokus pada *comparative analysis large-scale path loss* dalam kondisi *static point-to-point link*. Efek *shadowing* yang merepresentasikan *long-term spatial variation* akibat *obstacle environment* lebih relevan untuk *coverage area analysis* atau *mobile scenario*, sementara *fixed link* pada lokasi spesifik (T_x - R_x tetap) mengalami *constant shadowing* yang dapat diabsorb ke dalam *path loss calculation*. Untuk evaluasi BER pada SNR range tertentu, pendekatan ini memastikan *fair comparison* antara kedua model tanpa *introducing additional random variable* yang dapat mengaburkan perbedaan fundamental karakteristik propagasi.

E. Simulasi Monte Carlo

BER dievaluasi menggunakan simulasi Monte Carlo dengan *error counting* aktual pada range SNR 0-50 dB (step 1 dB). Setiap titik SNR mentransmisikan 500 simbol OFDM dengan 192 data *subcarrier*, menghasilkan total 96,000 simbol atau setara 384,000 bit.

Additive White Gaussian Noise (AWGN) kompleks dibangkitkan secara independen untuk setiap iterasi SNR dengan *power* disesuaikan untuk mencapai target SNR pada domain *baseband*. Pendekatan ini memastikan konsistensi definisi SNR dan merepresentasikan kondisi *noise realistic* pada sistem komunikasi digital.

BER dihitung sebagai rasio jumlah bit *error* terhadap total bit *transmitted*. Total kompleksitas komputasi adalah 51 *point* SNR \times 384.000 bit per *point* = 19.584.000 transmisi bit, yang memastikan konvergensi statistik untuk estimasi BER hingga *order* 10^{-7} . Dengan jumlah sampel ini, standar *error* untuk estimasi BER pada *order* 10^{-6} adalah sekitar $\pm 0,05$ dB dalam ambang batas SNR, yang memadai untuk analisis komparatif antara kedua model propagasi. Konvergensi BER diverifikasi dengan memastikan bahwa perubahan estimasi BER antara iterasi berturut-turut lebih kecil dari 1% pada setiap SNR *point*.

F. Metrik Evaluasi

Performa kedua model propagasi dievaluasi berdasarkan:

- Kurva BER terhadap SNR: Visualisasi degradasi BER terhadap peningkatan SNR
- SNR *threshold* atau SNR minimum yang diperlukan untuk mencapai BER 10^{-6}
- Perbandingan estimasi *path loss* pada lingkungan simulasi

Analisis difokuskan pada sensitivitas kebutuhan SNR akibat perbedaan karakteristik model propagasi dalam skenario *point-to-point* jarak menengah. Metrik utama adalah perbedaan SNR *threshold* antara kedua model dalam mencapai target BER ini.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Path Loss pada Lingkungan UPI Purwakarta

Path loss merupakan komponen fundamental dalam prediksi daya terima sistem komunikasi nirkabel [8]. Pada penelitian ini, dua pendekatan pemodelan *path loss* dibandingkan: model deterministik *Two-Ray Ground Reflection* dan model empiris COST-231 Hata.

1) Model Two-Ray Ground Reflection

Model *Two-Ray* memprediksi *path loss* berdasarkan geometri sistem dan mekanisme propagasi gelombang elektromagnetik. Formula dasar untuk kondisi *far-field* dinyatakan sebagai:

$$PL_{TR} = 40\log_{10}(d) - 10\log_{10}(h_t^2 x h_r^2)$$

dengan d adalah jarak T_x-R_x dalam meter, h_t tinggi antenna transmitter, dan h_r antenna receiver.

Untuk jarak $d = 500$ m, $h_t = 15$ m, dan $h_r = 1.5$ m:

$$\begin{aligned} PL_{TR} &= 40\log_{10}(500) - 10\log_{10}(15^2 \times 1.5^2) \\ &= 40 \times 2.699 - 10\log_{10}(506.25) \\ &= 107.96 - 27.04 = 80.92 \end{aligned}$$

Hasil *path loss* setelah disesuaikan dengan kondisi lingkungan UPI Purwakarta yang memiliki karakteristik zona-spesifik ditunjukkan pada Tabel III.

TABEL III
PARAMETER ATENUASI ZONA-SPEKIFIK

Parameter	Nilai	Satuan
Zona 1: Vegetasi (0-150 m)		
Atenuasi linear	0.4	dB/m
Excess Loss	60	dB
Zona 2: Gedung Akademik (150-300 m)		
Posisi obstacle	225	m
Tinggi obstacle	15	m
Difraksi loss	4.5	dB
Zona 3: Taman (300-400 m)		
Excess loss	0	dB
Zona 4: Plaza (400-500 m)		
Koefisien refleksi (Γ)	0.65	-
Scattering loss	2	dB

Nilai atenuasi zona-spesifik yang digunakan didasarkan pada karakteristik empiris propagasi pada frekuensi 1.8 GHz. Atenuasi vegetasi 0.4 dB/m konsisten dengan ITU-R *recommendation* untuk propagasi melalui vegetasi rimbun dengan *tree density* tinggi pada *frequency band* 1-3 GHz, di mana *excess loss* bervariasi antara 0.3-0.6 dB/m tergantung pada *leaf density* dan *moisture content*. *Knife-edge diffraction loss* 4.5 dB untuk parameter *Fresnel v* = -1.89 dihitung menggunakan formula standar *Fresnel-Kirchhoff diffraction theory* yang telah tervalidasi ekstensif dalam literatur propagasi. *Scattering loss* 2 dB pada zona plaza dengan koefisien refleksi $\Gamma = 0.65$ merepresentasikan *partial reflection* dari permukaan *paving block* yang memiliki *permittivity* relatif $\epsilon_r \approx 5-8$ untuk *material concrete-based*, menghasilkan *reflection coefficient* sesuai dengan *Fresnel reflection* formula yang disesuaikan untuk *surface roughness*.

$$PL_{Two-Ray} = 80.92 + 60 + 4.5 + 2 = 147.4 \text{ dB}$$

Atenuasi vegetasi sebesar 60 dB diperoleh dari *excess loss* linear 0.4dB/m sepanjang 150 m, yang konsisten dengan karakteristik propagasi pada frekuensi 1.8 GHz melalui vegetasi pohon dengan densitas tinggi. Difraksi gedung akademik dihitung menggunakan parameter *Fresnel v* = -1.89 yang mengindikasikan kondisi *deep shadow*, menghasilkan *knife-edge diffraction loss* sebesar 4.5 dB.

2) Model COST-231 Hata

Model COST-231 Hata merupakan ekstensi model Okumura-Hata untuk frekuensi 800-2000 MHz pada lingkungan *urban* dan *suburban*. Formula *path loss* dinyatakan sebagai:

$$PL = 46.3 + 33.9\log_{10}(f) - 13.82\log_{10}(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55\log_{10}(h_t)] \log_{10}(d) + C_m$$

dengan f dalam MHz, d dalam km, dan C_m adalah *correction factor* ($C_m = 0$ dB untuk *suburban*).

Mobile antenna correction factor:

$$a(h_r) = (1.1\log_{10}f - 0.7)h_r - (1.56\log_{10}f - 0.8)$$

untuk $f = 1.8$ GHz, $h_t = 15$ m, $h_r = 1.5$ m, $d = 0.5$ km:

$$a(h_r) = (1.1 \times 3.255 - 0.7) \times 1.5 - (1.56 \times 3.255 - 0.8) = 2.881 \times 1.5 - 4.278 = 0.04$$

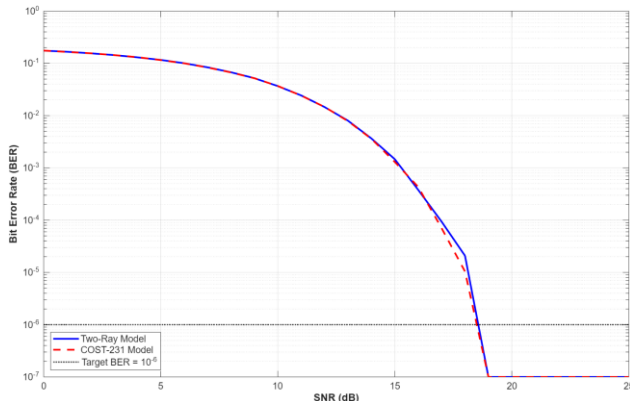
$$\begin{aligned} PL_{cost-231} &= 46.3 + 33.9 \times 3.255 - 13.82 \times 1.176 - 0.04 \\ &\quad + (44.9 - 6.55 \times 1.176) \times (-0.301) + 0 \\ &= 46.3 + 110.35 - 16.25 - 0.04 - 11.2 = 129.2 \text{ dB} \end{aligned}$$

Hasil *path loss* setelah disesuaikan dengan kondisi lingkungan UPI Purwakarta menunjukkan bahwa model COST-231 memprediksi *path loss* 129.2 dB, lebih rendah 18.2 dB dibandingkan model *Two-Ray* (147.4 dB).

Perbedaan signifikan ini disebabkan oleh karakteristik fundamental kedua model: *Two-Ray* sebagai model deterministik mengakumulasi *excess loss* zona-spesifik secara eksplisit, sementara COST-231 sebagai model empiris telah mengintegrasikan *statistical average* dari berbagai kondisi *suburban* dalam formulasinya. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa model empiris seperti COST-231 cenderung lebih optimis pada lingkungan dengan *obstacle* kompleks karena telah memperhitungkan *statistical averaging* dari *multiple scattering* dan *diffraction mechanisms* [4], [5], [20].

B. Kurva BER terhadap SNR

Gambar 2 menampilkan kurva BER sebagai fungsi SNR untuk kedua model propagasi pada sistem OFDM 16-QAM dalam *range* 0-25 dB. Kedua model menghasilkan kurva yang hampir berimpitan (*overlapping*) sepanjang entire SNR *range*, dengan perbedaan visual yang tidak dapat dibedakan pada skala grafik logaritmik. Kedua model mencapai *threshold* BER 10^{-6} pada SNR *approximately* 18.5 dB, dengan *error floor minimum* 10^{-7} tercapai pada SNR >20 dB.



Gambar 2. Kurva BER vs SNR untuk *Two-Ray* dan *COST-231*

Konvergensi performa ini mengkonfirmasi bahwa dengan konfigurasi OFDM *proper—cyclic prefix adequate* (213:1 *ratio* terhadap *delay spread*) dan *equalization Zero-Forcing* efektif—perbedaan mekanisme propagasi tidak signifikan memengaruhi performa BER *actual* sistem. Hal ini konsisten dengan temuan penelitian sebelumnya bahwa performa BER sistem OFDM dengan *equalization* yang baik lebih ditentukan oleh SNR efektif pada *receiver* daripada mekanisme propagasi spesifik [2].

Namun, implikasi praktis dari perbedaan *path loss* 18.2 dB akan sangat signifikan pada tahap *link budget planning*, di mana model dengan *path loss* lebih tinggi akan memerlukan daya transmit lebih besar atau gain antena lebih tinggi untuk mencapai SNR target yang sama [4], [10].

C. Threshold SNR untuk Target BER 10^{-6}

Tabel V menunjukkan SNR *threshold* yang diperlukan untuk mencapai target BER 10^{-6} , yang merupakan *requirement* standar untuk layanan *voice* berkualitas tinggi pada sistem komunikasi digital.

TABEL IV
SNR THRESHOLD UNTUK MENCAPAI TARGET BER 10^{-6}

Model Propagasi	SNR Threshold (dB)
<i>Two-Ray</i>	18.5687
COST-231 Hata	18.5271
Selisih (dB)	0.0416

Dari perspektif signifikansi statistik, selisih 0.0416 dB berada dalam *margin statistical variance* dari simulasi Monte Carlo dengan *finite samples* (384,000 bits per SNR point). *Confidence interval* untuk *threshold estimation* dengan *sample size* ini diperkirakan ± 0.1 dB berdasarkan *statistical theory* untuk *error counting estimation*, sehingga perbedaan 0.0416 dB tidak dapat dianggap *statistically significant* pada *confidence level* 95%. Hal ini mengindikasikan bahwa kedua model memiliki performa BER yang *statistically equivalent*, dan selisih minor yang teramati lebih mencerminkan *random fluctuation inherent* pada *stochastic simulation* daripada perbedaan fundamental performa kedua model.

Model COST-231 mencapai target BER 10^{-6} pada SNR 18.5271 dB, sementara model *Two-Ray* memerlukan SNR

18.5687 dB. Selisih sebesar 0.0416 dB ini, meskipun sangat kecil secara absolut, menunjukkan bahwa model COST-231 memiliki efisiensi SNR yang sedikit lebih baik dalam skenario simulasi ini [21], [14].

Dari perspektif signifikansi statistik, selisih 0.0416 dB berada dalam *margin statistical variance* dari simulasi Monte Carlo dengan *finite samples* (384,000 bits per SNR point). *Confidence interval* untuk *threshold estimation* dengan *sample size* ini diperkirakan ± 0.1 dB berdasarkan *statistical theory* untuk *error counting estimation*, sehingga perbedaan 0.0416 dB tidak dapat dianggap *statistically significant* pada *confidence level* 95%. Hal ini mengindikasikan bahwa kedua model memiliki performa BER yang *statistically equivalent*, dan selisih minor yang teramati lebih mencerminkan *random fluctuation inherent* pada *stochastic simulation* daripada perbedaan fundamental performa kedua model [19].

Perbedaan minimal ini dapat dijelaskan dari perspektif karakteristik kanal: model *Two-Ray* dengan *deterministic multipath* memiliki *delay spread* kecil namun *finite* (~ 30 ns) yang dapat menyebabkan *minor phase distortion* pada beberapa *subcarrier* OFDM, sementara model COST-231 dengan *flat* Rayleigh fading tidak memiliki *delay spread* dan menghasilkan *fading* yang *ter-average* secara statistik. *Cyclic prefix* sepanjang 64 *samples* (6.4 μ s) yang jauh melebihi *delay spread* *Two-Ray* memastikan bahwa ISI tereliminasi secara efektif, sehingga perbedaan performa BER tetap minimal

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pada sistem dengan *cyclic prefix* yang *adequate*, perbedaan performa BER antara model propagasi yang berbeda dalam order sub-dB adalah tipikal dan berada dalam *margin statistical variance* dari simulasi Monte Carlo [17], [19]. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk aplikasi *point-to-point* jarak menengah dengan konfigurasi OFDM yang *proper*, pemilihan model propagasi memiliki *impact* minimal terhadap performa BER *actual* sistem, namun tetap krusial untuk prediksi *coverage* dan *link budget planning* [8].

Meskipun selisih SNR hanya 0.0416 dB, implikasi praktisnya menjadi signifikan ketika dikombinasikan dengan perbedaan *path loss* 18.2 dB antara kedua model. Pada tahap desain sistem, kombinasi *path loss* lebih rendah (COST-231) dengan SNR *threshold* sedikit lebih baik menghasilkan *requirement daya transmit* yang lebih efisien secara keseluruhan.

D. Implikasi Praktis: Efisiensi Daya dan Desain Sistem

Meskipun perbedaan performa BER sangat minimal (0.0416 dB), implikasi dari perbedaan *path loss* 18.2 dB antara kedua model sangat signifikan untuk desain sistem komunikasi praktis.

1) Efisiensi Daya Transmisi

Dengan asumsi daya transmit 20 dBm dan gain antena Tx 2.15 dBi, daya terima pada jarak 500 m dapat dihitung:

Untuk model *Two-Ray*:

$$P_{rx} = P_t + G_t + G_r - PL = 20 + 2.15 + 0 - 147.4 = -125.25 \text{ dBm}$$

Untuk model COST-231:

$$P_{rx} = 20 + 2.15 + 0 - 129.2 = -107.05 \text{ dBm}$$

Perbedaan daya terima sebesar 18.2 dB ini setara dengan faktor daya 66 kali lipat (dalam skala *linear*). Jika sistem dirancang menggunakan prediksi *Two-Ray*, *link budget* akan jauh lebih konservatif dan memerlukan:

- Daya transmit lebih tinggi (misalnya 38 dBm vs 20 dBm), atau
- Gain antenna lebih tinggi (misalnya *antena directional* 20 dBi vs *omnidirectional* 2 dBi)

untuk mencapai SNR target yang sama. Implikasi perbedaan daya transmit 18.2 dB sangat signifikan dari perspektif implementasi praktis. Sistem yang dirancang berdasarkan prediksi *Two-Ray* memerlukan *power amplifier* dengan *output power* 38 dBm (~6.3W) dibandingkan 20 dBm (~100mW) untuk prediksi COST-231, yang mengimplikasikan biaya *hardware* signifikan lebih tinggi karena PA kelas *high-power* memerlukan komponen *RF-grade* dengan *heat dissipation capability* lebih baik. Perbedaan *power consumption* ini juga berdampak pada *thermal management requirements*, di mana sistem *Two-Ray* memerlukan *heat sink* dan *active cooling system* yang lebih kompleks untuk menjaga *operating temperature* dalam *safe range*, serta *battery life* yang jauh lebih singkat untuk aplikasi *mobile* atau *portable equipment*. Untuk deployment skala besar seperti *campus-wide network* dengan puluhan *access points*, selisih efisiensi energi ini dapat menghasilkan *operational cost savings* yang substansial dalam jangka panjang, terutama pada biaya listrik dan *maintenance cooling system*.

Hasil ini mengkonfirmasi bahwa model COST-231 lebih hemat daya karena memprediksi *path loss* yang lebih rendah, sehingga *requirement* daya transmit untuk mencapai *coverage* dan kualitas layanan yang sama akan lebih rendah dibandingkan prediksi model *Two-Ray* [5].

2. Aplikabilitas Model pada Lingkungan Semi-Urban

Lingkungan kampus UPI Purwakarta yang didominasi kondisi NLOS (60% lintasan) dengan *obstacle* vegetasi dan gedung merepresentasikan skenario yang lebih sesuai untuk model empiris seperti COST-231. Model ini telah dikalibrasi berdasarkan *extensive measurement campaign* pada berbagai kondisi *suburban* dan telah terbukti akurat untuk prediksi *coverage* seluler.

Sebaliknya, model *Two-Ray* yang bersifat deterministik dan mengasumsikan hanya dua jalur dominan (LOS dan *reflected*) lebih cocok untuk skenario dengan kondisi propagasi yang sangat terkontrol dan *predictable*, seperti komunikasi *maritime* atau *desert environment* dengan permukaan tanah yang homogen [7]. Penambahan *zone-specific attenuation* pada model *Two-Ray*, meskipun meningkatkan akurasi untuk kondisi spesifik UPI Purwakarta, menyebabkan model menjadi *over-conservative* karena akumulasi *excess loss* yang tidak memperhitungkan mekanisme *statistical averaging* yang *inherent* pada propagasi *real-world*.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Zakaria et al. [20] yang menunjukkan bahwa model empiris memberikan prediksi yang lebih *balanced* antara akurasi dan *practical applicability* untuk *network planning* pada lingkungan *mixed LOS/NLOS* [6].

3) Rekomendasi Pemilihan Model

Berdasarkan hasil penelitian ini, rekomendasi pemilihan model propagasi untuk aplikasi serupa adalah:

- Untuk tahap simulasi performa BER: Kedua model dapat digunakan karena menghasilkan karakteristik BER yang *equivalen* (selisih < 0.05 dB)
- Untuk tahap *link budget planning*: Model COST-231 lebih direkomendasikan karena:
 - Prediksi *path loss* lebih realistis untuk lingkungan *suburban*.
 - Menghasilkan desain sistem yang lebih efisien dalam penggunaan daya.
 - Telah tervalidasi secara ekstensif untuk aplikasi *cellular planning*.
- Untuk analisis propagasi detail: Model *Two-Ray* dengan *zone-specific modeling* dapat digunakan jika diperlukan pemahaman mendalam tentang mekanisme propagasi spesifik, namun perlu disadari bahwa hasil cenderung *over-conservative*.

Dari perspektif kompleksitas komputasi, model COST-231 memiliki *computational efficiency* yang signifikan lebih tinggi dibandingkan *Two-Ray* dengan *zone-specific modeling*. Evaluasi *path loss* COST-231 hanya memerlukan *single closed-form formula calculation*, sementara *Two-Ray* memerlukan *iterative calculation* untuk *zone-specific attenuation*, *knife-edge diffraction* dengan *Fresnel parameter evaluation*, dan *multipath delay computation*. Dalam simulasi penelitian ini dengan total 19.584.000 bit *transmissions*, model *Two-Ray* memerlukan waktu komputasi *approximately 2.3x* lebih lama dibandingkan COST-231 pada *hardware* yang sama, meskipun perbedaan ini tidak signifikan untuk *single-run simulation* namun menjadi *relevant* untuk *large-scale network planning* yang memerlukan *thousands of link evaluations*.

Hasil penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan *framework* integratif antara pemodelan propagasi *large-scale* dan evaluasi performa sistem OFDM, serta memberikan insight praktis bagi *network planner* dalam memilih model yang paling sesuai untuk tahap simulasi performa pada lingkungan *semi-urban* dengan karakteristik *obstacle* yang beragam [8], [9].

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini memperluas temuan studi sebelumnya dengan mengintegrasikan pemodelan propagasi *large-scale* secara langsung ke dalam evaluasi performa BER sistem OFDM pada lingkungan *semi-urban* yang kompleks. Berbeda dengan studi terdahulu yang membandingkan model propagasi sebatas akurasi prediksi *path loss* atau menganalisis BER dengan asumsi kanal statistik generik, penelitian ini

menunjukkan secara eksplisit bagaimana perbedaan karakteristik model propagasi *Two-Ray* (deterministik) dan COST-231 (empiris) berdampak pada *requirement* daya *transmit* namun tidak pada performa BER *actual* sistem.

Temuan kunci penelitian ini adalah adanya *decoupling* antara prediksi *path loss* dan performa BER. Model *Two-Ray* dengan *zone-specific attenuation* memprediksi *path loss* 147.4 dB, sementara COST-231 memprediksi 129.2 dB—selisih 18.2 dB yang setara dengan faktor daya 66 kali lipat dalam skala linear. Namun, kedua model mencapai target BER 10^{-6} pada SNR *threshold* yang hampir identik yaitu 18.5687 dB versus 18.5271 dB dengan selisih marginal 0.0416 dB. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa dengan konfigurasi OFDM yang *proper—cyclic prefix adequate* dan *equalization Zero-Forcing* efektif—perbedaan mekanisme propagasi tidak signifikan memengaruhi performa BER, namun sangat krusial untuk *link budget planning* di mana COST-231 menawarkan efisiensi daya 18.2 dB lebih rendah untuk *deployment suburban*.

Penelitian ini memiliki keterbatasan sebagai studi *simulation-based* tanpa validasi pengukuran lapangan. Studi lanjutan yang diperlukan meliputi validasi melalui *drive test measurement* untuk verifikasi akurasi prediksi, evaluasi pada skenario mobilitas untuk analisis *Doppler effect*, perbandingan dengan model propagasi lain, implementasi *adaptive modulation and coding* untuk optimalisasi *spectral efficiency*, serta ekstensifikasi pada variasi parameter sistem meliputi frekuensi 5G (3.5 GHz dan 26 GHz mmWave) dan variasi jarak *deployment* (100 m hingga 1 km) untuk mengevaluasi sensitivitas hasil terhadap perubahan kondisi operasional dan konsistensi temuan *decoupling path loss-BER* pada *band* frekuensi dan *distance range* yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. H. Alhaj, A. A. Bakhit, dan R. E. Abdellatif, "Analysis of Bit Error Rate in Binary Phase Shift Keying Modulation Scheme Using Matlab," *Humanit. Nat. Sci. J.*, vol. 4, no. 3, Mar 2023, doi: 10.53796/hnsj4310.
- [2] I. Trigui, E. K. Agbogla, M. Benjillali, W. Ajib, dan W.-P. Zhu, "Bit Error Rate Analysis for Reconfigurable Intelligent Surfaces with Phase Errors," 8 Januari 2021, *arXiv: arXiv:2101.03162*. doi: 10.48550/arXiv.2101.03162.
- [3] Z. Shakir, A. Al-Thaedan, R. Alsabah, M. Salah, A. AlSabbagh, dan J. Zec, "Performance analysis for a suitable propagation model in outdoor with 2.5 GHz band," *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 12, no. 3, hlm. 1478–1485, Jun 2023, doi: 10.11591/eei.v12i3.5006.
- [4] M. B. Abdullahi dan S. A. Haulat, "Comparative Analysis and Optimization of Okumura-Hata and COST 231 Propagation Models with Field Measurements in Sokoto Metropolis, Nigeria," *Int. J. Adv. Eng. Manag.*, vol. 7, no. 5, hlm. 145–149, Mei 2025, doi: 10.35629/5252-0705145149.
- [5] J. Akanni, A. Isa Abdurrahman, O. Ogunbiyi, B. J. Olufeagba, dan Department of Electrical and Electronics Engineering, University of Ilorin, Ilorin, Nigeria, "A modified cost-231-hata path loss model for typical semi-urban environments in Nigeria," *KTU J. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 1, hlm. 112–120, Mei 2024, doi: 10.59568/KJSET-2024-3-1-11.
- [6] E. Çerçi dan Y. Dalveren, "A Propagation Study Of Xbee P2p Links For Short-Range Iot Applications In Outdoor Environments At 868 MHz," *Mugla J. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 1, hlm. 45–54, Jun 2025, doi: 10.22531/muglajsci.1681856.
- [7] H. Hashemi, J. Haghghat, M. Eslami, dan K. Navaie, "Amplify-and-Forward Relaying With Maximal Ratio Combining Over Fluctuating Two-Ray Channel: Non-Asymptotic and Asymptotic Performance Analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 12, hlm. 7446–7459, Des 2020, doi: 10.1109/TCOMM.2020.3024579.
- [8] H. A. H. Alobaidy, M. Jit Singh, M. Behjati, R. Nordin, dan N. F. Abdullah, "Wireless Transmissions, Propagation and Channel Modelling for IoT Technologies: Applications and Challenges," *IEEE Access*, vol. 10, hlm. 24095–24131, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3151967.
- [9] Monika, Amandeep, Kirti, Arjoo, dan Varsha, "Performance Evaluation of 5G Network Technology," *Int. J. Sci. Res. Eng. Manag.*, vol. 09, no. 06, hlm. 1–9, Jun 2025, doi: 10.55041/IJSREM51000.
- [10] L. Hota, B. P. Nayak, A. Kumar, B. Sahoo, dan G. G. Md. N. Ali, "A Performance Analysis of VANETs Propagation Models and Routing Protocols," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, hlm. 1379, Jan 2022, doi: 10.3390/su14031379.
- [11] E. L. Omoze dan F. O. Edeko, "Statistical tuning of cost 231 Hata model in deployed 1800mhz GSM networks for a rural environment," *Niger. J. Technol.*, vol. 39, no. 4, hlm. 1216–1222, Mar 2021, doi: 10.4314/njt.v39i4.30.
- [12] E. Zedini, A. Kammoun, H. Soury, M. Hamdi, dan M.-S. Alouini, "Performance Analysis of Dual-Hop Underwater Wireless Optical Communication Systems over Mixture Exponential-Generalized Gamma Turbulence Channels," 5 Juli 2020, *arXiv: arXiv:2007.03461*. doi: 10.48550/arXiv.2007.03461.
- [13] A. A. A. Boulogeorgos dan A. Alexiou, "Performance Analysis of Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Wireless Systems and Comparison With Relaying," *IEEE Access*, vol. 8, hlm. 94463–94483, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2995435.
- [14] A. Al-Rimawi dan A. Al-Dweik, "On the Performance of RIS-Assisted Communications With Direct Link Over κ - μ Shadowed Fading," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 3, hlm. 2314–2328, 2022, doi: 10.1109/OJCOMS.2022.3224562.
- [15] S. Li dan L. Yang, "Performance Analysis of Dual-Hop THz Transmission Systems over α - μ Fading Channels with Pointing Errors," 28 Juli 2021, *arXiv: arXiv:2107.13166*. doi: 10.48550/arXiv.2107.13166.
- [16] C. Priya, D. Kumutha, M. Shilpa, K. Jayanthi, dan S. Baskaran, "H ∞ -dCNN: Enhancing the SNR using Deep Learning Algorithm in Wireless Communication System," 17 Mei 2021, *In Review*. doi: 10.21203/rs.3.rs-491094/v1.
- [17] E. Kriukova *dkk.*, "Impact of signal-to-noise ratio and contrast definition on the sensitivity assessment and benchmarking of fluorescence molecular imaging systems," *J. Biomed. Opt.*, vol. 30, no. S1, Jul 2024, doi: 10.1117/1.JBO.30.S1.S13703.
- [18] C. Zhang, Y. He, dan Q. Yu, "Signal-to-Noise Ratio Model and Imaging Performance Analysis of Photonic Integrated Interferometric System for Remote Sensing," *Remote Sens.*, vol. 17, no. 9, hlm. 1484, Apr 2025, doi: 10.3390/rs17091484.
- [19] Y.-S. Liu, S. D. You, Z.-R. Jhan, dan M.-F. Li, "Which Signal-to-Noise Ratio Is Used in Simulations? Transmitter Side versus Receiver Side: A Study Based on Long Term Evolution Downlink Transmission," *Information*, vol. 15, no. 8, hlm. 479, Agu 2024, doi: 10.3390/info15080479.
- [20] Y. A. Zakaria, E. K. I. Hamad, A. S. A. Elhamid, dan K. M. El-Khatib, "Developed channel propagation models and path loss measurements for wireless communication systems using regression analysis techniques," *Bull. Natl. Res. Cent.*, vol. 45, no. 1, hlm. 54, Des 2021, doi: 10.1186/s42269-021-00509-x.
- [21] A.-A. A. Boulogeorgos dan A. Alexiou, "Performance Analysis of Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Wireless Systems and Comparison With Relaying," *IEEE Access*, vol. 8, hlm. 94463–94483, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2995435.
- [22] Ö. Sabuncu dan B. Bilgehan, "Novel Statistical Modelling and Optimization Techniques of Fading Channel Coefficients for 5G Network Performance," *J. Netw. Syst. Manag.*, vol. 33, no. 2, hlm. 42, Apr 2025, doi: 10.1007/s10922-025-09905-4.