

SKRIPSI
PENGEMBANGAN MODEL ECC-33 ADAPTIF MENGGUNAKAN
GENETIC ALGORITHM* UNTUK PREDIKSI *PATH LOSS
DI LINGKUNGAN PERKOTAAN



Diajukan sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar
Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Elektro Fakultas
Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang

Dipersiapkan Dan Disusun Oleh
ALIF YUDHA GHIFARI
132022007

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PALEMBANG
2026

SKRIPSI
PENGEMBANGAN MODEL ECC-33 ADAPTIF MENGGUNAKAN
GENETIC ALGORITHM* UNTUK PREDIKSI *PATH LOSS
DI LINGKUNGAN PERKOTAAN



Merupakan syarat untuk memperoleh gelar sarjana
Telah dipertahankan di depan dewan penguji
24 Agustus 2026

Dipersiapkan Dan Disusun Oleh
ALIF YUDHA GHIFARI
132022007

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PALEMBANG
2026

SKRIPSI

PENGEMBANGAN MODEL ECC-33 ADAPTIF MENGGUNAKAN GENETIC ALGORITMH UNTUK PREDIKSI PATH LOSS DI LINGKUNGAN PERKOTAAN



Merupakan syarat untuk memperoleh gelar sarjana
Telah dipertahankan di depan dewan penguji
24 Agustus 2026

Dipersiapkan dan Disusun Oleh
ALIF YUDHA GHIFARI
Susunan Dewan Penguji

Pembimbing

Dr. Bengawan Alfaresi, S.T., M.T
NIDN. 0218017202

Penguji 1

Rika Noverianty, S.T., M.T
NIDN. 0214117504

Pembimbing 2

Muhammad Hurairah, S.T., M.T.
NIDN. 0228098702

Penguji 2

Fadilah, S.T., M.T
NIDN. 0215089003

Mengetahui
Dekan Fakultas Teknik



U. A. Jansidi, M.T
NIDN. 0262026502

Menyetujui
Kema Program Studi Teknik Elektro



Dr. Feby Ardianto, S.T., M.Cs
NIDN. 0207038101

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun merupakan karya ilmiah yang belum pernah digunakan atau diajukan sebelumnya untuk memperoleh gelar kesarjanaan pada Perguruan Tinggi mana pun. Sepanjang pengetahuan saya, skripsi ini juga tidak memuat karya maupun pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan oleh pihak lain, kecuali sumber-sumber yang telah dicantumkan secara jelas dalam naskah dan tercatat dalam daftar pustaka.

Palembang, 24 agustus 2026

Yang membuat pernyataan



Alif Yudha Ghifari

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **Pengembangan Model ECC-33 Adaptif Menggunakan *Genetic Algorithm* untuk Prediksi *Path Loss* di Lingkungan Perkotaan** yang disusun guna untuk syarat mendapatkan gelar sarjana pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.

pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

- Bapak Dr. Bengawan Alfaresi, S.T., M.T.,IPM., selaku Pembimbing I
- Bapak Muhammad Hurairah S.T., M.T. selaku Pembimbing II

Dan tak lupa pula penulis mengucapkan terimah kasih kepada

1. Bapak Prof. Abid Djazuli, S.E., M.M, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Palembang.
2. Bapak Ir. A. Junaidi, M.T, Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.
3. Bapak Dr. Feby Ardianto, S.T., M.T., M.Cs, selaku Ketua Program Stufi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.
4. Bapak Muhammad Hurairah, S.T., M.T, selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.
5. Bapak Dan Ibu Staf dosen Pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.
6. Bapak Dan Ibu staf Tata Usaha Fakultas Elektro Universitas Muhammadiyah Palembang.
7. Rekan-rekan Mahasiswa program studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Palembang yang telah memberikan bantuan dan dukungan selama proses penyelesaian skripsi ini.

Atas segala bantuan, baik secara moril maupun material, yang telah diberikan selama penyusunan skripsi ini, penulis menyampaikan terima kasih. Semoga

setiap bantuan dan kebaikan yang diberikan mendapatkan balasan yang sesuai dari Allah SWT. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan dan belum sepenuhnya sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan sebagai bahan perbaikan. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis serta menjadi bahan yang berguna bagi pembaca, khususnya mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palembang.

Palembang, 24 Agustus 2026

Penulis

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Alif Yudha Ghifari' with a stylized 'Y.G.' at the end.

Alif Yudha Ghifari

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

“Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal ia baik bagimu, dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu, padahal ia buruk bagimu. Allah mengetahui, sedangkan kamu tidak mengetahui.” (QS. Al-Baqarah: 216)

“Kelak aku akan bersaksi di hadapan tuhan, bagaimana berusahanya bapak dan ibuk ku untuk pendidikan dan kebahagiaan anaknya”.

PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan puji dan syukur kehadiran Allah SWT, atas segala rahmat, nikmat, kesehatan, kekuatan, serta kemudahan yang telah diberikan, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Dengan segala kerendahan hati, skripsi ini penulis persembahkan kepada:

- ❖ Allah SWT, yang telah memberikan rahmat, petunjuk, kekuatan, kesabaran, dan kemudahan kepada penulis dalam melewati setiap proses hingga skripsi ini dapat diselesaikan.
- ❖ Kepada kedua orang tuaku Bapak Sanpri dan Ibuk Aplisah, Bapak dan Ibu mungkin tidak memiliki gelar sarjana yang tertulis di belakang nama, tetapi gelar yang saya raih hari ini adalah gelar yang sesungguhnya juga milik Bapak dan Ibu. Karena di balik gelar ini ada doa yang tidak pernah putus, keringat yang tidak pernah saya lihat, pengorbanan yang tidak pernah Bapak dan Ibu ceritakan, serta perjuangan yang membuat saya mampu sampai di titik ini. Gelar ini saya persembahkan untuk Bapak dan Ibu, karena tanpa kalian, saya tidak akan pernah sampai di sini.
- ❖ Bapak Dr. Bengawan Alfaresi, S.T., M.T., IPM., selaku Pembimbing I dan Bapak Muhammad Hurairah, S.T., M.T., selaku Pembimbing II, Terima kasih atas waktu, kesabaran, arahan, masukan, dan ilmu yang telah diberikan selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih karena telah membimbing saya dengan penuh perhatian dan membantu saya memperbaiki setiap kekurangan dalam penelitian ini.

Setiap kritik dan saran yang diberikan menjadi pelajaran berharga bagi saya. Bimbingan Bapak tidak hanya membantu saya menyelesaikan skripsi, tetapi juga mengajarkan saya untuk lebih bertanggung jawab terhadap proses dan hasil dari setiap pekerjaan yang saya lakukan.

- ❖ Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Teknik Elektro, yang telah memberikan ilmu, pengetahuan, pengalaman, dan pembelajaran selama penulis menempuh pendidikan di Universitas Muhammadiyah Palembang.
- ❖ Untuk Eky Aisyah, Seseorang yang hadir bukan hanya ketika semuanya mudah, tetapi juga ketika perjalanan ini terasa begitu melelahkan. Terima kasih telah menjadi tempat berbagi cerita, memberikan semangat ketika saya hampir menyerah, dan selalu mengingatkan saya untuk terus melangkah. Mungkin namamu tidak tertulis di lembar ijazah saya, tetapi dukunganmu menjadi bagian dari perjalanan yang mengantarkan saya sampai pada titik ini.

Terima kasih kepada seluruh pihak yang telah terlibat, membantu, mendukung, memberikan doa, semangat, motivasi, serta memberikan kontribusi baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penyusunan dan penyelesaian skripsi ini. Setiap bantuan, kebaikan, dan dukungan yang diberikan sangat berarti bagi penulis. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan terbaik dari Allah SWT.

ABSTRAK

Perkembangan teknologi komunikasi seluler membutuhkan kualitas jaringan yang baik agar proses komunikasi dan pertukaran informasi dapat berlangsung secara optimal. Salah satu faktor yang memengaruhi kualitas jaringan adalah *path loss*, yaitu besarnya pelemahan daya sinyal selama propagasi dari pemancar menuju penerima. Model ECC-33 merupakan salah satu model empiris yang dapat digunakan untuk memprediksi *path loss*, tetapi parameter standar pada model tersebut belum tentu sesuai dengan karakteristik lingkungan perkotaan tertentu. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model ECC-33 Adaptif dengan melakukan optimasi parameter menggunakan *Genetic Algorithm* (GA) sehingga diperoleh model yang lebih sesuai dengan karakteristik data pengukuran di lingkungan perkotaan. Penelitian dilakukan dengan menggunakan data hasil pengukuran *path loss* melalui *drive test* sebagai data pembanding terhadap hasil prediksi model ECC-33. Proses optimasi *Genetic Algorithm* dilakukan dengan mencari kombinasi parameter bobot (w_1) sampai (w_5) yang mampu meminimalkan kesalahan antara hasil prediksi dan hasil pengukuran. Hasil optimasi menghasilkan parameter (w_1)= 0,3700), (w_2) = 0,463041), (w_3)=-0,5920), (w_4)=0,0046), dan (w_5)=-0,591049). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa model ECC-33 konvensional menghasilkan nilai MAE sebesar 135,48 dB, MSE sebesar 18.559,66 dB², dan RMSE sebesar 136,23 dB. Setelah dilakukan optimasi menggunakan *Genetic Algorithm*, nilai tersebut menurun menjadi MAE sebesar 9,68 dB, MSE sebesar 133,42 dB², dan RMSE sebesar 11,55 dB. Dengan demikian, penerapan *Genetic Algorithm* mampu menurunkan kesalahan prediksi secara signifikan dan meningkatkan kesesuaian model ECC-33 terhadap data pengukuran. Model ECC-33 Adaptif hasil optimasi dapat digunakan sebagai pendekatan yang lebih sesuai untuk prediksi *path loss* pada lingkungan perkotaan.

Kata kunci: ECC-33, *Genetic Algorithm*, *path loss*, lingkungan perkotaan, *drive test*, optimasi parameter.

ABSTRACT

The development of cellular communication technology requires good network quality to ensure optimal communication and information exchange. One of the factors affecting network quality is path loss, which refers to the attenuation of signal power during propagation from the transmitter to the receiver. The ECC-33 model is an empirical model that can be used to predict path loss; however, its standard parameters may not be fully suitable for the characteristics of a particular urban environment. Therefore, this study aims to develop an Adaptive ECC-33 model by optimizing its parameters using a Genetic Algorithm (GA) to obtain a model that better represents the characteristics of measurement data in an urban environment. This study uses path loss measurement data obtained through drive tests as a reference for evaluating the ECC-33 model predictions. The Genetic Algorithm optimization process was performed to determine the combination of weighting parameters w_1 to w_5 that minimizes the error between the predicted and measured path loss values. The optimization resulted in the parameters $(w_1)=0.3700$, $(w_2) =0.463041$, $(w_3) = -0.5920$, $(w_4) = 0.0046$, and $w_5)=-0.591049$. The evaluation results show that the conventional ECC-33 model produced an MAE of 135.48 dB, an MSE of 18,559.66 dB², and an RMSE of 136.23 dB. After optimization using the Genetic Algorithm, these values decreased to an MAE of 9.68 dB, an MSE of 133.42 dB², and an RMSE of 11.55 dB. Therefore, the application of the Genetic Algorithm significantly reduces prediction errors and improves the suitability of the ECC-33 model to the measurement data. The optimized Adaptive ECC-33 model can thus be used as a more suitable approach for predicting path loss in urban environments.

Keywords: ECC-33, Genetic Algorithm, path loss, urban environment, drive test, parameter optimization.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	ii
KATA PENGANTAR	v
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR ISTILAH	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1.Latar Belakang	1
1.2. Tujuan penelitian.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Konsep Dasar Propagasi Gelombang Radio	6
2.1.1. Mekanisme Propagasi Gelombang	7
2.1.2. Faktor yang Memengaruhi Propagasi	8
2.1.3. Karakteristik Propagasi Gelombang Radio.....	9
2.2. Path Loss Pada Sistem Komunikasi Nirkabel	10
2.2.1. Pengertian Path Loss.....	10
2.2.2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Path Loss	11
2.3. Model Propagasi Empiris	12
2.4. Model ECC-33	14
2.4.1. <i>Free Space Attenuation (A_{fs})</i>	14
2.4.2. <i>Basic Median Path Loss (A_{bm})</i>	15

2.4.3. <i>Base Station Antenna Gain (Gb)</i>	15
2.4.4. <i>Mobile Station Antenna Gain (Gr)</i>	15
2.4.5. Persamaan <i>Path Loss</i> Model ECC-33.....	16
2.4.6. Batasan Dan Kelebihan Model Propagasi ECC-33	17
2.5. Pengembangan Model ECC-33 Adaptif.....	18
2.6. Algoritma Genetika	19
2.7. Optimasi Parameter Model ECC-33 Adaptif Menggunakan (GA).....	21
2.8. Evaluasi Kinerja Model Prediksi.....	22
2.7.1. Root Mean Square Error (RMSE)	23
2.7.2. Mean Absolute Error (MAE).....	23
2.7.3. Mean Squared Error (MSE).....	24
2.9. Penelitian Terdahulu.....	26
BAB 3 METODE PENELITIAN	28
3.1. Lokasi Dan Objek Penelitian.....	28
3.2. Teknik Pengumpulan Data	29
3.2.1. Studi Literatur	29
3.2.2. Pengumpulan Data Pengukuran.....	29
3.3. Jenis Dan Variabel Penelitian.....	30
3.3.1. Jenis Penelitian	30
3.3.2. Variabel Penelitian.....	31
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	32
BAB 4 DATA, PERHITUNGAN, PEMBAHASAN DAN ANALISA	33
4.1. Data Hasil Pengukuran Lapangan	33
4.1.1. Data Parameter Hasil Pengukuran	33
4.1.2. Statistik Data Hasil Pengukuran	35
4.1.3. Visualisasi Data Pengukuran	36
4.2. Prediksi Path Loss Menggunakan Model ECC-33 Adaptif.....	39
4.2.1. Implementasi Model ECC-33 Adaptif.....	40
4.2.2. Hasil Perhitungan Model ECC-33 Konvensional.....	40
4.3. Optimasi Parameter menggunakan Genetic Algorithm.....	43
4.3.1. Implementasi Algoritma Genetika.....	43

4.3.2. Parameter Optimasi <i>Genetic Algorithm</i>	44
4.3.3. Hasil Optimasi Parameter	45
4.4. Hasil Prediksi PathLoss Menggunakan Model ECC-Adaptif +GA	45
4.4.1. Model ECC-33 Menggunakan Parameter Hasil Optimasi GA.....	46
4.4.2. Grafik Perbandingan Hasil Prediksi	47
4.5. Evaluasi Kinerja Model.....	48
4.5.1. Mean Absolute Error (MAE).....	49
4.5.2. Mean Squared Error (MSE).....	50
4.5.3. Root Mean Squared Error (RMSE)	51
4.5.4. Perbandingan ECC-33 Sebelum dan Sesudah Optimasi GA.....	52
4.6. Pembahasan Hasil Penelitian.....	53
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	55
5.1. Kesimpulan.....	55
5.2 Saran	56
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi Pentransmisian Gelombang Radio di suatu jaringan.....	6
Gambar 3. 1 Peta Lokasi Kota Palembang.....	28
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian	32
Gambar 4. 1 Grafik Hubungan jarak terhadap measured path loss.....	37
Gambar 4. 2 Grafik Histogram Distribusi Measured PathLoss	38
Gambar 4. 3 Boxplot Parameter Dataset.....	39
Gambar 4. 4 Perbandingan Path Loss Pengukuran dengan model ecc-33.....	48
Gambar 4. 5 Perbandingan Path Loss Pengukuran dengan model ECC+GA	48

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Data Hasil Pengukuran Lapangan.....	34
Tabel 4. 2 Statistik Deskriptif Data Hasil Pengukuran	35
Tabel 4. 3 Hasil Prediksi Model ECC-33	41
Tabel 4. 4 Parameter Genetic Algoritmh	44
Tabel 4. 5 Parameter Hasil Optimasi Genetic Alorithm	45
Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan Mean Absolute Error (MAE)	49
Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan Mean Squared Error (MSE)	50
Tabel 4. 8 Hasil Perhitungan Root Mean Squared Error (RMSE).....	51
Tabel 4. 9 Perbandingan ECC-33 Sebelum dan Sesudah Optimasi (GA).	53

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. 1 Dokumentasi melakukan perjalanan pada rute penelitian...	59
Lampiran 1. 2 tampilan aplikasi pengukuran.....	60

DAFTAR ISTILAH

No.	Istilah	Pengertian
1	<i>Path Loss</i>	Pelemahan daya atau kekuatan sinyal radio selama proses propagasi dari pemancar menuju penerima.
2	Propagasi Gelombang Radio	Proses perambatan gelombang elektromagnetik dari antena pemancar menuju antena penerima.
3	ECC-33	Model propagasi empiris yang digunakan untuk memperkirakan nilai path loss pada sistem komunikasi radio, khususnya lingkungan perkotaan.
4	ECC-33 Adaptif	Pengembangan model ECC-33 yang parameternya disesuaikan dengan karakteristik data dan lingkungan penelitian melalui proses optimasi.
5	<i>Genetic Algorithm</i> (GA)	Algoritma optimasi yang terinspirasi dari proses seleksi alam dan evolusi untuk mencari solusi terbaik dari suatu permasalahan.
6	Optimasi	Proses pencarian nilai parameter terbaik untuk memperoleh hasil prediksi atau kinerja model yang lebih optimal.
7	Bobot (<i>Weight</i>)	Nilai pengali yang diberikan pada setiap komponen model ECC-33 untuk menyesuaikan kontribusinya terhadap hasil prediksi.
8	w1	Bobot yang diberikan pada komponen <i>Free Space Attenuation</i> (Afs).
9	w2	Bobot yang diberikan pada komponen <i>Basic Median Path Loss</i> (Abm).
10	w3	Bobot yang berkaitan dengan komponen <i>Gain Base Station</i> (Gb).
11	w4	Bobot yang berkaitan dengan komponen <i>Gain Mobile Station</i> (Gr).
12	w5	Parameter konstanta atau koreksi tambahan pada model ECC-33 Adaptif.
13	Afs	<i>Free Space Attenuation</i> , yaitu komponen pelemahan sinyal akibat propagasi pada ruang bebas.
14	Abm	<i>Basic Median Path Loss</i> , yaitu komponen dasar median path loss pada model ECC-33.
15	Gb	<i>Gain Base Station</i> , yaitu komponen gain atau penguatan yang berkaitan dengan antena <i>base station</i> .

16	Gr	<i>Gain Mobile Station</i> , yaitu komponen gain atau penguatan yang berkaitan dengan antena <i>mobile station</i> .
17	<i>Base Station (BS)</i>	Stasiun pemancar yang menyediakan layanan komunikasi radio kepada perangkat atau stasiun penerima.
18	<i>Mobile Station (MS)</i>	Perangkat atau stasiun penerima yang berkomunikasi dengan <i>base station</i> .
19	<i>Drive Test</i>	Metode pengumpulan data dengan melakukan pengukuran sinyal secara langsung di lapangan sepanjang jalur atau lokasi tertentu.
20	<i>Frekuensi (f)</i>	Banyaknya siklus gelombang yang terjadi dalam satu detik, biasanya dinyatakan dalam MHz atau GHz.
21	Jarak (d)	Jarak antara pemancar dan penerima yang digunakan sebagai salah satu parameter perhitungan <i>path loss</i> .
22	Tinggi Antena Pemancar (hb)	Ketinggian antena pada sisi <i>base station</i> atau pemancar.
23	Tinggi Antena Penerima (hm)	Ketinggian antena pada sisi <i>mobile station</i> atau penerima.
24	<i>Urban</i>	Lingkungan perkotaan yang memiliki banyak bangunan, kendaraan, jalan, dan objek penghalang lainnya yang memengaruhi propagasi sinyal.
25	<i>Refleksi</i>	Peristiwa pemantulan gelombang radio ketika gelombang mengenai permukaan atau objek tertentu.
26	<i>Difraksi</i>	Peristiwa pembelokan atau penyebaran gelombang ketika melewati penghalang.
27	Penghamburan (<i>Scattering</i>)	Penyebaran gelombang radio ke berbagai arah akibat interaksi dengan objek berukuran kecil atau permukaan yang tidak rata.
28	<i>Fitness Function</i>	Fungsi yang digunakan untuk mengukur kualitas suatu solusi dalam <i>Genetic Algorithm</i> .
29	Populasi	Sekumpulan individu atau solusi yang diproses dalam satu generasi <i>Genetic Algorithm</i> .
30	Individu	Satu kandidat solusi dalam populasi <i>Genetic Algorithm</i> .
31	Kromosom	Representasi suatu solusi dalam <i>Genetic Algorithm</i> yang terdiri dari sejumlah gen.
32	Gen	Elemen penyusun kromosom yang merepresentasikan nilai parameter tertentu dalam <i>Genetic Algorithm</i> .

33	Seleksi	Proses memilih individu dengan kualitas terbaik untuk digunakan pada proses reproduksi atau generasi berikutnya.
34	<i>Crossover</i>	Proses pertukaran informasi genetik antara dua individu untuk menghasilkan individu baru.
35	Mutasi	Proses perubahan nilai gen secara acak untuk menjaga keberagaman solusi dalam populasi.
36	Generasi	Satu siklus proses evolusi dalam <i>Genetic Algorithm</i> yang meliputi evaluasi, seleksi, <i>crossover</i> , dan mutasi.
37	Prediksi	Proses memperkirakan nilai path loss berdasarkan parameter model dan kondisi propagasi.
38	Data Pengukuran	Data path loss yang diperoleh secara langsung dari hasil pengukuran lapangan atau <i>drive test</i> .
39	RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> , yaitu ukuran kesalahan prediksi yang menghitung akar dari rata-rata kuadrat selisih antara nilai prediksi dan pengukuran.
40	MAE	<i>Mean Absolute Error</i> , yaitu rata-rata nilai absolut dari selisih antara hasil prediksi dan hasil pengukuran.
41	MSE	<i>Mean Squared Error</i> , yaitu rata-rata kuadrat selisih antara nilai prediksi dan nilai pengukuran.
42	R ²	<i>Coefficient of Determination</i> , yaitu ukuran yang menunjukkan seberapa baik model menjelaskan variasi pada data pengukuran.
43	Akurasi Prediksi	Tingkat kedekatan antara nilai <i>path loss</i> hasil prediksi model dengan nilai <i>path loss</i> hasil pengukuran.
44	Kalibrasi Model	Proses penyesuaian parameter model agar hasil prediksi lebih sesuai dengan karakteristik data pengukuran.
45	Model Empiris	Model yang dibangun berdasarkan hasil pengamatan atau pengukuran empiris dari kondisi propagasi tertentu.
46	Komunikasi Nirkabel	Sistem komunikasi yang melakukan pengiriman informasi melalui gelombang elektromagnetik tanpa menggunakan media kabel.
47	UHF	<i>Ultra High Frequency</i> , yaitu rentang frekuensi radio yang umum digunakan dalam berbagai sistem komunikasi nirkabel.
48	MHz	<i>Megahertz</i> , satuan frekuensi yang setara dengan satu juta hertz.

49	dB	<i>Decibel</i> , satuan logaritmik yang digunakan untuk menyatakan perbandingan tingkat daya atau besaran sinyal.
50	dB ²	Satuan yang digunakan pada nilai MSE ketika kesalahan <i>path loss</i> dinyatakan dalam <i>desibel</i> .

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam beberapa dekade terakhir, teknologi komunikasi nirkabel telah berkembang secara eksponensial. Kemajuan ini sejalan dengan meningkatnya permintaan masyarakat untuk layanan komunikasi berkecepatan tinggi dan berkualitas tinggi. Penyebaran jaringan seluler generasi keempat (4G), generasi kelima (5G), dan hingga pengembangan menuju jaringan 6G menuntut proses perencanaan jaringan yang semakin akurat agar mampu memberikan cakupan layanan yang optimal. Salah satu aspek penting dalam perencanaan jaringan tersebut adalah prediksi *path loss*, yaitu pelemahan daya sinyal yang terjadi ketika gelombang radio merambat dari pemancar menuju penerima. Prediksi path loss yang akurat berperan penting dalam menentukan cakupan sel, kualitas layanan, kapasitas jaringan, serta efisiensi pembangunan infrastruktur telekomunikasi. Oleh karena itu, pemilihan model propagasi yang sesuai dengan karakteristik lingkungan menjadi faktor utama dalam meningkatkan kinerja jaringan komunikasi nirkabel (Alfaresi, 2020).

Berbagai model propagasi empiris telah dikembangkan untuk memprediksi nilai path loss, di antaranya Okumura-Hata, COST-231 Hata, Stanford University Interim (SUI), serta ECC-33. Model ECC-33 merupakan salah satu model propagasi yang banyak digunakan pada sistem komunikasi broadband karena memiliki kemampuan prediksi yang baik pada rentang frekuensi tinggi. Model ini dibangun berdasarkan hasil pengamatan empiris sehingga lebih sederhana dan mudah diterapkan dibandingkan model propagasi yang bersifat deterministik. Namun demikian, parameter-parameter pada model ECC-33 bersifat tetap dan disusun berdasarkan karakteristik lingkungan tertentu. Kondisi tersebut menyebabkan akurasi prediksi model dapat menurun ketika diterapkan pada lingkungan perkotaan yang memiliki karakteristik bangunan, kepadatan

infrastruktur, tinggi antena, serta kondisi geografis yang berbeda dengan lingkungan tempat model tersebut dikembangkan (A. O. M. A. O. A. O., 2018).

Berbagai penelitian terdahulu telah berupaya meningkatkan akurasi prediksi path loss melalui penerapan metode kecerdasan buatan maupun teknik optimasi, seperti *Random Forest*, *Artificial Neural Network* (ANN), dan *Support Vector Machine* (SVM) dan *XGBoost*. Pendekatan tersebut terbukti mampu meningkatkan akurasi prediksi karena dapat mempelajari pola hubungan antara parameter propagasi dan nilai path loss dari data pengukuran. Namun, penelitian yang mengoptimalkan parameter internal model empiris khususnya model ECC-33 masih sangat terbatas. Sebaliknya, sebagian besar penelitian berkonsentrasi pada pembuatan model prediksi baru berbasis machine learning. Padahal, pendekatan tersebut berpotensi mempertahankan kesederhanaan model empiris sekaligus meningkatkan akurasinya melalui penyesuaian parameter terhadap kondisi lingkungan propagasi yang sebenarnya (S. O. Ajose, 2013).

Algoritma genetika (GA) adalah salah satu metode optimasi yang paling umum digunakan untuk menyelesaikan masalah pencarian solusi optimal. Algoritma ini bekerja dengan meniru mekanisme evolusi biologis melalui proses mutasi, crossover, dan seleksi. Ini memungkinkan algoritma ini untuk menemukan kombinasi parameter yang paling cocok pada ruang pencarian yang kompleks. Dalam penelitian ini, Genetic Algorithm digunakan untuk mengoptimalkan parameter-parameter pada model ECC-33 sehingga model tersebut menjadi lebih adaptif terhadap karakteristik lingkungan perkotaan. Dengan melakukan penyesuaian parameter berdasarkan data propagasi yang tersedia, diharapkan model ECC-33 adaptif dapat menghasilkan prediksi kehilangan jalur yang lebih akurat daripada model ECC-33 konvensional yang masih menggunakan parameter standar (A. L. Imoize, 2019).

Berdasarkan penjelasan tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan model ECC-33 adaptif menggunakan Genetic Algorithm untuk meningkatkan akurasi prediksi path loss di lingkungan perkotaan. Kinerja model yang dikembangkan akan dievaluasi menggunakan parameter statistik seperti, *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk

menentukan tingkat kesesuaian antara hasil prediksi dan data hasil pengukuran. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan model propagasi radio yang lebih adaptif terhadap karakteristik lingkungan lokal serta menjadi referensi dalam proses perencanaan dan optimasi jaringan komunikasi nirkabel, khususnya pada kawasan perkotaan yang memiliki tingkat kompleksitas propagasi yang tinggi (Rayadin et al., 2024).

1.2. Tujuan penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis model propagasi ECC-33 yang adaptif menggunakan *Genetic Algorithm* untuk mengoptimalkan parameter model dalam memprediksi path loss di lingkungan perkotaan.
2. Menganalisis tingkat akurasi model ECC-33 Adaptif yang dikembangkan menggunakan *Genetic Algorithm* dalam memprediksi path loss berdasarkan parameter evaluasi, *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Root Mean Square Error* (RMSE) dan (MSE) *Mean Squared Error*.
3. Menganalisis perbandingan model ECC-33 Adaptif hasil optimasi menggunakan *Genetic Algorithm* mampu memberikan performa prediksi path loss yang lebih baik dibandingkan model ECC-33 konvensional pada lingkungan perkotaan.

1.3. Batasan Masalah

Penelitian difokuskan pada pengembangan model ECC-33 adaptif menggunakan *Genetic Algorithm* untuk meningkatkan akurasi prediksi *path loss* pada lingkungan perkotaan.

1. Model Propagasi

Penelitian ini hanya menggunakan model propagasi empiris ECC-33 sebagai model dasar yang akan dikembangkan menjadi model adaptif melalui optimasi parameter menggunakan *Genetic Algorithm* (GA).

2. Metode Optimasi

Proses optimasi parameter model ECC-33 hanya dilakukan menggunakan *Genetic Algorithm*, tanpa membandingkan dengan algoritma

optimasi seperti *Swarm Partikel* (PSO) dan *Optimization of Ant Colony* (ACO), maupun *Differential Evolution* (DE).

3. Data Penelitian

Data yang digunakan berasal dari hasil pengukuran lapangan (drive test), yang mencakup parameter propagasi seperti frekuensi operasi, jarak antara pemancar dan penerima, tinggi antena pemancar dan penerima, dan nilai kehilangan jalur hasil pengukuran.

4. Lokasi Penelitian

Penelitian difokuskan pada lingkungan perkotaan (*urban*) sehingga model yang dikembangkan hanya merepresentasikan karakteristik propagasi pada wilayah tersebut dan tidak mencakup lingkungan suburban maupun rural.

5. Parameter Evaluasi

Untuk mengetahui seberapa akurat hasil prediksi terhadap data pengukuran, kinerja model dinilai dengan menggunakan parameter statistik seperti, *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE) dan *Mean Square Error* (MSE).

1.4. Sistematika Penulisan

Rencana sistematis untuk laporan penelitian ini terdiri dari lima Bab, yang terdiri dari topik-topik berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian mengenai latar belakang penelitian yang menjelaskan pentingnya prediksi *path loss* dalam perencanaan jaringan komunikasi nirkabel serta alasan pengembangan model ECC-33 adaptif menggunakan *Genetic Algorithm*. Selain itu, bab ini memuat rumusan masalah, tujuan penelitian, keuntungan dan kerugian penelitian, dan sistematika penulisan sebagai pedoman penelitian.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi landasan teori yang mendukung penelitian, meliputi konsep dasar propagasi gelombang radio, pengertian dan karakteristik *path loss*, faktor-faktor yang memengaruhi propagasi sinyal di lingkungan

perkotaan, model propagasi empiris khususnya model ECC-33, konsep optimasi menggunakan Genetic Algorithm, penelitian-penelitian terdahulu yang relevan, serta kerangka berpikir penelitian yang menjadi dasar dalam pengembangan model ECC-33 adaptif.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode yang digunakan dalam penelitian, meliputi desain penelitian, lokasi dan waktu penelitian, sumber dan jenis data, tahapan pengumpulan data, proses prapengolahan (*preprocessing*) data, pengembangan model ECC-33 adaptif menggunakan *Genetic Algorithm*, tahapan optimasi parameter, implementasi model, serta metode evaluasi kinerja menggunakan parameter. Bab ini juga memuat diagram alir (*flowchart*) penelitian yang menggambarkan semua langkah penelitian secara sistematis, mulai dari pengumpulan data hingga analisis hasilnya.

BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil pengolahan dan analisis data penelitian yang telah dilakukan. Pembahasan diawali dengan hasil pengukuran lapangan dan karakteristik data yang diperoleh, kemudian dilanjutkan dengan hasil prediksi menggunakan model ECC-33 konvensional. Selanjutnya dibahas proses pengembangan model ECC-33 adaptif dan hasil optimasi parameter menggunakan *Genetic Algorithm*. Hasil prediksi model ECC-33 adaptif kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangan dan model ECC-33 konvensional. Pada bab ini juga dilakukan evaluasi kinerja model menggunakan nilai MAE, MSE, RMSE, dan R^2 untuk mengetahui tingkat akurasi model serta menganalisis pengaruh optimasi *Genetic Algorithm* terhadap kemampuan model dalam memprediksi *path loss* di lingkungan perkotaan.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

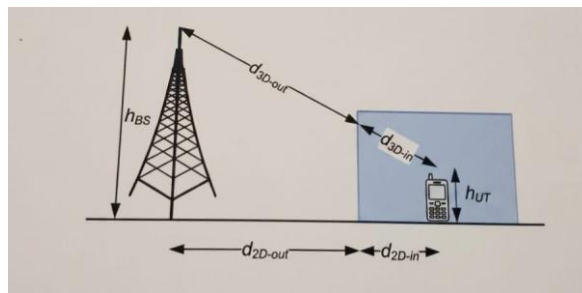
Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Kesimpulan memuat hasil utama terkait keakuratan model dan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap *path loss*.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Konsep Dasar Propagasi Gelombang Radio

Propagasi gelombang radio adalah proses perambatan gelombang radio melalui media saluran transmisi udara dari antenna pemancar ke antenna penerima yang dipisahkan oleh jarak dengan cakupan puluhan kilometer dan bahkan bisa mencapai ribuan kilometer, sistem komunikasi menggunakan media saluran udara ini biasa disebut saluran berupa non fisik atau *wireless* (Karakteristik Propagasi Gelombang et al., 2020).



Gambar 2. 1 Ilustrasi Pentransmisian Gelombang Radio di suatu jaringan

Propagasi gelombang radio ada dua kondisi yaitu, *Line of Sight* (LOS) adalah kondisi di mana sinyal ditransmisikan langsung dari pemancar ke penerima tanpa terhalang oleh objek fisik. Kondisi ini dianggap ideal dalam komunikasi nirkabel karena gangguan propagasi hanya dipengaruhi oleh faktor atmosfer, cuaca, atau karakteristik frekuensi yang digunakan. Pada lingkungan *Line of Sight* (LOS), sinyal dapat menjangkau jarak yang lebih jauh dengan kualitas yang lebih baik serta menghasilkan *throughput* yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada kondisi *Non-Line of Sight* (NLOS) terjadi ketika sinyal dari pemancar harus melewati berbagai hambatan sebelum mencapai penerima. Dalam kondisi ini, sinyal dapat mengalami pantulan, difraksi, refraksi, penyerapan, maupun hamburan sehingga menghasilkan *multipath*, yaitu sinyal

duplikat yang tiba di penerima dengan waktu, arah, dan kekuatan berbeda. Kondisi ini membuat sistem komunikasi NLOS lebih kompleks dibandingkan LOS, sehingga diperlukan teknik khusus untuk mengatasi permasalahan propagasi tersebut. Dengan demikian, keberadaan sistem NLOS yang andal berperan penting dalam menyederhanakan proses perencanaan jaringan serta mendukung optimalisasi pengelolaan cakupan layanan secara lebih efektif (Karangan, 2025).

2.1.1. Mekanisme Propagasi Gelombang

Mekanisme propagasi gelombang radio merupakan proses perambatan gelombang elektromagnetik dari antena pemancar menuju antena penerima melalui suatu lingkungan propagasi. Dalam sistem komunikasi seluler, gelombang radio tidak selalu merambat secara langsung karena dapat mengalami berbagai interaksi dengan objek yang berada di sepanjang lintasan propagasi. Interaksi tersebut menyebabkan perubahan daya sinyal yang diterima dan menjadi salah satu faktor yang memengaruhi nilai *path loss*.

Secara umum Sistem komunikasi bergerak atau biasa dikenal dengan *system cellular* menggunakan gelombang radio sebagai media untuk mengkoneksikan antara perangkat satu dengan yang lain. Pada konsep komunikasi dengan gelombang radio ini dikenal suatu mode propagasi. *Propagation model* atau model propagasi adalah suatu cara untuk memprediksi daya sinyal rata-rata. Ada tiga mekanisme dominan dari propagasi pada sistem komunikasi bergerak (*mobile*) yaitu pantulan (*reflection*), difraksi, dan hamburan (*scattering*), (Usman, 2018).

Pada lingkungan perkotaan, ketiga mekanisme tersebut dapat terjadi secara bersamaan. Banyaknya gedung, kendaraan, pepohonan, serta struktur lainnya menyebabkan sinyal yang diterima mengalami perubahan amplitudo dan fase. Akibatnya, daya sinyal yang diterima pada sisi *receiver* dapat berbeda meskipun jarak antara pemancar dan penerima relatif sama. Kondisi tersebut menyebabkan karakteristik propagasi di lingkungan perkotaan menjadi lebih kompleks dibandingkan lingkungan terbuka.

Mekanisme propagasi tersebut secara langsung berkaitan dengan path loss, karena setiap interaksi gelombang selama proses propagasi dapat menyebabkan pelemahan daya sinyal. Oleh karena itu, pemahaman mengenai mekanisme propagasi gelombang menjadi dasar dalam penggunaan model propagasi empiris, termasuk model ECC-33, untuk memperkirakan nilai *path loss* berdasarkan parameter seperti jarak, frekuensi, dan ketinggian antenna.

2.1.2. Faktor yang Memengaruhi Propagasi

Propagasi gelombang radio dipengaruhi oleh berbagai faktor yang menentukan besarnya daya sinyal yang diterima oleh *receiver*. Perubahan kondisi lingkungan dan parameter sistem dapat menyebabkan perbedaan karakteristik propagasi antara satu lokasi dengan lokasi lainnya. Dalam sistem komunikasi seluler, beberapa faktor utama yang memengaruhi propagasi adalah jarak, frekuensi, ketinggian antenna, serta kondisi lingkungan sekitar.

a) Jarak antara transmitter dan receiver

Jarak merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi propagasi gelombang radio. Semakin jauh jarak antara pemancar (*transmitter*) dan penerima (*receiver*), semakin besar pelemahan daya sinyal yang terjadi. Peningkatan jarak menyebabkan energi gelombang yang diterima oleh antenna penerima semakin kecil sehingga nilai *path loss* cenderung meningkat.

b) Frekuensi

Frekuensi memiliki pengaruh terhadap karakteristik perambatan gelombang radio. Perubahan frekuensi dapat menyebabkan perubahan tingkat pelemahan sinyal selama propagasi. Pada penelitian ini, frekuensi merupakan salah satu parameter yang digunakan dalam perhitungan model ECC-33 untuk memprediksi nilai *path loss*.

c) Ketinggian antenna

Ketinggian antenna pemancar (*base station*) dan penerima (*mobile station*) dapat memengaruhi kondisi propagasi. Antenna yang memiliki posisi lebih tinggi dapat mengurangi penghalang pada lintasan propagasi sehingga memungkinkan sinyal mencapai penerima dengan kondisi yang lebih baik. Parameter ketinggian

antena tersebut digunakan dalam komponen model ECC-33, khususnya dalam perhitungan pengaruh antena pemancar dan penerima.

d) Kondisi lingkungan

Lingkungan sekitar memiliki pengaruh yang besar terhadap propagasi gelombang radio. Pada wilayah perkotaan, keberadaan gedung, kendaraan, pepohonan, jalan, dan berbagai struktur lainnya dapat menyebabkan terjadinya *refleksi*, *difraksi*, dan hamburan. Kondisi tersebut dapat menyebabkan sinyal mengalami pelemahan maupun perubahan karakteristik sebelum mencapai penerima.

e) Objek penghalang

Objek yang berada di antara *transmitter* dan *receiver* dapat menghalangi lintasan langsung gelombang radio. Gedung, dinding, kendaraan, dan pepohonan dapat menyebabkan sebagian energi gelombang terhalang atau mengalami perubahan arah. Semakin kompleks penghalang pada lintasan propagasi, semakin besar kemungkinan terjadi variasi daya sinyal yang diterima.

2.1.3. Karakteristik Propagasi Gelombang Radio

Transmisi sinyal dalam sistem komunikasi nirkabel dipengaruhi oleh propagasi gelombang radio. Kualitas dan keandalan sinyal yang ditransmisikan ditentukan oleh karakteristik propagasi gelombang radio. Di daerah perkotaan, keberadaan bangunan, pohon, dan hambatan lainnya secara signifikan mempengaruhi karakteristik propagasi gelombang radio. Hambatan ini menyebabkan berbagai efek propagasi, seperti redaman sinyal, refleksi, difraksi, dan hamburan. Akibatnya, komunikasi yang andal di lingkungan perkotaan menimbulkan tantangan. Oleh karena itu penting untuk memahami perilaku propagasi gelombang radio di daerah perkotaan untuk mengoptimalkan desain jaringan nirkabel dan meningkatkan kinerja komunikasi.

Dengan kehadiran bangunan, pohon, dan struktur lainnya menciptakan lingkungan propagasi yang sangat dinamis dan kompleks di daerah perkotaan. Secara khusus, frekuensi yang lebih tinggi mengalami redaman sinyal yang signifikan karena efek penyerapan, *refleksi*, dan hamburan objek di lingkungan, yang menyebabkan penurunan kekuatan sinyal yang diterima. Konsentrasi padat

bangunan di daerah perkotaan memperkuat dampak redaman sinyal. *Refleksi* adalah efek propagasi signifikan lainnya di daerah perkotaan, di mana gelombang radio bertemu dengan bangunan atau struktur lain dan dipantulkan dan diarahkan ke berbagai arah, menyebabkan banyak jalur antara pemancar dan penerima, yang dikenal sebagai propagasi lintas jamak. Propagasi lintas jamak menyebabkan interferensi dan memudar, yang dapat memperburuk kualitas sinyal yang diterima. Interaksi sinyal langsung dan pantulan dapat mengakibatkan fluktuasi kekuatan sinyal dan mempengaruhi keandalan komunikasi nirkabel (Yassir et al., 2024).

2.2. Path Loss Pada Sistem Komunikasi Nirkabel

Path Loss adalah (melemah/hilangnya) kekuatan daya sinyal informasi yang dipancarkan oleh antena pengirim sinyal (Tx) menuju penerima (Rx) yang berlangsung selama data/sinyal melewati media udara dan terjadi selama proses transmisi sinyal berlangsung dari antena pengirim menuju penerima dalam jarak tertentu. Nilai *path loss* menunjukkan level sinyal yang melemah akibat mengalami (*attenuation*) yang disebabkan oleh propagasi ruang bebas (*free space*) seperti pantulan atau dikenal dengan *refleksi*, penguraian sinyal (*difraksi*) dan hamburan sinyal (*Scattering*).

Path loss dapat timbul karena disebabkan oleh banyak faktor, seperti kontur tanah, lingkungan yang berbeda, medium propagasi (udara yang kering atau lembab), jarak antara antena pemancar (Tx) dengan penerima (Rx). Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai level daya dan pathloss adalah jarak pengukuran antara (Tx) dan (Rx), tinggi antena (Tx dan Rx), serta jenis area pengukuran yang digunakan (Ulfah, 2016).

2.2.1. Pengertian Path Loss

Pathloss adalah besarnya redaman atau hilangnya daya sinyal selama proses transmisi gelombang radio dari pemancar ke penerima. Redaman ini merupakan gabungan antara redaman ruang bebas (*free space loss*) dan redaman tambahan akibat efek fading dari objek-objek di sekitar jalur propagasi. Faktor-faktor yang memengaruhi besarnya pathloss antara lain frekuensi sinyal, jarak antara pemancar dan penerima, serta kondisi lingkungan. Selain itu, parameter teknis seperti tinggi antena pemancar (h_{BS}) dan tinggi antena penerima (h_{UT}) juga berperan penting

dalam menentukan nilai *path loss* pada suatu jaringan komunikasi (Karangan, 2025).

2.2.2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Path Loss

Dalam studi telekomunikasi *Path Loss* (rugi-rugi lintasan) didefinisikan sebagai pengurangan kepadatan daya (*power density*) dari gelombang elektromagnetik saat ia merambat melalui ruang. Secara sederhana ini adalah selisih antara daya yang dikirim dan diterima oleh antena pengirim.

Berikut adalah penjelasan mendalam mengenai faktor-faktor yang mempengaruhinya:

1. Jarak Ruang Bebas

Redaman yang dihasilkan oleh media transmisi sebagai hasil dari penyebaran energi sinyal yang dipancarkan disebut redaman ruang bebas. Sinyal akan berpropagasi atau lepas ke udara saat meninggalkan antena. Propagasi akan diatur oleh antena yang digunakan. Sangat penting untuk memastikan bahwa jalur antara dua antena ini tidak terhalang di frekuensi 2.4 GHz.

2. Daerah Urban

Adalah daerah wilayah yang dipadati penduduk dengan bangunan-bangunan besar dan memiliki gedung-gedung yang rapat serta tinggi misalnya daerah pusat kota baik metropolis maupun kota menengah dan memiliki ciri-ciri.

- a. Gedung- gedung yang terdapat di daerah tersebut terbuat dari kerangka logam dan dindingnya terbuat dari beton yang tebal yang mengakibatkan pembatasan terhadap propagasi radio yang melalui jalur tersebut.
- b. Karena gedung-gedung bangunan yang tinggi sehingga menyebabkan kemungkinan terjadinya penguraian sinyal (*difraksi*) pada propagasi sinyal sangat kecil.
- c. Sinyal radio dalam perambatannya mengalami pantulan dengan redaman tertentu.
- d. Redaman oleh pepohonan (*foliage loss*) diabaikan karena pepohonan yang sangat jarang.

3. Daerah Sub Urban

Adalah kategori daerah yang memiliki jumlah bangunan yang mulai padat dan tinggi rata-rata bangunan antara 12 – 20 m dan lebar 18–30 m. Contoh: pinggiran kota dan kota- kota kecil.

Daerah sub urban memiliki ciri-ciri antara lain:

- a. Tingkat halangan (*obstacle*) lebih rendah disbanding daerah urban sehingga propagasi sinyal radio relative lebih baik dan median kuat sinyal tinggi.
- b. Gedung-gedung bangunannya realtif rendah sehingga propagasi mengalami difraksi oleh puncak gedung.
- c. Pada jalan raya tidak terlalu padat oleh pengguna kendaraan.

4. Daerah Rural

Adalah kategori jenis wilayah yang memiliki jumlah bangunan sedikit dan jarang atau dapat berupa alam terbuka misalnya pedesaan pada jenis lintasan propagasi ini memiliki sedikit penghalang (*obstacle*), daerah ebas sepanjang 300 - 400 m (tanah pertanian, ladang-ladang, dan lapangan terbuka). Adapun ciri –ciri daerah rural antara lain.

- a. Daerah sinyal yang diterima lebih besar dibandingkan dengan daerah urban dan sub urban karena jumlah penghalang yang sedikit.
- b. Memiliki ruas jalan yang lebar.
- c. Lalu lintas pergerakan kendaraan tinggi karena sedikitnya jumlah pengendara.

2.3. Model Propagasi Empiris

Model propagasi empiris merupakan model matematis yang dikembangkan berdasarkan hasil pengukuran lapangan (*field measurement*) untuk memperkirakan besarnya *path loss* pada suatu lingkungan propagasi. Berbeda dengan model deterministik yang memerlukan informasi detail mengenai kondisi geografis, bangunan, maupun karakteristik medan, model empiris dibangun melalui pendekatan statistik dari data hasil pengukuran sehingga memiliki bentuk persamaan yang lebih sederhana dan mudah diterapkan. Oleh karena itu model propagasi empiris banyak digunakan dalam

proses perencanaan jaringan komunikasi nirkabel karena mampu memberikan estimasi *path loss* dengan kompleksitas komputasi yang relatif rendah (Michael S. Mollel, 2023).

Salah satu model propagasi empiris yang paling umum digunakan dalam sistem komunikasi broadband adalah *Electronic Communications Committee 33 (ECC-33)*. Model ini merupakan pengembangan dari model Okumura yang dirancang untuk memperluas penerapan prediksi propagasi pada frekuensi yang lebih tinggi, khususnya untuk sistem *Fixed Wireless Access (FWA)*. Dibandingkan model empiris lainnya, ECC-33 mempertimbangkan pengaruh frekuensi, jarak propagasi, tinggi antena pemancar, dan tinggi antena penerima dalam perhitungan *path loss*, sehingga mampu memberikan estimasi yang lebih baik pada beberapa kondisi lingkungan perkotaan.

Model ECC-33 memiliki beberapa karakteristik utama, yaitu menggunakan formulasi empiris yang relatif sederhana, memiliki kompleksitas komputasi yang rendah, serta mudah diimplementasikan dalam perangkat lunak simulasi maupun pemrograman. Selain itu, model ini banyak diterapkan pada penelitian propagasi jaringan seluler dan *fixed wireless* karena mampu menghasilkan prediksi yang cukup baik pada rentang frekuensi UHF hingga beberapa gigahertz. Namun demikian, parameter-parameter dalam model ECC-33 bersifat tetap sehingga akurasinya dapat menurun ketika diterapkan pada lingkungan yang memiliki karakteristik propagasi berbeda dari lokasi pengembangan model. Hal tersebut menyebabkan hasil prediksi sering kali mengalami *overestimate* maupun *underestimate* terhadap data hasil pengukuran lapangan.

Seiring berkembangnya teknologi komunikasi nirkabel, berbagai penelitian mulai mengembangkan model ECC-33 melalui proses optimasi parameter agar lebih sesuai dengan karakteristik lingkungan lokal. Pendekatan ini bertujuan mempertahankan kesederhanaan model empiris sekaligus meningkatkan akurasi prediksi *path loss*. Dalam penelitian ini pengembangan dilakukan menggunakan *Genetic Algorithm (GA)* untuk memperoleh parameter optimum sehingga menghasilkan model ECC-33 adaptif yang diharapkan dapat

memberikan prediksi kehilangan jalur yang lebih akurat di lingkungan perkotaan dibandingkan dengan model ECC-33 standar (Milud Moftah Mohamed Daw, 2023).

2.4. Model ECC-33

Model ECC-33 dikembangkan oleh *Electronic Communication Committee* (ECC) yang merupakan ekstrapolasi dari data pengukuran Okumura Hata. Model ini diadaptasi untuk kategori kota medium dan kota besar. Pada model ini terdapat faktor koreksi untuk suburban dan open area. Model ini dapat digunakan untuk prediksi *path loss* pada frekuensi 700 MHz sampai 3,5 GHz. (Fadhli, 2020):

Perhitungan model ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu *Free Space Attenuation* (A_{fs}), *Basic Median Path Loss* (A_{bm}), *Base Station Antenna Gain* (G_b), dan *Mobile Station Antenna Gain* (G_r). Keempat komponen tersebut kemudian digunakan untuk memperoleh nilai *path loss* ECC-33.

2.4.1. Free Space Attenuation (A_{fs})

Free Space Attenuation (A_{fs}) merupakan komponen yang menggambarkan pelemahan daya sinyal akibat propagasi gelombang pada ruang bebas. Nilai A_{fs} dipengaruhi oleh jarak antara *transmitter* dan *receiver* serta frekuensi operasi. Semakin jauh jarak propagasi dan semakin tinggi frekuensi, maka pelemahan sinyal pada ruang bebas cenderung semakin besar.

Persamaan A_{fs} pada model ECC-33 adalah:

$$A_{fs} = 92,4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \quad (2.1)$$

dengan:

A_{fs} = *Free Space Attenuation* (dB)

d = jarak antara transmitter dan receiver (km)

f = frekuensi operasi (MHz)

Pada penelitian ini, nilai d dan f diperoleh dari data pengukuran lapangan.

2.4.2. Basic Median Path Loss (A_{bm})

Basic Median Path Loss (A_{bm}) merupakan komponen model ECC-33 yang menggambarkan karakteristik dasar kehilangan daya sinyal berdasarkan jarak dan frekuensi. Komponen ini memperhitungkan pengaruh lingkungan propagasi melalui hubungan matematis antara jarak dan frekuensi operasi.

Persamaan A_{bm} adalah:

$$A_{bm} = 20,41 + 9,83 \log_{10}(d) + 7,894 \log_{10}(f) + 9,56 [\log_{10}(f)]^2 \quad (2.2)$$

dengan:

A_{bm} = *Basic Median Path Loss* (dB)

d = jarak propagasi (km)

f = frekuensi operasi (MHz)

Nilai A_{bm} selanjutnya digunakan sebagai salah satu komponen utama dalam menentukan *path loss* total model ECC-33.

2.4.3. Base Station Antenna Gain (G_b)

Base Station Antenna Gain (G_b) merupakan komponen yang memperhitungkan pengaruh ketinggian antena *base station* terhadap propagasi sinyal. Dalam model ECC-33, nilai G_b dipengaruhi oleh tinggi antena *base station* (h_b) dan jarak propagasi (d).

Persamaannya adalah:

$$G_b = \log_{10} \left(\frac{h_b}{200} \right) [13,958 + 5,8 (\log_{10}(d)^2) \log_{10} d]^2 \quad (2.3)$$

dengan:

G_b = *Base Station Antenna Gain* (dB)

h_b = tinggi antena *base station* (m)

d = jarak propagasi (km)

Komponen G_b kemudian dikurangkan dalam persamaan akhir ECC-33 karena merupakan faktor penguatan yang berkaitan dengan antena *base station*.

2.4.4. Mobile Station Antenna Gain (G_r)

Mobile Station Antenna Gain (G_r) merupakan komponen yang memperhitungkan pengaruh ketinggian antena pada sisi *mobile station*. Nilai G_r dipengaruhi oleh frekuensi operasi dan tinggi antena *mobile station* (h_m).

Persamaannya adalah:

$$G_r = [42, 57 + 13, 7\log_{10}(f)] [\log_{10}(h_m) - 0, 585] \quad (2.4)$$

dengan:

G_r = Mobile Station Antenna Gain (dB)

f = frekuensi operasi (MHz)

hm = tinggi antena mobile station (m)

Nilai G_r digunakan dalam perhitungan *path loss* akhir dan dikurangkan dari komponen A_f s dan A_{bm} .

2.4.5. Persamaan Path Loss Model ECC-33

Setelah seluruh komponen diperoleh, nilai *path loss* model ECC-33 dihitung dengan menjumlahkan A_f s dan A_{bm} , kemudian mengurangkan G_b dan G_r .

Persamaan utamanya adalah:

$$PL_{ECC-33} = A_f + A_{bm} - G_b - G_r \quad (2.5)$$

Maka:

$$PL_{ECC-33} = 92,4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20,41 + 9,83 \log_{10}(d) + 7,894 \log_{10}(f) + 9,56[\log_{10}(f)]^2 - \log_{10}\left(\frac{hb}{200}\right) [13,958 + 5,8(\log_{10}(d))^2 \log_{10}(d)^2] - [42,57 + 13,7\log_{10}(f)] [\log_{10}(h_m) - 0,585]$$

Dengan demikian, input utama model ECC-33 dalam penelitian Anda adalah:

$$d, f, h_b, h_m$$

yang menghasilkan:

$$A_f, A_{bm}, G_b, G_r$$

dan akhirnya menghasilkan:

$$PL_{ECC-33}$$

Pada penelitian ini, model ECC-33 digunakan sebagai model dasar untuk memprediksi *path loss* berdasarkan data pengukuran pada lingkungan perkotaan.

Hasil prediksi model ECC-33 kemudian dibandingkan dengan nilai *path loss* hasil pengukuran lapangan untuk mengetahui tingkat kesalahan prediksi. Namun, penggunaan parameter standar ECC-33 belum tentu memberikan hasil prediksi yang optimal pada setiap karakteristik lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan model tersebut menjadi ECC-33 Adaptif, dengan menambahkan parameter bobot pada masing-masing komponen model. Selanjutnya, nilai bobot tersebut dioptimasi menggunakan *Genetic Algorithm* (GA) agar prediksi *path loss* lebih sesuai dengan karakteristik lingkungan perkotaan pada lokasi penelitian.

2.4.6. Batasan Dan Kelebihan Model Propagasi ECC-33

Model propagasi ECC-33 memiliki beberapa kelebihan yang menjadikannya banyak digunakan dalam penelitian propagasi gelombang radio. Model ini menggunakan formulasi matematis yang relatif sederhana sehingga mudah diimplementasikan dalam perangkat lunak simulasi maupun bahasa pemrograman. Selain itu model ECC-33 hanya memerlukan beberapa parameter dasar, seperti frekuensi, jarak propagasi, tinggi antenna pemancar, dan tinggi antenna penerima, sehingga proses perhitungan dapat dilakukan dengan efisien. Karakteristik tersebut menjadikan model ECC-33 sesuai digunakan pada tahap awal perencanaan jaringan komunikasi nirkabel karena mampu memberikan estimasi *path loss* dengan kompleksitas komputasi yang rendah.

Di sisi lain, model ECC-33 juga memiliki beberapa batasan. Parameter-parameter yang digunakan bersifat tetap karena diperoleh dari hasil pengukuran pada lingkungan tertentu, sehingga model belum mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan karakteristik propagasi di lokasi lain. Pada lingkungan perkotaan yang memiliki kepadatan bangunan tinggi, variasi topografi, dan kondisi propagasi yang kompleks, hasil prediksi model ECC-33 dapat mengalami penyimpangan terhadap data hasil pengukuran. Selain itu, model ini belum mempertimbangkan pengaruh faktor dinamis seperti kondisi cuaca, mobilitas pengguna, vegetasi, maupun interferensi dari sistem komunikasi lainnya, sehingga akurasinya dapat menurun pada kondisi lingkungan yang sangat beragam.

Meskipun memiliki keterbatasan, model ECC-33 masih banyak diterapkan dalam penelitian prediksi *path loss* karena mampu memberikan hasil yang cukup baik pada berbagai skenario propagasi. Model ini sering digunakan sebagai dasar pengembangan model propagasi adaptif melalui penerapan metode optimasi maupun kecerdasan buatan. Dalam penelitian ini model ECC-33 dipilih sebagai model dasar karena memiliki struktur matematis yang sederhana dan parameter yang dapat dioptimalkan menggunakan *Genetic Algorithm (GA)*.

2.5. Pengembangan Model ECC-33 Adaptif

Model ECC-33 adaptif merupakan pengembangan dari model ECC-33 konvensional yang dilakukan untuk menyesuaikan kemampuan prediksi *path loss* dengan karakteristik lingkungan perkotaan tempat pengukuran dilakukan. Pada model ECC-33 konvensional, perhitungan *path loss* menggunakan komponen *Free Space Attenuation (Afs)*, *Basic Median Path Loss (Abm)*, *Base Station Antenna Gain (Gb)*, dan *Mobile Station Antenna Gain (Gr)* dengan parameter yang bersifat tetap. Kondisi tersebut dapat menyebabkan hasil prediksi kurang sesuai ketika karakteristik lingkungan berbeda dengan kondisi yang menjadi dasar pembentukan model.

Pengembangan model adaptif dilakukan dengan memberikan bobot pada setiap komponen model ECC-33 serta menambahkan suatu konstanta koreksi. Bentuk persamaan yang digunakan adalah:

$$PL_{Adaptif} = w_1 A_{fs} + w_2 A_{bm} - w_3 G_b - w_4 G_r + w_5 \quad (2-6)$$

Keterangan:

$PL_{ECC-33 Adaptif}$ = path loss hasil prediksi model ECC-33 Adaptif (dB)

A_{fs} = faktor path loss ruang bebas

A_{bm} = faktor gain atau koreksi berdasarkan frekuensi dan jarak

G_b = gain antenna pemancar

G_r = gain antenna penerima

w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 = parameter bobot dan konstanta koreksi model.

Parameter w_1 sampai w_4 berfungsi untuk menyesuaikan pengaruh masing-masing komponen ECC-33 terhadap nilai *path loss*, sedangkan w_5 berfungsi sebagai konstanta koreksi yang dapat menggeser hasil prediksi sehingga lebih mendekati data hasil pengukuran. Nilai parameter tersebut tidak ditentukan secara manual, tetapi dicari melalui proses optimasi menggunakan *Genetic Algorithm* berdasarkan data pengukuran lapangan.

Dalam penelitian ini, proses pengembangan model adaptif dilakukan dengan menggunakan variabel hasil pengukuran berupa jarak antara pemancar dan penerima, frekuensi, tinggi antenna *Base Station*, tinggi antenna *Mobile Station*, serta nilai *path loss* hasil pengukuran. Data tersebut digunakan untuk menghitung komponen Af_s , A_{bm} , G_b , G_r , kemudian *Genetic Algorithm* mencari kombinasi nilai w_1 , w_2 , w_3 , w_4 , w_5 yang menghasilkan kesalahan prediksi terkecil terhadap data pengukuran.

Dengan demikian, model ECC-33 adaptif diharapkan mampu memberikan hasil prediksi *path loss* yang lebih sesuai dengan kondisi lingkungan perkotaan dibandingkan model ECC-33 konvensional. Pengembangan ini menjadi dasar untuk tahap optimasi menggunakan *Genetic Algorithm* pada penelitian selanjutnya.

2.6. Algoritma Genetika

Algoritma genetika dikembangkan pada tahun 1975 di Universitas Michigan oleh Jhon Holland. Algoritma genetika dapat diartikan sebagai algoritma yang menggunakan proses seleksi alam, atau bisa juga disebut proses evolusi sebagaimana yang diutarakan oleh Charles Darwin. Individu akan melakukan perubahan gen secara terus-menerus hingga sesuai dengan lingkungannya.

Algoritma genetika tidak dapat dipastikan akan selalu mencapai hasil terbaik, akan tetapi metode ini berkali-kali menanggulangi masalah dengan hasil baik. Algoritma genetika dapat mewakili solusi untuk masalah seperti kromosom. Berikut ini adalah beberapa aspek penting dari algoritma genetika, seperti memahami fungsi fitness, memahami dan menerapkan representasi genetika, serta memahami dan menjalankan operasi genetika. Ketiga aspek tersebut sangat membantu dalam menunjang performa algoritma genetika.

Populasi yang besar merupakan keuntungan yang jelas bagi algoritma genetika. Algoritma genetika adalah teknik penelitian dan optimasi yang berfungsi untuk meniru perubahan dalam proses evolusi dan komposisi genetik suatu organisme. Prinsip kerja algoritma genetika memperlakukan individu sebagai populasi baru, populasi generasi, melalui perkawinan dan mutasi. Persilangan atau mutasi terus terjadi sampai populasi baru kembali ke nilai yang sebanding (Metode et al., 2020).

Pada penelitian ini, *Genetic Algorithm* digunakan untuk mencari kombinasi parameter (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) yang paling sesuai sehingga model ECC-33 adaptif mampu menghasilkan nilai *path loss* yang mendekati hasil pengukuran lapangan. Proses optimasi dilakukan secara iteratif dengan membentuk sejumlah kandidat solusi dan memperbaikinya dari satu generasi ke generasi berikutnya. Dalam penerapannya pada model ECC-33 adaptif, setiap kandidat solusi terdiri atas lima nilai parameter yang direpresentasikan sebagai sebuah kromosom. Kelima nilai tersebut adalah:

$$X = w_1, w_2, w_3, w_4, w_5$$

Setiap nilai (w) disebut sebagai gen, sedangkan sekumpulan lima gen tersebut membentuk satu kromosom atau individu. Sebagai contoh, satu individu dapat direpresentasikan sebagai:

$$X = [0, 80; 1, 10; 0,90; 1, 20; 0,15]$$

Nilai tersebut merupakan kandidat parameter yang akan digunakan pada persamaan ECC-33 adaptif. GA kemudian mengevaluasi apakah kombinasi tersebut mampu menghasilkan prediksi *path loss* yang mendekati nilai pengukuran. Dalam penelitian ini, individu terbaik berisi lima parameter:

$$K_{best} = [w_1, w_2, w_3, w_4, w_5]$$

Berdasarkan hasil optimasi pada penelitian, diperoleh nilai:

$$w_1 = 0,371241692$$

$$w_2 = 0,463230688$$

$$w_3 = -0,592784177$$

$$w_4 = 0,004672184$$

$$w_5 = -0,591332968$$

Kelima parameter tersebut kemudian digunakan pada model ECC-33 adaptif untuk menghasilkan nilai prediksi *path loss*. Secara keseluruhan, proses optimasi dapat diringkas sebagai berikut. Data hasil pengukuran digunakan sebagai acuan, kemudian GA membentuk populasi awal yang terdiri dari kandidat (w_1 , w_2 , w_3 , w_4 , w_5). Setiap kandidat dimasukkan ke dalam persamaan ECC-33 adaptif untuk memperoleh nilai *path loss* prediksi. Hasil prediksi dibandingkan dengan nilai pengukuran dan dihitung nilai RMSE sebagai *fitness*. Individu dengan kinerja lebih baik dipilih, kemudian dilakukan *crossover* dan mutasi untuk menghasilkan populasi baru. Siklus tersebut diulangi sampai jumlah generasi yang ditentukan tercapai. Individu dengan RMSE terkecil dipilih sebagai parameter optimal model ECC-33 adaptif.

2.7. Optimasi Parameter Model ECC-33 Adaptif Menggunakan (GA)

Optimasi parameter model ECC-33 dilakukan menggunakan *Genetic Algorithm* (GA) untuk mendapatkan nilai parameter yang paling sesuai dengan karakteristik data pengukuran. Parameter yang dioptimasi adalah w_1 sampai w_5 , yang digunakan sebagai bobot penyesuaian pada model ECC-33 Adaptif. Proses ini bertujuan agar hasil prediksi *path loss* lebih mendekati nilai *path loss* hasil pengukuran.

Dalam proses optimasi, GA menghasilkan berbagai kombinasi nilai w_1 sampai w_5 . Setiap kombinasi kemudian diuji berdasarkan tingkat kesalahan antara nilai prediksi dan nilai pengukuran. RMSE digunakan sebagai fungsi evaluasi (*fitness*), sehingga kombinasi parameter dengan nilai RMSE paling kecil dianggap sebagai solusi terbaik.

Proses seleksi, *crossover*, dan mutasi, GA secara bertahap mencari kombinasi parameter yang menghasilkan kesalahan prediksi paling rendah. Parameter terbaik yang diperoleh selanjutnya digunakan dalam model ECC-33 Adaptif. Dengan cara tersebut, model ECC-33 dapat menyesuaikan diri

dengan karakteristik lingkungan perkotaan pada lokasi penelitian sehingga diharapkan menghasilkan prediksi *path loss* yang lebih akurat.

Melalui proses optimasi tersebut diharapkan diperoleh kombinasi parameter yang mampu meminimalkan selisih antara nilai *path loss* hasil prediksi dan data pengukuran. Dengan demikian, model ECC-33 adaptif tidak hanya mempertahankan efisiensi komputasi dari model empiris, tetapi juga meningkatkan kemampuan prediksi pada lingkungan perkotaan yang memiliki karakteristik propagasi lebih kompleks. Hasil pengembangan ini diharapkan dapat mendukung proses perencanaan jaringan komunikasi nirkabel yang lebih akurat dan efisien (Milud Moftah Mohamed Daw, 2023).

2.8. Evaluasi Kinerja Model Prediksi

Evaluasi kinerja model prediksi merupakan tahapan penting dalam penelitian untuk mengetahui tingkat akurasi model yang dikembangkan dalam memperkirakan nilai *path loss*. Proses evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi model terhadap data hasil pengukuran (*measured path loss*) yang diperoleh dari lapangan. Selisih antara nilai prediksi dan nilai pengukuran digunakan sebagai dasar untuk menilai kemampuan model dalam merepresentasikan kondisi propagasi yang sebenarnya. Semakin kecil perbedaan antara hasil prediksi dan data pengukuran, maka semakin baik performa model yang dikembangkan.

Dalam penelitian ini, evaluasi kinerja dilakukan menggunakan tiga parameter statistik yang umum digunakan pada penelitian prediksi *path loss*, yaitu *Root Mean Square Error (RMSE)*, *Mean Absolute Error (MAE)*, dan *MSE (Mean Squared Error)*. *RMSE* digunakan untuk mengukur besarnya rata-rata kesalahan prediksi dengan memberikan bobot yang lebih besar terhadap kesalahan yang memiliki nilai tinggi. Semakin kecil nilai *RMSE*, semakin baik kemampuan model dalam memprediksi *path loss*. Sementara itu, *MAE* digunakan untuk menghitung rata-rata nilai absolut dari selisih antara hasil prediksi dan data pengukuran. Berbeda dengan *RMSE*, *MSE* memberikan gambaran langsung mengenai besarnya kesalahan rata-rata tanpa memberikan penekanan lebih terhadap kesalahan yang ekstrem.

2.7.1. Root Mean Square Error (RMSE)

Root Mean Square Error (RMSE) merupakan salah satu parameter evaluasi yang digunakan untuk mengukur tingkat akurasi suatu model prediksi, termasuk dalam prediksi path loss pada sistem komunikasi LRT urban. RMSE mengukur besarnya rata-rata kesalahan antara nilai prediksi dan nilai aktual dengan memberikan penalti lebih besar terhadap *error* yang signifikan. Hal ini menjadikan RMSE sangat sensitif terhadap adanya *outlier* atau kesalahan besar dalam prediksi, sehingga cocok digunakan untuk mengevaluasi performa model yang diharapkan memiliki tingkat presisi tinggi.

$$RMSE = \sqrt{\left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2 \right\}} \quad (2.7)$$

Keterangan:

n = jumlah data yang digunakan.

i = indeks atau urutan data ke- i .

P_i = nilai *path loss* hasil prediksi pada data ke- i .

M_i = nilai *path loss* hasil pengukuran pada data ke- i .

$P_i - M_i$ = selisih antara nilai prediksi dan nilai pengukuran.

$(P_i - M_i)^2$ = kuadrat dari selisih prediksi dan pengukuran.

Secara matematis, RMSE dihitung dengan mengambil akar kuadrat dari rata-rata kuadrat selisih antara nilai prediksi dan nilai aktual. Proses ini dimulai dengan menghitung selisih (*error*) pada setiap data, kemudian dikuadratkan untuk menghilangkan nilai negatif, selanjutnya dirata-ratakan, dan akhirnya diakarkan.

Nilai RMSE yang lebih kecil menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kesalahan yang rendah, sehingga prediksi yang dihasilkan semakin mendekati nilai aktual. Oleh karena itu, RMSE sering digunakan sebagai indikator utama dalam proses optimasi model, termasuk dalam penentuan bobot optimal pada pendekatan hybrid.

2.7.2. Mean Absolute Error (MAE)

Mean Absolute Error (MAE) adalah metode evaluasi yang mengukur rata-rata dari kesalahan absolut antara nilai prediksi dan nilai sebenarnya.

MAE memiliki kelebihan karena hasilnya disajikan dalam satuan yang sama dengan target variabel, memudahkan interpretasi secara langsung. Ini membuatnya lebih intuitif dibandingkan beberapa metrik lain, terutama untuk pemahaman non-teknis.

Sebaliknya, *Mean Absolute Error* (MAE) menyajikan kesalahan dalam bentuk persentase, yang sangat berguna untuk membandingkan performa model di berbagai dataset dengan skala yang berbeda. Persentase yang dihasilkan membuat MAE lebih mudah dipahami dalam konteks evaluasi relatif.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - M_i| \quad (2.8)$$

n = jumlah data yang digunakan.

i = indeks atau urutan data ke-i.

Pi = nilai *path loss* hasil prediksi pada data ke-i.

Mi = nilai *path loss* hasil pengukuran pada data ke-i.

|Pi-Mi| = nilai absolut dari selisih antara prediksi dan pengukuran.

2.7.3. Mean Squared Error (MSE)

Rata-rata perbedaan yang dikuadratkan diantara nilai yang diramalkan dan yang diamati (MSE) dihitung dengan menghitung perbedaan antara nilai prediksi dan nilai aktual dan kemudian mengkuadratkan setiap perbedaan. memberikan gambaran tentang seberapa besar penyimpangan prediksi dari nilai aktual. Pengkuadratan ini juga berfungsi untuk memastikan bahwa nilai negatif tidak membatalkan nilai positif, serta untuk memberikan penalti lebih besar pada kesalahan yang lebih besar. Semakin kecil nilai MSE, semakin baik model dalam memprediksi nilai dengan akurat, dan sebaliknya, semakin besar nilai MSE menunjukkan adanya kesalahan yang lebih besar dalam prediksi. MSE sering digunakan dalam berbagai bidang seperti statistik, machine learning, dan data science untuk mengevaluasi performa model regresi atau prediksi.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2 \quad (2.9)$$

n = jumlah data yang digunakan.

i = indeks atau urutan data ke-i.

Pi = nilai *path loss* hasil prediksi pada data ke-i.

Mi = nilai *path loss* hasil pengukuran pada data ke-i.

$(P_i - M_i)^2$ = kuadrat selisih antara nilai prediksi dan nilai pengukuran.

2.9. Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti/Tahun	Metode/Model	Objek Penelitian	Hasil Penelitian
1	Ajose (2013)	Model propagasi empiris dan pendekatan optimasi	Prediksi path loss pada komunikasi nirkabel	Menunjukkan bahwa pendekatan pemodelan dapat digunakan untuk memperkirakan path loss berdasarkan karakteristik lingkungan dan parameter propagasi.
2	Imoize (2019)	Genetic Algorithm dan pemodelan propagasi	Prediksi/optimasi parameter propagasi	Genetic Algorithm dapat digunakan untuk mencari kombinasi parameter yang sesuai sehingga kinerja model dapat ditingkatkan.
3	Penelitian berbasis Okumura-Hata	Okumura-Hata	Prediksi path loss pada lingkungan komunikasi seluler	Model empiris Okumura-Hata dapat digunakan untuk melakukan estimasi path loss dengan formulasi yang relatif sederhana.
4	Penelitian berbasis COST-231 Hata	COST-231 Hata	Prediksi path loss lingkungan perkotaan	COST-231 Hata dapat digunakan untuk memperkirakan path loss pada lingkungan perkotaan dengan mempertimbangkan karakteristik propagasi tertentu.
5	Penelitian berbasis Machine Learning	Random Forest, ANN, SVM, dan XGBoost	Prediksi path loss berdasarkan data pengukuran	Metode machine learning mampu mempelajari hubungan antara parameter

				propagasi dan nilai path loss sehingga dapat meningkatkan kemampuan prediksi.
6	Penelitian ini	ECC-33 + Genetic Algorithm	Prediksi path loss lingkungan perkotaan	Mengembangkan model ECC-33 menjadi model adaptif dengan mencari parameter $w_1 - w_5$ yang optimal menggunakan Genetic Algorithm. Kinerja model dievaluasi menggunakan MAE, MSE, dan RMSE.

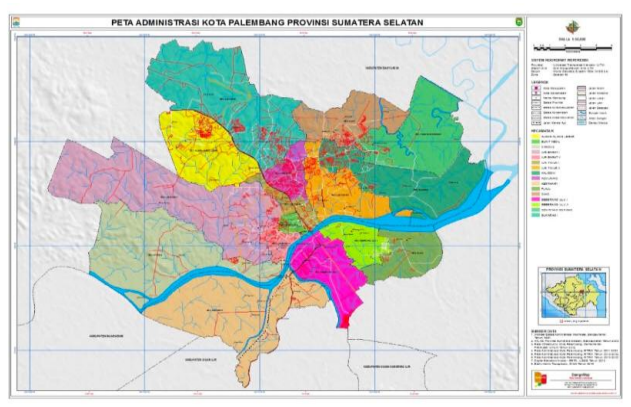
BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Lokasi Dan Objek Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada lingkungan perkotaan yang memiliki karakteristik propagasi gelombang radio yang kompleks, seperti kepadatan bangunan yang tinggi, keberadaan gedung bertingkat, jalan raya, serta berbagai objek yang dapat menyebabkan fenomena refleksi, difraksi, dan hamburan (*scattering*) sinyal radio. Pemilihan lingkungan perkotaan didasarkan pada tingginya variasi karakteristik propagasi dibandingkan dengan lingkungan suburban maupun rural, sehingga diperlukan model prediksi *path loss* yang lebih adaptif dan akurat.

Lokasi penelitian ditentukan berdasarkan ketersediaan data hasil pengukuran (*drive test*) pada area yang mewakili kondisi perkotaan. Data tersebut diperoleh melalui proses pengukuran lapangan menggunakan perangkat pengukuran sinyal atau berasal dari instansi, operator telekomunikasi, maupun sumber data penelitian yang telah tersedia. Pemilihan lokasi dilakukan dengan mempertimbangkan kesesuaian karakteristik wilayah terhadap ruang lingkup penelitian sehingga hasil pengembangan model dapat menggambarkan kondisi propagasi pada lingkungan perkotaan.



Gambar 3.1 Peta Lokasi Kota Palembang

Objek penelitian adalah model propagasi ECC-33 yang dikembangkan menjadi model adaptif menggunakan Genetic Algorithm (GA). Pengembangan dilakukan dengan mengoptimalkan parameter-parameter tertentu pada model ECC-33 sehingga mampu menghasilkan prediksi *path loss* yang lebih sesuai dengan data hasil pengukuran. Hasil pengembangan kemudian dibandingkan dengan model ECC-33 konvensional untuk mengetahui peningkatan tingkat akurasi prediksi yang diperoleh.

3.2. Teknik Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, literatur dipelajari dan data hasil pengukuran lapangan dikumpulkan.

3.2.1. Studi Literatur

Berbagai referensi tentang propagasi gelombang radio dikumpulkan untuk studi literatur, model propagasi empiris, model ECC-33, Genetic Algorithm, serta metode evaluasi prediksi *path loss*. Referensi diperoleh dari buku, jurnal nasional maupun internasional, *prosiding konferensi*, standar telekomunikasi, dan dokumen ilmiah lainnya. Tujuan dari tahap ini adalah untuk memperoleh dasar teori yang akan membantu pengembangan model.

3.2.2. Pengumpulan Data Pengukuran

Data penelitian berupa data hasil pengukuran *path loss* pada lingkungan perkotaan. Pengukuran dilakukan menggunakan metode *drive test* atau memanfaatkan dataset hasil pengukuran yang telah tersedia. Data yang dikumpulkan meliputi:

- a. Jarak antara pemancar dan penerima (m).
- b. Frekuensi operasi (MHz).
- c. Tinggi antena pemancar (m).
- d. Tinggi antena penerima (m).
- e. Koordinat lokasi pengukuran.
- f. Nilai daya sinyal terima (*Received Signal Strength*).
- g. Nilai *path loss* hasil pengukuran.

Seluruh data yang diperoleh kemudian diperiksa kelengkapannya, dibersihkan dari data yang tidak valid, dan dipersiapkan untuk proses optimasi menggunakan Genetic Algorithm.

3.3. Jenis Dan Variabel Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif karena menggunakan data hasil pengukuran untuk melakukan perhitungan dan evaluasi prediksi *path loss*. Penelitian dilakukan dengan membandingkan nilai *path loss* hasil pengukuran (*measured path loss*) dengan nilai prediksi yang dihasilkan oleh model ECC-33 Adaptif yang dioptimasi menggunakan *Genetic Algorithm* (GA). Hasil perbandingan tersebut digunakan untuk mengetahui tingkat akurasi model dalam menggambarkan kondisi propagasi sinyal pada lingkungan perkotaan.

Variabel penelitian terdiri dari variabel bebas (*independent variable*) dan variabel terikat (*dependent variable*). Variabel bebas yang digunakan meliputi *frekuensi* (f), jarak antara pemancar dan penerima (d), tinggi antena pemancar (H_b), serta tinggi antena penerima (H_m). Variabel-variabel tersebut digunakan sebagai masukan dalam perhitungan model ECC-33 untuk memperoleh nilai prediksi *path loss*.

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah nilai *path loss* (dB) yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan. Nilai *path loss* hasil pengukuran digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi hasil prediksi model. Selain itu, parameter w_1 , w_2 , w_3 , w_4 , dan w_5 merupakan parameter optimasi yang dicari menggunakan Genetic Algorithm agar model ECC-33 dapat menyesuaikan diri dengan karakteristik data pengukuran. Evaluasi kinerja model dilakukan menggunakan nilai MAE, MSE, dan RMSE, dengan nilai kesalahan yang lebih kecil menunjukkan hasil prediksi yang lebih baik.

3.3.1. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimental. Pendekatan kuantitatif digunakan karena seluruh proses analisis dilakukan berdasarkan data numerik hasil pengukuran propagasi gelombang radio. Sementara itu, pendekatan eksperimental diterapkan melalui proses

pengembangan model ECC-33 menggunakan Genetic Algorithm dan pengujian performa model terhadap data pengukuran.

3.3.2. Variabel Penelitian

Variabel penelitian terdiri atas variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kendali.

a. Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas merupakan parameter yang digunakan sebagai masukan dalam model ECC-33, yaitu:

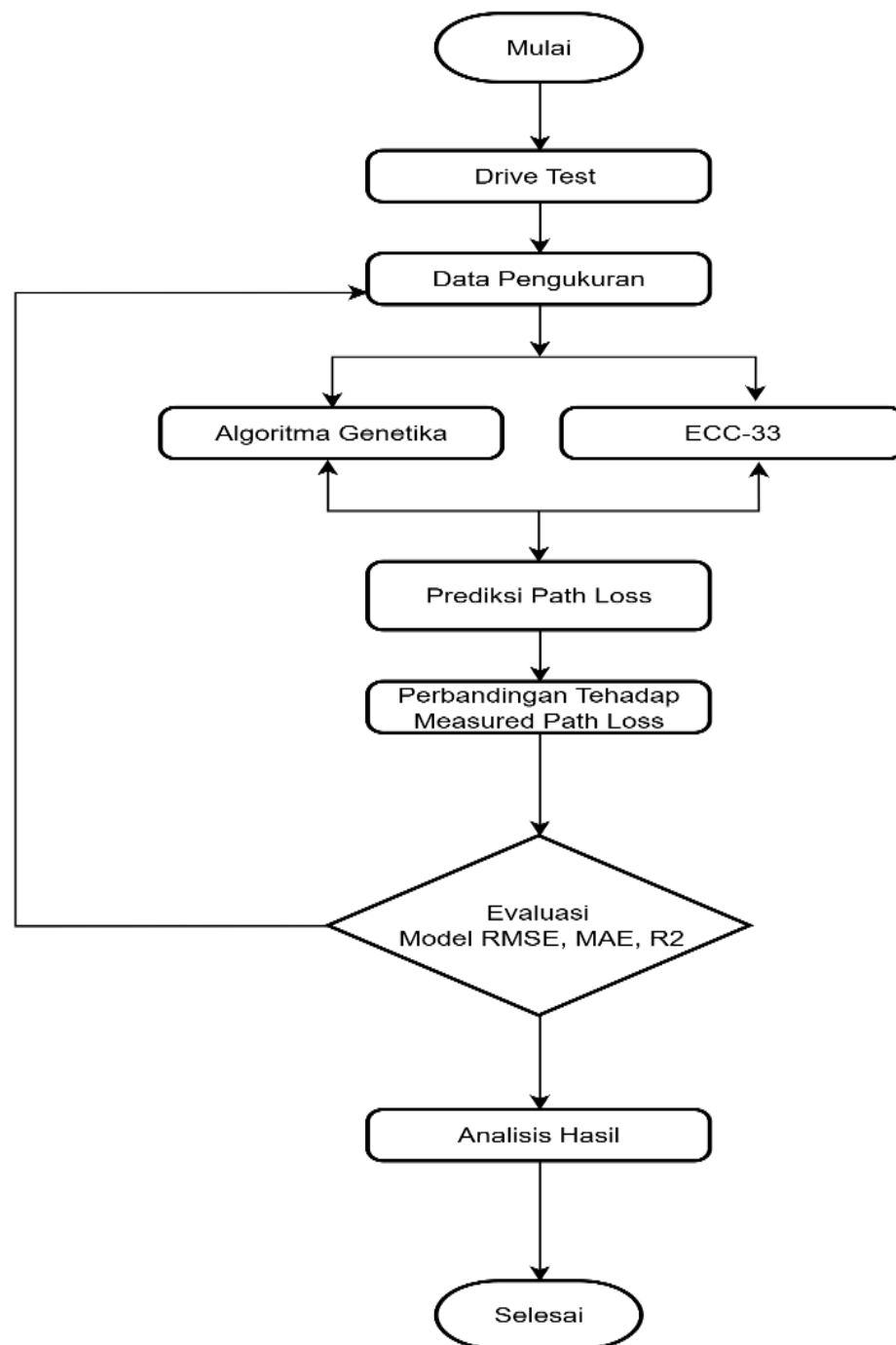
1. Frekuensi operasi (MHz).
2. Jarak antara pemancar dan penerima (km).
3. Tinggi antena pemancar (m).
4. Tinggi antena penerima (m).
5. Parameter hasil optimasi Genetic Algorithm.

b. Variabel Kendali (*Control Variable*)

Variabel kendali digunakan untuk menjaga konsistensi proses penelitian, meliputi:

1. Model dasar yang digunakan adalah ECC-33.
2. Lingkungan penelitian dibatasi pada wilayah perkotaan.
3. Algoritma optimasi yang digunakan adalah Genetic Algorithm.
4. Parameter evaluasi menggunakan RMSE, MAE, dan MSE.

3.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian

BAB 4

DATA, PERHITUNGAN, PEMBAHASAN DAN ANALISA

4.1. Data Hasil Pengukuran Lapangan

Hasil pengukuran lapangan diperoleh melalui kegiatan drive test pada lingkungan perkotaan untuk mendapatkan data aktual mengenai kualitas penerimaan sinyal dan nilai *path loss* antara pemancar (*Base Station*) dan penerima (*Mobile Station*). Pengukuran dilakukan pada beberapa titik dengan jarak yang berbeda dari pemancar. Data yang diperoleh kemudian digunakan sebagai data acuan dalam proses perhitungan dan evaluasi model ECC-33 serta model ECC-33 yang telah dioptimasi menggunakan Genetic Algorithm (GA).

Parameter yang dicatat selama pengukuran meliputi jarak antara pemancar dan penerima, frekuensi operasi, tinggi antenna *Base Station* (h_b), tinggi antenna *Mobile Station* (h_m), serta nilai *path loss* hasil pengukuran. Jarak antara pemancar dan penerima menjadi salah satu parameter penting karena semakin jauh jarak propagasi, umumnya semakin besar rugi-rugi lintasan (*path loss*) yang terjadi.

Data hasil pengukuran lapangan selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai *path loss* menggunakan model ECC-33. Hasil perhitungan tersebut dibandingkan dengan nilai *path loss* aktual hasil pengukuran untuk mengetahui tingkat kesalahan prediksi model. Selanjutnya, parameter model ECC-33 dioptimasi menggunakan Genetic Algorithm agar model dapat menyesuaikan karakteristik propagasi pada lingkungan perkotaan yang menjadi lokasi penelitian.

4.1.1. Data Parameter Hasil Pengukuran

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data hasil pengukuran (*drive test*) pada lingkungan perkotaan yang memiliki karakteristik

propagasi gelombang radio yang kompleks. Dataset diperoleh dalam bentuk file CSV yang selanjutnya diolah menggunakan bahasa pemrograman Python sebagai masukan pada model propagasi ECC-33 dan proses optimasi menggunakan Genetic Algorithm.

Data pengukuran memuat parameter-parameter propagasi yang berpengaruh terhadap besarnya nilai *path loss*, yaitu frekuensi operasi, jarak antara pemancar dan penerima, tinggi antenna pemancar (*Base Station*), tinggi antenna penerima (*Mobile Station*), serta nilai *path loss* hasil pengukuran (*Measured Path Loss*). Parameter-parameter tersebut dipilih karena merupakan variabel utama yang digunakan dalam formulasi matematis model ECC-33.

Sebelum dilakukan proses pemodelan, seluruh data diperiksa untuk memastikan tidak terdapat data yang hilang (*missing value*), data duplikat, maupun nilai yang tidak sesuai. Proses ini bertujuan agar data yang digunakan memiliki kualitas yang baik sehingga hasil optimasi yang diperoleh dapat merepresentasikan kondisi propagasi sebenarnya.

Tabel 4.1 Data Hasil Pengukuran Lapangan

No	Jarak(kM)	Frekuensi (MHz)	Tinggi BTS (m)	Tinggi MS (m)	Path Loss Hasil Pengukuran (dB)
1	0,01831	1800	23,0	12,5	83
2	0,01552	1800	23,0	11,5	86
3	0,01657	1800	23,0	11,5	74
4	0,02017	1800	23,0	10,5	81
5	0,02454	1800	23,0	10,5	79

Tabel 4.1 menunjukkan data hasil pengukuran lapangan yang digunakan sebagai data utama dalam penelitian. Pengukuran dilakukan pada jaringan seluler dengan frekuensi 1800 MHz menggunakan beberapa titik pengamatan yang memiliki variasi jarak terhadap *Base Transceiver Station* (BTS). Setiap

titik pengukuran menghasilkan nilai *path loss* yang berbeda sesuai dengan kondisi propagasi sinyal di lingkungan urban. Selain jarak, parameter lain yang digunakan dalam penelitian meliputi tinggi antenna BTS (*hb*) sebesar 23 meter dan tinggi antenna penerima (*hm*) yang bervariasi pada setiap titik pengukuran. Seluruh data pada tabel ini selanjutnya digunakan sebagai masukan dalam proses prediksi menggunakan model ECC-33 dan sebagai acuan dalam optimasi parameter menggunakan algoritma genetika.

4.1.2. Statistik Data Hasil Pengukuran

Analisis statistik deskriptif dilakukan untuk memberikan gambaran umum mengenai karakteristik data hasil pengukuran yang digunakan pada penelitian. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui distribusi data, rentang nilai, serta tingkat variasi dari parameter yang diamati sebelum dilakukan proses prediksi menggunakan model ECC-33 dan optimasi dengan menggunakan algoritma genetika.

Parameter yang dianalisis termasuk frekuensi operasi, jarak antara BTS dan perangkat penerima, nilai kehilangan jalur hasil pengukuran, tinggi antenna BTS (Base Station), tinggi antenna perangkat bergerak (*Mobile Station*), dan frekuensi operasi. Hasil analisis statistik digunakan sebagai dasar untuk memastikan bahwa data yang digunakan telah mewakili kondisi propagasi sinyal pada lingkungan urban.

Tabel 4. 2 Statistik Deskriptif Data Hasil Pengukuran

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Jumlah Titik Pengukuran	13.054	Titik
2	Frekuensi Operasi Minimum	1800	Mhz
3	Frekuensi operasi maksimum	2100	Mhz
5	Tinggi Base Station (<i>hb</i>)	23,00	meter
6	Tinggi mobile station Minimum (<i>hm</i>)	9,50	meter
7	Tinggi mobile station maksimum (<i>hm</i>)	25,50	meter
8	Rata-rata tinggi mobile station	15,38	meter
9	Jarak Minimum (<i>d</i>)	0,01350	Km

10	Jarak maksimum (d)	0,91024	Km
11	Rata-rata Jarak (d)	0,27238	Km
12	Standar Deviasi Jarak	0,15754	Km
13	Path Loss Minimum	74	dB
14	Path Loss Maksimum	168	dB
15	Rata-rata Path Loss	112,61	dB
16	Standar Deviasi Path Loss	13,93	dB

Berdasarkan Tabel 4.2, data hasil pengukuran yang digunakan dalam penelitian terdiri dari 13.054 titik pengukuran yang diperoleh melalui proses *drive test* pada lingkungan urban. Pengukuran dilakukan pada dua frekuensi operasi, yaitu 1800 MHz dan 2100 MHz, dengan rata-rata frekuensi sebesar 1936,69 MHz. Tinggi antenna *Base Station* (hb) bernilai tetap sebesar 23 meter, sedangkan tinggi *Mobile Station* (hm) bervariasi antara 9,50 meter hingga 25,50 meter dengan rata-rata 15,38 meter.

Jarak antara BTS dan titik pengukuran berada pada rentang 0,01350 km hingga 0,91024 km, dengan rata-rata 0,27238 km dan standar deviasi 0,15754 km. Variasi jarak tersebut menunjukkan bahwa pengukuran dilakukan pada berbagai posisi terhadap BTS sehingga mampu merepresentasikan kondisi propagasi sinyal pada lingkungan perkotaan.

Nilai *path loss* hasil pengukuran berkisar antara 74 dB hingga 168 dB, dengan rata-rata sebesar 112,61 dB dan standar deviasi 13,93 dB. Variasi nilai *path loss* tersebut menunjukkan adanya pengaruh kondisi lingkungan, seperti bangunan, pepohonan, dan hambatan lainnya, terhadap pelemahan sinyal radio. Data statistik ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses prediksi menggunakan model ECC-33 dan optimasi parameter menggunakan algoritma genetika untuk meningkatkan akurasi prediksi *path loss*.

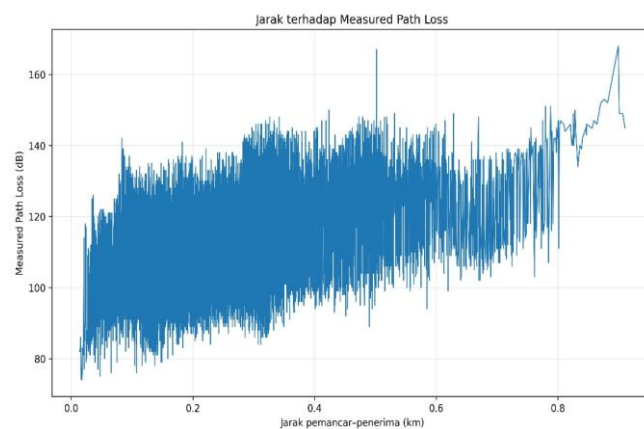
4.1.3. Visualisasi Data Pengukuran

Untuk memperoleh gambaran awal mengenai hubungan antara parameter propagasi dan nilai *path loss*, dilakukan visualisasi data

menggunakan grafik. Tujuan visualisasi ini adalah untuk mengidentifikasi pola distribusi data, kecenderungan hubungan antarvariabel, dan kemungkinan nilai pencilon. Visualisasi yang dapat ditampilkan meliputi:

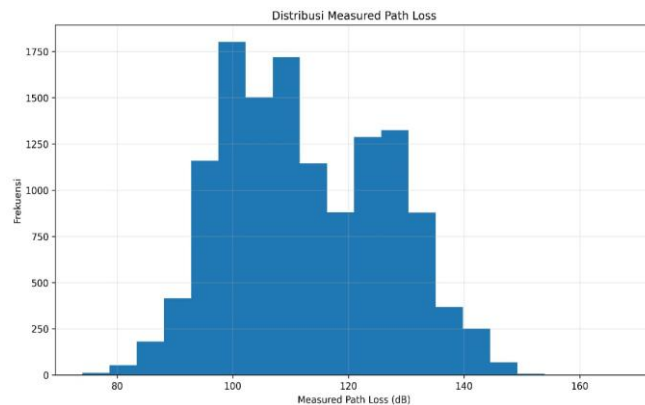
- a. Grafik hubungan jarak terhadap *measured path loss*.
- b. Histogram distribusi nilai *path loss*.
- c. Boxplot untuk melihat penyebaran setiap parameter.

Analisis visual ini menjadi dasar sebelum dilakukan implementasi model ECC-33 dan proses optimasi menggunakan *Genetic Algorithm*.



4. 1 Grafik Hubungan jarak terhadap *measured path loss*

Gambar 4.1 menunjukkan hubungan antara jarak pemancar–penerima dengan *Measured Path Loss* berdasarkan data hasil pengukuran. Jarak pengukuran berada pada kisaran sekitar 0,02–0,91 km, sedangkan nilai *path loss* berada pada kisaran sekitar 74–168 dB. Secara umum, terlihat kecenderungan peningkatan *path loss* seiring bertambahnya jarak pemancar dan penerima. Namun, hubungan tersebut tidak bersifat linier karena terdapat fluktuasi nilai yang cukup besar pada beberapa titik pengukuran. Fluktuasi tersebut menunjukkan adanya pengaruh kondisi lingkungan perkotaan terhadap propagasi sinyal, seperti penghalang, pantulan, dan difraksi. Dengan demikian, data hasil pengukuran memiliki variasi yang cukup tinggi sehingga diperlukan model propagasi yang mampu memberikan prediksi *path loss* secara lebih sesuai dengan kondisi lingkungan pengukuran. Data ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk perhitungan model ECC-33 dan proses optimasi menggunakan *Genetic Algorithm*.



4. 2 Grafik Histogram Distribusi *Measured Path Loss*

Gambar 4.2 menunjukkan distribusi nilai *Measured Path Loss* berdasarkan seluruh data hasil pengukuran yang digunakan dalam penelitian. Histogram menggambarkan frekuensi kemunculan nilai *path loss* pada rentang tertentu, sehingga dapat digunakan untuk melihat pola penyebaran data hasil pengukuran.

Berdasarkan histogram, nilai *Measured Path Loss* memiliki distribusi yang cukup menyebar pada beberapa rentang nilai. Hal tersebut menunjukkan bahwa data hasil pengukuran memiliki variasi nilai *path loss* yang cukup besar. Variasi tersebut merupakan karakteristik data propagasi pada lingkungan perkotaan, karena nilai *path loss* tidak hanya dipengaruhi oleh jarak pemancar dan penerima, tetapi juga oleh kondisi lingkungan sepanjang lintasan propagasi.