

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

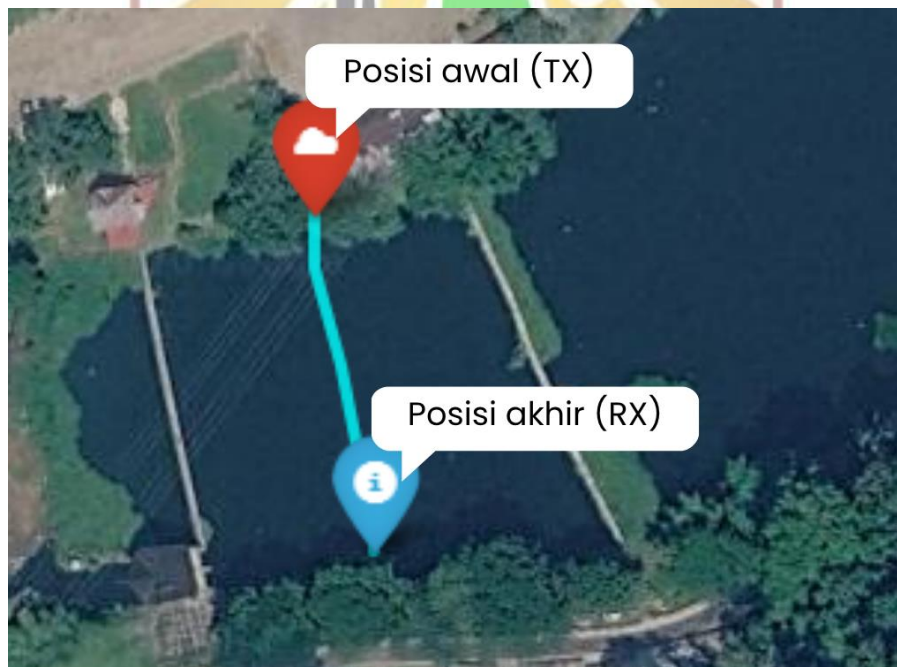
4.1 Hasil Akuisisi Data dan Algoritma *Haversine*

Tahap awal penelitian ini diawali dengan proses akuisisi data komunikasi nirkabel antara *Ground Station* dan *Unmanned Surface Vehicle* (USV) di perairan Danau Maninjau. Akuisisi data dilakukan untuk memperoleh data posisi geografis dan kekuatan sinyal (RSSI) secara bersamaan selama USV bergerak menjauhi *Ground Station*. Seluruh data direkam secara otomatis menggunakan sistem data logger berbasis *Robot Operating System* (ROS) 2, sehingga setiap sampel memiliki informasi waktu, posisi, serta nilai RSSI yang saling bersesuaian. Proses sinkronisasi data GPS dan RSSI dilakukan menggunakan mekanisme *ApproximateTimeSynchronizer* sebagaimana telah dijelaskan pada Bab III, sehingga data yang tersimpan pada berkas *measurement_log.csv* merupakan hasil pasangan data dengan *timestamp* yang paling berdekatan. Secara keseluruhan, proses pengambilan data menghasilkan 2.187 baris data sampel. Setiap baris data memuat parameter *timestamp*, koordinat *latitude*, koordinat *longitude*, status satelit GPS, nilai RSSI, serta jarak hasil perhitungan algoritma *Haversine* secara *real-time*. Data mentah tersebut menjadi dasar pada seluruh proses analisis propagasi yang dibahas pada subbab berikutnya.

Ground Station berfungsi sebagai pemancar (*transmitter*) yang ditempatkan secara tetap pada tepi Danau Maninjau dengan koordinat *Latitude* $-0,2921816^{\circ}$ dan *Longitude* $100,1494163^{\circ}$, sedangkan antena penerima ditempatkan pada wahana USV yang bergerak mengikuti lintasan pengujian di atas permukaan danau. Posisi *Ground Station* dipertahankan tetap selama seluruh proses pengambilan data sehingga perubahan jarak propagasi sepenuhnya berasal dari pergerakan USV. Sebagai ilustrasi pelaksanaan pengambilan data, Gambar 4.1 memperlihatkan proses akuisisi data di lapangan, sedangkan Gambar 4.2 menunjukkan lintasan pergerakan USV pada salah satu sesi pengujian, yaitu *Run 1*, yang digunakan sebagai contoh representatif pelaksanaan pengukuran.



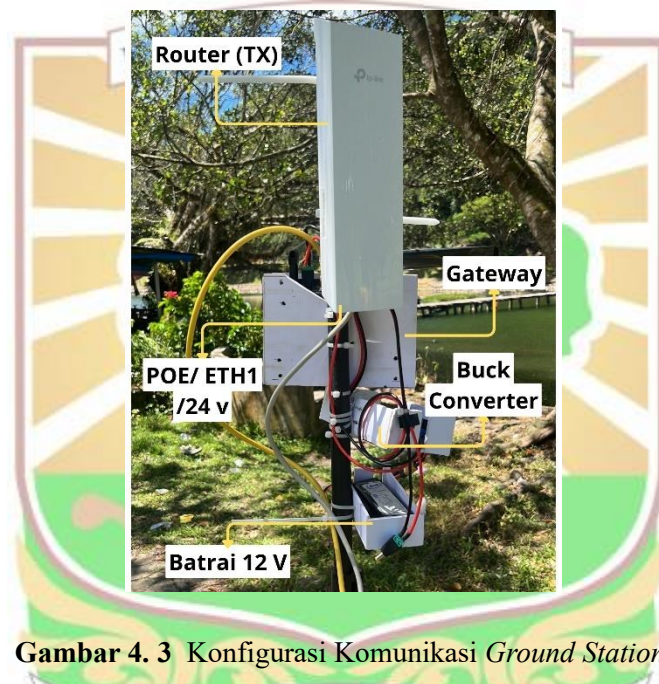
Gambar 4. 1 Proses Akuisisi Data Propagasi Gelombang Radio Menggunakan Wahana USV di Danau Maninjau.



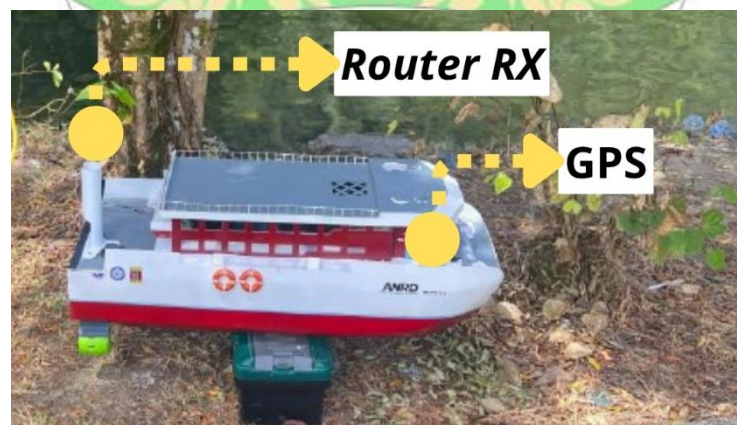
Gambar 4. 2 Lintasan Pengambilan Data Pada Salah Satu Sample Pengujian Berdasarkan Koordinat GPS

Berdasarkan Gambar 4.2, lintasan pengukuran dimulai dari posisi *Ground Station* di tepi danau kemudian bergerak menjauhi menuju area perairan terbuka. Lintasan tersebut dipilih agar variasi nilai RSSI dapat diamati pada berbagai rentang jarak antara pemancar dan penerima. *Run 1* digunakan sebagai ilustrasi karena mampu menggambarkan keseluruhan pola pergerakan USV selama proses akuisisi data, mulai dari titik awal hingga mencapai jarak operasional maksimum.

Selama proses pengujian, komunikasi data antara *Ground Station* dan USV dilakukan menggunakan jaringan nirkabel. Arsitektur komunikasi ini berfungsi sebagai media pertukaran data antara kedua perangkat sekaligus sebagai jalur pengiriman informasi RSSI yang direkam oleh sistem *Robot Operating System* (ROS 2). Konfigurasi jaringan yang digunakan selama pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan 4.4.



Gambar 4. 3 Konfigurasi Komunikasi *Ground Station*.



Gambar 4. 4 Konfigurasi Komunikasi USV

Pada konfigurasi tersebut, *Ground Station* berfungsi sebagai pusat komunikasi yang terhubung dengan perangkat *gateway*, sedangkan USV membawa

perangkat Mikrotik yang mempertahankan koneksi nirkabel selama wahana bergerak. Nilai RSSI diperoleh melalui *RouterOS* API pada perangkat Mikrotik dan dipublikasikan ke dalam topik ROS 2, kemudian disinkronkan dengan data GPS sebelum disimpan ke dalam berkas CSV oleh *data_logger_node*. Dengan mekanisme tersebut, setiap sampel data memiliki pasangan informasi posisi dan kekuatan sinyal yang sesuai terhadap waktu pengambilan data.

Gambar 4.3 dan 4.4 menunjukkan konfigurasi komunikasi yang digunakan selama proses pengambilan data. Agar seluruh repetisi pengujian dilakukan pada kondisi yang sama, konfigurasi perangkat komunikasi dipertahankan tetap selama eksperimen. Parameter konfigurasi yang digunakan meliputi mode operasi, jenis antena, frekuensi kerja, kanal komunikasi, lebar kanal, daya transmisi, dan penguatan antena sebagaimana disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Spesifikasi Sistem Komunikasi *Ground Station* dan USV

Parameter	TP-Link CPE210	MikroTik Groove
Mode operasi	Access Point	Station
Jenis antena	Directional Panel	Omni Directional
Gain antena	9 dBi	6 dBi
Frekuensi	2,4 GHz	
Frekuensi tengah	2,462 GHz	
Channel	11	
Bandwidth	20 MHz	
Daya transmisi	27 dBm	

Berdasarkan Tabel 4.1, sistem komunikasi penelitian ini terdiri atas TP-Link CPE210 yang berfungsi sebagai pemancar (*Access Point*) pada *Ground Station* dan MikroTik Groove A-52HPn sebagai penerima (*Station*) pada wahana USV. Kedua perangkat beroperasi pada pita frekuensi 2,4 GHz menggunakan Channel 11 dengan lebar kanal 20 MHz. TP-Link CPE210 menggunakan antena directional dengan gain 9 dBi dan daya transmisi 27 dBm, sedangkan MikroTik Groove A-52HPn menggunakan antena omni-directional dengan gain 6 dBi untuk mempertahankan penerimaan sinyal dari berbagai orientasi pergerakan USV.

Seluruh konfigurasi komunikasi tersebut dipertahankan tetap selama delapan kali pengujian sehingga tidak terdapat perubahan parameter perangkat maupun jaringan antar repetisi. Dengan demikian, variasi nilai RSSI yang diperoleh terutama dipengaruhi oleh perubahan jarak antara *Ground Station* dan USV serta karakteristik propagasi pada lingkungan pengujian, bukan akibat perubahan konfigurasi sistem komunikasi. Setelah konfigurasi perangkat ditetapkan, proses akuisisi data dilakukan menggunakan sistem data logger berbasis ROS 2 sehingga

seluruh data posisi GPS dan RSSI dapat direkam secara sinkron untuk proses analisis selanjutnya.

Pengambilan data dilakukan secara berulang sebanyak 8 kali repetisi (*Run* 1 hingga *Run* 8). Pengujian tidak dihentikan ketika koneksi komunikasi terputus, tetapi ketika USV telah mencapai batas operasional yang dinilai aman berdasarkan kondisi lapangan dan pengamatan operator. Akibat adanya variasi kecepatan pergerakan, pengaruh angin, riak permukaan air, dan proses teleoperasi, jumlah sampel serta jarak maksimum yang diperoleh pada setiap repetisi tidak selalu sama. Rekapitulasi hasil akuisisi data ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Rekapitulasi Profil Akuisisi Data Mentah Pada Setiap Repetisi (*Run*) Pergerakan USV.

Sesi Pengujian	Total Sampel Data (Baris)	Durasi Pengujian (Detik)	Jarak Operasional Maksimal (Meter)
<i>Run 1</i>	738	369,00	81,27
<i>Run 2</i>	246	122,42	73,99
<i>Run 3</i>	245	122,04	74,44
<i>Run 4</i>	219	108,95	74,69
<i>Run 5</i>	205	101,97	75,74
<i>Run 6</i>	184	91,50	74,61
<i>Run 7</i>	166	82,49	74,36
<i>Run 8</i>	184	91,51	70,11

Pengambilan data lapangan dilakukan sebanyak 8 kali repetisi (*Run* 1 hingga *Run* 8) dengan lintasan pengujian yang sama, yaitu USV bergerak menjauhi *Ground Station* hingga mencapai batas operasional yang aman. Rekapitulasi hasil akuisisi data pada setiap repetisi disajikan pada Tabel 4.2, yang memuat jumlah sampel data, durasi pengujian, dan jarak operasional maksimum yang berhasil dicapai.

Berdasarkan Tabel 4.2, seluruh repetisi menghasilkan 2.187 baris data dengan jarak operasional maksimum berkisar antara 70,11 meter hingga 81,27 meter. Variasi jumlah sampel pada setiap repetisi cukup terlihat, yaitu mulai dari 166 sampel pada *Run* 7 hingga 738 sampel pada *Run* 1. Perbedaan tersebut terjadi karena durasi pengujian dan kecepatan pergerakan USV tidak selalu sama pada setiap pengambilan data. Meskipun lintasan pengujian dibuat seragam, kondisi lapangan seperti kecepatan angin, riak permukaan air, serta proses teleoperasi menyebabkan waktu tempuh menuju jarak maksimum berbeda pada masing-masing repetisi.

Jika dibandingkan dengan durasi pengujian, jumlah sampel yang diperoleh menunjukkan pola yang konsisten. Sebagai contoh, *Run* 1 menghasilkan 738 sampel selama 369,00 detik, sedangkan *Run* 8 menghasilkan 184 sampel selama

91,51 detik. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa sistem data logger merekam data dengan frekuensi yang relatif tetap, yaitu sekitar 2 sampel per detik. Hasil ini menunjukkan bahwa mekanisme sinkronisasi data GPS dan RSSI yang diimplementasikan pada sistem berbasis ROS 2 mampu melakukan proses perekaman secara kontinu selama pengujian tanpa adanya perubahan laju pencatatan data yang berarti.

Selain jumlah sampel, variasi jarak maksimum pada setiap repetisi juga relatif kecil. Sebagian besar pengujian mencapai jarak sekitar 74 meter, sedangkan jarak terjauh diperoleh pada *Run 1* sebesar 81,27 meter. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh kondisi operasional di lapangan, karena penghentian pergerakan USV dilakukan secara manual ketika wahana telah mencapai batas pengamatan visual atau radius operasi yang dinilai aman oleh operator. Oleh karena itu, variasi jarak maksimum antar repetisi merupakan konsekuensi dari pelaksanaan pengujian di lingkungan perairan terbuka.

Perbedaan jumlah sampel pada setiap repetisi menyebabkan kerapatan data terhadap jarak menjadi tidak seragam. Repetisi dengan durasi pengujian yang lebih lama menghasilkan jumlah sampel yang lebih banyak dibandingkan repetisi dengan durasi yang lebih singkat. Kondisi tersebut dapat menyebabkan distribusi data tidak merata apabila seluruh data dianalisis secara langsung. Oleh karena itu, pada tahap selanjutnya dilakukan proses *distance Binning* untuk mengelompokkan data berdasarkan interval jarak yang sama sehingga setiap rentang jarak memiliki representasi data yang lebih seragam sebelum dilakukan analisis propagasi.

4.1.1 Algoritma Haversine Dalam Perhitungan Jarak

Untuk Tahap awal dalam pengolahan data penelitian ini adalah menghitung jarak propagasi antara *Ground Station* dan *Unmanned Surface Vehicle (USV)* berdasarkan koordinat geografis yang diperoleh dari sensor GPS. Nilai jarak tersebut digunakan sebagai variabel utama dalam analisis propagasi karena menjadi dasar pembentukan data *distance Binning*, perhitungan *path loss*, hingga ekstraksi *Path loss Exponent* pada subbab berikutnya.

Secara umum terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung jarak antara dua titik koordinat, di antaranya adalah metode *Euclidean* dan Teorema *Haversine*. Metode *Euclidean* menghitung panjang garis lurus berdasarkan selisih koordinat dua dimensi sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.18). Pendekatan ini sesuai digunakan pada sistem koordinat Kartesius, namun kurang tepat apabila diterapkan secara langsung pada koordinat geografis berupa lintang (*latitude*) dan bujur (*longitude*) karena tidak mempertimbangkan kelengkungan permukaan bumi.

Sebaliknya, Teorema *Haversine* menghitung jarak geodesik, yaitu jarak terpendek yang mengikuti permukaan bumi. Oleh karena itu, pada penelitian ini algoritma *Haversine* dipilih sebagai metode utama dalam perhitungan jarak karena lebih sesuai untuk data GPS yang diperoleh selama proses akuisisi data. Untuk

memberikan gambaran mengenai perbedaan kedua metode tersebut, dilakukan perhitungan menggunakan salah satu sampel data hasil pengukuran lapangan. Sampel yang digunakan berasal dari indeks ke-738, yaitu data terakhir pada *Run 1* yang memiliki jarak propagasi paling jauh. Data sampel yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Sample Data Mentah Pada Index Ke-738

Parameter	Nilai
Timestamp Pengujian	13:39:18.160
<i>Latitude</i> USV	-0,2927926°
<i>Longitude</i> USV	100,1498173°
<i>Latitude</i> Ground Station	-0,2921816°
<i>Longitude</i> Ground Station	100,1494163°

Sebagai pembanding, terlebih dahulu dilakukan estimasi jarak menggunakan persamaan *Euclidean*. Persamaan ini menghitung jarak berdasarkan selisih koordinat lintang dan bujur tanpa mempertimbangkan bentuk permukaan bumi. Langkah pertama adalah menghitung selisih koordinat antara *Ground Station* dan USV.

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = (-0,2927926^\circ) - (-0,2921816^\circ) = -0,0006110^\circ$$

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 100,1498173^\circ - 100,1494163^\circ = 0,0004010^\circ$$

Koordinat tersebut kemudian dikonversi ke dalam satuan radian:

$$\Delta\phi = -0,0006110^\circ \times \left(\frac{\pi}{180}\right) = -1,0664 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

$$\Delta\lambda = 0,0004010^\circ \times \left(\frac{\pi}{180}\right) = 6,9988 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

Selanjutnya, nilai radian tersebut disubstitusikan ke dalam Persamaan (2.18) dengan asumsi jari-jari bumi $R = 6.371.000$ meter:

$$d_E = R\sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\Delta\lambda)^2}$$

$$d_E = 6.371.000\sqrt{(-1,0664 \times 10^{-5})^2 + (6,9988 \times 10^{-6})^2}$$

$$d_E = 6.371.000\sqrt{(1,1372 \times 10^{-10}) + (0,4898 \times 10^{-10})}$$

Sehingga diperoleh hasil d_E yaitu:

$$d_E \approx 81,26 \text{ meter}$$

Nilai tersebut merupakan estimasi jarak menggunakan pendekatan bidang datar (*planar approximation*) Setelah itu dilakukan juga perhitungan pada teorema haversine Menggunakan pasangan koordinat yang sama, sebagaimana Persamaan (2.19). Langkah substitusi perhitungan manual rumus *Haversine* dijabarkan yang pertama yaitu konversi sudut derajat koordinat Tx dan Rx menjadi satuan Radian ($\text{rad} = \text{derajat} \times \frac{\pi}{180}$):

$$\phi_1 = -0,2921816^\circ \times \frac{\pi}{180} = -0,00509953 \text{ rad}$$

$$\phi_2 = -0,2927300^\circ \times \frac{\pi}{180} = -0,00511019 \text{ rad}$$

$$\lambda_1 = 100,1494163^\circ \times \frac{\pi}{180} = 1,74793836 \text{ rad}$$

$$\lambda_2 = 100,1496940^\circ \times \frac{\pi}{180} = 1,74794536 \text{ rad}$$

Hitung selisih jarak sudut ($\Delta\phi$ dan $\Delta\lambda$):

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = -0,00001066 \text{ rad}$$

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 0,00000700 \text{ rad}$$

Substitusikan selisih sudut ke dalam komponen haversine (a):

$$a = \sin^2\left(\frac{-0,00001066}{2}\right) + \cos(-0,00509953) \cdot \cos(-0,00511019) \cdot \sin^2\left(\frac{1,74794536}{2}\right)$$

$$a = 4,069 \times 10^{-11}$$

Setelah itu Hitung jarak sudut angular (c):

$$c = 2 \cdot \arcsin\left(\sqrt{4,069 \times 10^{-11}}\right) = 1,276 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

Sehingga jarak geodesik diperoleh sebesar:

$$d = 6.371.000 \cdot 1,276 \times 10^{-5} = 81,268 \text{ m}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa metode *Euclidean* menghasilkan estimasi jarak sekitar 81,22 meter, sedangkan metode *Haversine* menghasilkan jarak 81,268 meter. Perbedaan kedua metode pada contoh ini relatif kecil karena jarak pengukuran masih berada pada skala puluhan meter. Namun demikian, kedua metode dibangun berdasarkan asumsi geometris yang berbeda.

Metode *Euclidean* mengasumsikan bahwa koordinat berada pada bidang datar sehingga tidak memperhitungkan kelengkungan permukaan bumi. Sebaliknya, metode *Haversine* menghitung jarak geodesik berdasarkan koordinat geografis sehingga lebih sesuai digunakan pada data GPS. Oleh karena itu, meskipun selisih hasil perhitungan pada penelitian ini tidak terlalu besar, penggunaan Teorema *Haversine* memberikan representasi jarak yang lebih sesuai

dengan kondisi sebenarnya dan menjadi dasar dalam seluruh proses analisis propagasi pada penelitian ini.

Selain itu, hasil perhitungan manual menggunakan Teorema *Haversine* menghasilkan nilai yang sama dengan jarak yang direkam oleh sistem ROS 2, yaitu 81,268 meter. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma *Haversine* yang diimplementasikan pada program telah bekerja sesuai dengan formulasi matematis yang digunakan sehingga hasil perhitungan jarak pada data penelitian dapat digunakan sebagai dasar untuk analisis pada subbab selanjutnya. Untuk ketelitian koordinat GPS yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan hingga 7 angka di belakang koma dalam satuan derajat desimal. Tingkat ketelitian tersebut dipilih karena berpengaruh langsung terhadap resolusi perhitungan jarak propagasi. Secara geometris, panjang busur pada permukaan bumi dinyatakan sebagai hasil perkalian antara jari-jari bumi (R) dengan sudut pusat (θ), sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.20).

Dengan menggunakan jari-jari bumi sebesar 6.371.000 meter, perubahan sudut sebesar 1° setara dengan sekitar 111.194,9 meter pada permukaan bumi. Oleh karena itu, setiap peningkatan ketelitian digit di belakang koma akan memperkecil resolusi jarak yang direpresentasikan oleh koordinat GPS. Berdasarkan hubungan tersebut, koordinat dengan ketelitian hingga 7 angka di belakang koma memiliki resolusi spasial pada orde sentimeter hingga sekitar 1 cm, sehingga cukup memadai untuk penelitian ini yang melakukan pengukuran propagasi pada rentang jarak sekitar 0–81 meter. Penggunaan ketelitian koordinat tersebut juga membantu meminimalkan kesalahan pembulatan (*rounding error*) selama proses perhitungan jarak menggunakan algoritma *Haversine*.

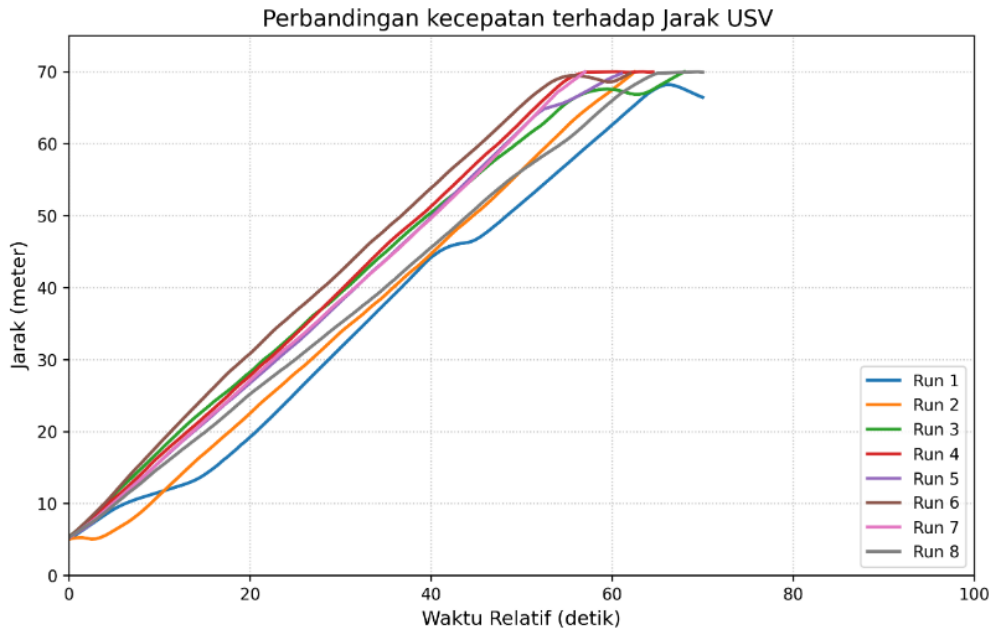
Tabel 4. 4 Hubungan Ketelitian Koordinat Geografis Terhadap Resolusi Jarak

Ketelitian Koordinat	Resolusi Jarak ($\approx$)
1°	111.194,9 m
$0,1^\circ$	11.119,5 m
$0,01^\circ$	1.111,9 m
$0,001^\circ$	111,2 m
$0,0001^\circ$	11,1 m
$0,00001^\circ$	1,11 m
$0,000001^\circ$	11,1 cm
$0,0000001^\circ$	1,11 cm

Berdasarkan Tabel 4.4 penggunaan koordinat GPS hingga 7 angka di belakang koma memberikan resolusi spasial sekitar 1 cm. Resolusi tersebut lebih kecil dibandingkan skala perubahan jarak pada penelitian ini, sehingga ketelitian koordinat yang digunakan dinilai memadai untuk mendukung perhitungan jarak propagasi menggunakan algoritma *Haversine*.

4.1.2 Analisis Pergerakan dan Kecepatan Wahana

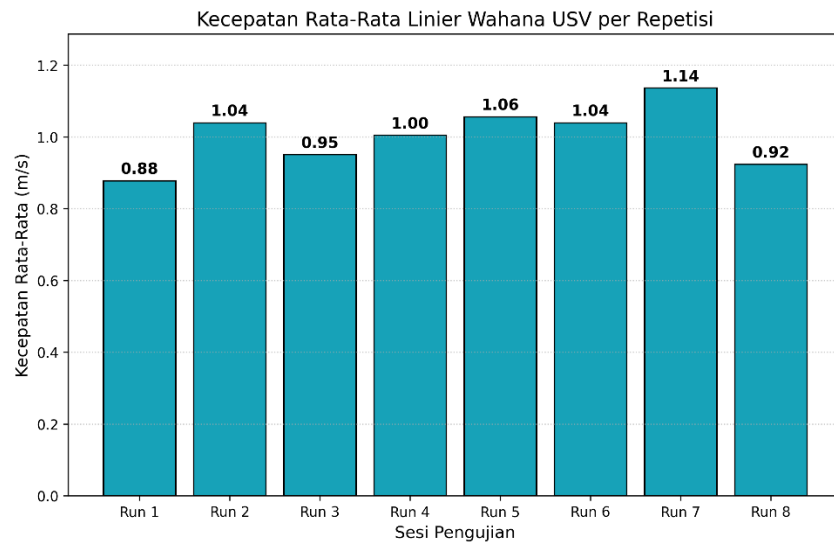
Setelah proses akuisisi data selesai dilakukan, tahap berikutnya adalah menganalisis karakteristik pergerakan wahana selama pengujian. Analisis ini bertujuan untuk menggambarkan profil pergerakan USV terhadap waktu serta mengevaluasi variasi kecepatan pada setiap repetisi pengujian. Hasil analisis tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



Gambar 4.5 Grafik Pergerakan Jarak Pengujian Terhadap Waktu Pada Delapan Repetisi Pengujian.

Berdasarkan Gambar 4.5, seluruh repetisi menunjukkan pola pergerakan yang relatif serupa. Pada awal pengujian, jarak antara *Ground Station* dan USV meningkat secara bertahap seiring pergerakan wahana menjauhi titik awal. Setelah mencapai jarak maksimum, kurva mulai mendatar yang menunjukkan bahwa USV mempertahankan posisinya sebelum pengujian dihentikan. Meskipun lintasan pengujian dibuat sama, setiap repetisi memiliki kemiringan kurva yang sedikit berbeda. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya variasi kecepatan selama proses teleoperasi. Sebagai contoh, kurva pada *Run 7* memiliki kemiringan yang lebih besar dibandingkan repetisi lainnya sehingga jarak maksimum dicapai dalam waktu yang lebih singkat. Sebaliknya, *Run 1* menunjukkan kemiringan yang lebih landai sehingga membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai jarak yang sama. Variasi ini merupakan kondisi yang wajar karena pengendalian USV dilakukan secara manual dan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti riak permukaan air serta kecepatan angin. Selain itu, seluruh kurva memperlihatkan peningkatan jarak yang berlangsung secara kontinu tanpa adanya lonjakan atau penurunan jarak yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa data posisi GPS berhasil direkam secara

berkesinambungan selama proses pengujian sehingga profil pergerakan USV dapat direpresentasikan dengan baik. Untuk mengetahui karakteristik laju pergerakan pada masing-masing repetisi, dilakukan perhitungan kecepatan rata-rata berdasarkan total jarak tempuh dan durasi pengujian. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 6 Kecepatan Rata-Rata Linier Wahana USV Pada Setiap Repetisi Pengujian.

Berdasarkan Gambar 4.6, kecepatan rata-rata USV berada pada rentang 0,88 m/s hingga 1,14 m/s. Kecepatan tertinggi diperoleh pada *Run 7* sebesar 1,14 m/s, sedangkan kecepatan terendah diperoleh pada *Run 1* sebesar 0,88 m/s. Repetisi lainnya memiliki kecepatan yang relatif berdekatan, yaitu *Run 2* sebesar 1,04 m/s, *Run 3* sebesar 0,95 m/s, *Run 4* sebesar 1,00 m/s, *Run 5* sebesar 1,06 m/s, *Run 6* sebesar 1,04 m/s, dan *Run 8* sebesar 0,92 m/s. Secara keseluruhan, rata-rata kecepatan dari seluruh repetisi adalah 1,003 m/s. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses pengujian dilakukan pada kecepatan yang relatif konsisten meskipun terdapat sedikit variasi antar repetisi. Variasi kecepatan tersebut dipengaruhi oleh proses teleoperasi serta kondisi lingkungan selama pengujian, namun tidak menunjukkan perbedaan yang terlalu besar sehingga karakteristik lintasan pada setiap repetisi tetap dapat dibandingkan.

Kecepatan rata-rata sekitar 1 m/s juga menghasilkan kerapatan pengambilan data yang masih memadai untuk analisis propagasi. Dengan frekuensi pencatatan data sebesar 2 Hz, sistem merekam sekitar dua sampel setiap detik atau sekitar dua titik pengukuran untuk setiap meter pergerakan USV. Resolusi spasial tersebut dinilai cukup untuk menggambarkan perubahan nilai RSSI terhadap pertambahan jarak pada rentang pengukuran yang digunakan dalam penelitian ini. Oleh karena itu, variasi kecepatan antar repetisi tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap proses analisis selanjutnya. Tahap berikutnya adalah melakukan proses

distance Binning untuk menyeragamkan distribusi data berdasarkan interval jarak sebelum dilakukan analisis karakteristik propagasi.

4.1.3 Analisis Trajektori USV

Setelah dilakukan analisis terhadap profil pergerakan dan kecepatan wahana, tahap berikutnya adalah mengevaluasi trajektori pengujian berdasarkan koordinat *Global Positioning System* (GPS) yang direkam selama proses akuisisi data. Analisis ini bertujuan untuk memastikan bahwa lintasan setiap repetisi tetap berada pada area cakupan (*coverage area*) antenna pemancar serta memiliki arah pergerakan yang relatif seragam. Keseragaman lintasan menjadi aspek penting dalam penelitian ini karena perbedaan arah yang terlalu besar dapat menyebabkan perubahan kondisi propagasi akibat keluarnya wahana dari daerah cakupan antenna, sehingga variasi nilai *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) tidak lagi hanya dipengaruhi oleh pertambahan jarak.

Visualisasi trajektori seluruh repetisi pada peta lokasi pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.7. Pada gambar tersebut juga ditampilkan sektor *coverage area* antenna pemancar yang dimodelkan berdasarkan karakteristik antenna directional TP-Link CPE210 dengan horizontal beamwidth sebesar 65° . *Coverage area* dibentuk sebagai sektor lingkaran dengan titik pusat berada pada posisi antenna *Ground Station* dan radius sebesar 82 m, yaitu jarak operasional maksimum selama pengujian. Luas sektor *coverage area* dihitung menggunakan Persaman 4.1.

$$A = \frac{\theta}{360^\circ} \pi (d_{max})^2 \quad (4.1)$$

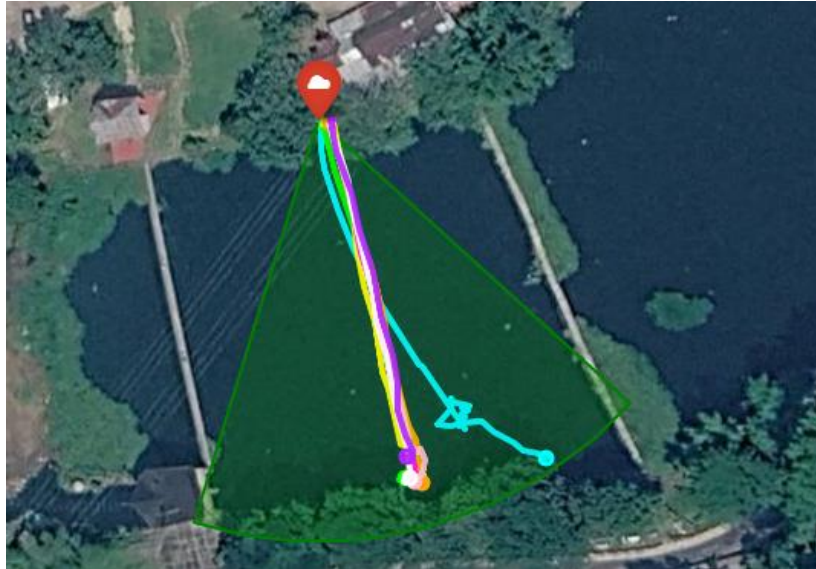
Keterangan:

A = Luas area cakupan (*coverage area*) efektif sistem (m^2)

θ = *Horizontal Beamwidth* (lebar sudut pancaran) dari antenna *directional Tx* (derajat)

d_{max} = Jarak operasional terjauh yang dapat dijangkau oleh USV (meter)

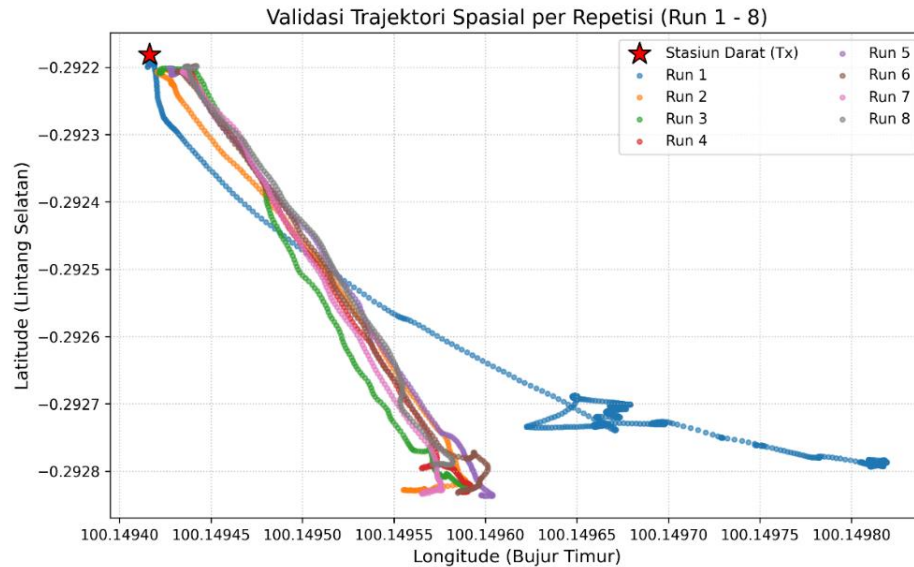
Berdasarkan parameter tersebut diperoleh luas *coverage area* sekitar $3.820 m^2$, yang merepresentasikan wilayah utama pancaran antenna selama proses pengujian berlangsung.



Gambar 4. 7 Trajektori Lintasan USV Pada Delapan Repetisi Pengujian yang Ditampilkan Pada Peta Lokasi Pengujian.

Berdasarkan Gambar 4.7, seluruh lintasan pengujian berada di dalam sektor coverage area antena. *Run 2* hingga *Run 8* memperlihatkan pola lintasan yang relatif saling berimpit dan mengikuti arah radial dari *Ground Station* menuju area perairan terbuka. Hal tersebut menunjukkan bahwa operator mampu mempertahankan arah pergerakan USV secara konsisten pada sebagian besar repetisi. Sementara itu, *Run 1* memperlihatkan penyimpangan arah pada bagian akhir lintasan sehingga menghasilkan trajektori yang sedikit berbeda dibandingkan repetisi lainnya. Meskipun demikian, lintasan tersebut masih berada di dalam *coverage area* antena sehingga komunikasi antara *Ground Station* dan USV tetap berlangsung pada wilayah layanan antena yang sama.

Untuk mengevaluasi tingkat penyimpangan lintasan secara lebih rinci, koordinat *latitude* dan *longitude* dari seluruh repetisi kemudian divisualisasikan pada sistem koordinat geografis sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.8. Berbeda dengan Gambar 4.7 yang menampilkan posisi lintasan terhadap *coverage area* antena pada citra satelit, visualisasi koordinat ini bertujuan untuk memperjelas kesesuaian arah pergerakan antar repetisi serta mengidentifikasi deviasi lintasan secara kuantitatif.



Gambar 4. 8 Validasi Trajektori Spasial USV Berdasarkan Koordinat *Latitude* dan *Longitude*.

Berdasarkan Gambar 4.8, terlihat bahwa sebagian besar trajektori membentuk koridor lintasan yang relatif sama. *Run 2* hingga *Run 8* menunjukkan pola pergerakan yang hampir berimpit mulai dari titik awal hingga mencapai jarak operasional maksimum. Sebaliknya, *Run 1* mengalami deviasi arah pada bagian akhir lintasan sehingga posisi akhirnya bergeser terhadap lintasan referensi. Untuk mengkuantifikasi penyimpangan tersebut, dilakukan perhitungan pergeseran lateral menggunakan koordinat GPS pada titik akhir lintasan dengan Persamaan dibawah ini.

$$e_L = d \cdot \sin(\Delta\theta) \quad (4.2)$$

Keterangan:

e_L = Error pergeseran lateral lintasan (meter)

d = Jarak propagasi aktual dari *Ground Station* ke titik USV (meter)

$\Delta\theta$ = Selisih sudut *bearing* antara titik koordinat aktual terhadap sudut *bearing* lintasan ideal (derajat)

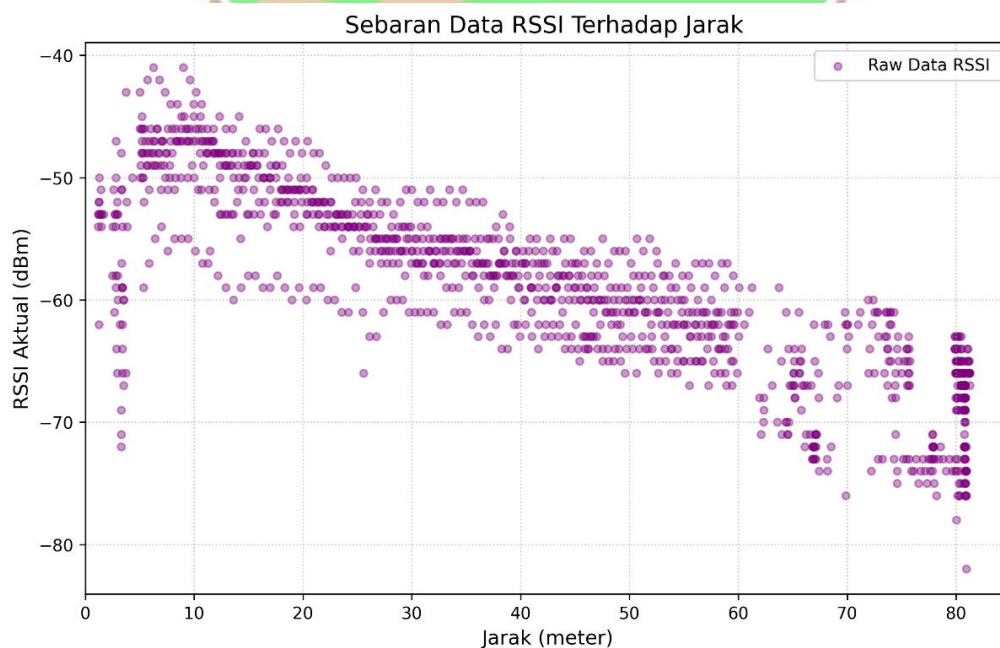
Perhitungan dilakukan menggunakan koordinat akhir *Run 1* sebagai lintasan yang mengalami deviasi dan koordinat akhir *Run 2* sebagai lintasan referensi yang mewakili pola pergerakan dominan selama pengujian. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai pergeseran lateral sebesar 27,85 m. Nilai tersebut menunjukkan bahwa penyimpangan terbesar selama proses akuisisi data terjadi pada *Run 1*, sedangkan repetisi lainnya tetap berada pada koridor lintasan yang relatif sama.

Apabila dibandingkan dengan karakteristik antenna pemancar yang memiliki beamwidth sebesar 65° dan radius cakupan 82 m, penyimpangan lateral tersebut masih berada di dalam coverage area antenna. Dengan demikian, meskipun terjadi deviasi arah pada *Run* 1, wahana tidak keluar dari daerah pancaran utama antenna sehingga jalur komunikasi radio tetap berada pada kondisi propagasi yang sebanding dengan repetisi lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa variasi nilai RSSI yang diperoleh selama pengujian lebih merepresentasikan perubahan karakteristik propagasi akibat pertambahan jarak dibandingkan akibat perpindahan wahana ke luar daerah cakupan antenna.

Secara keseluruhan, hasil analisis trajektori menunjukkan bahwa seluruh repetisi pengujian dilaksanakan pada lintasan yang relatif seragam dan masih berada dalam *coverage area* antenna pemancar. Oleh karena itu, data koordinat GPS yang diperoleh dinilai memiliki tingkat konsistensi yang memadai untuk digunakan sebagai dasar analisis propagasi pada tahapan selanjutnya, termasuk proses *distance Binning*, ekstraksi *Path loss Exponent*, serta evaluasi model propagasi berdasarkan data empiris.

4.2 Analisis Kekuatan Sinyal (RSSI) Hasil Pengukuran

Setelah proses akuisisi data selesai dilakukan, tahap berikutnya adalah menganalisis karakteristik kekuatan sinyal terima (*Received Signal Strength Indicator* atau RSSI) terhadap perubahan jarak propagasi. Analisis ini bertujuan untuk mengamati pola pelemahan sinyal sebelum dilakukan proses *distance Binning* dan perhitungan *path loss*. Sebaran seluruh data RSSI hasil pengukuran pada delapan repetisi ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Grafik Sebaran Data Mentah (*Raw Data*) RSSI Terhadap Jarak Operasional Wahana USV di Danau Maninjau

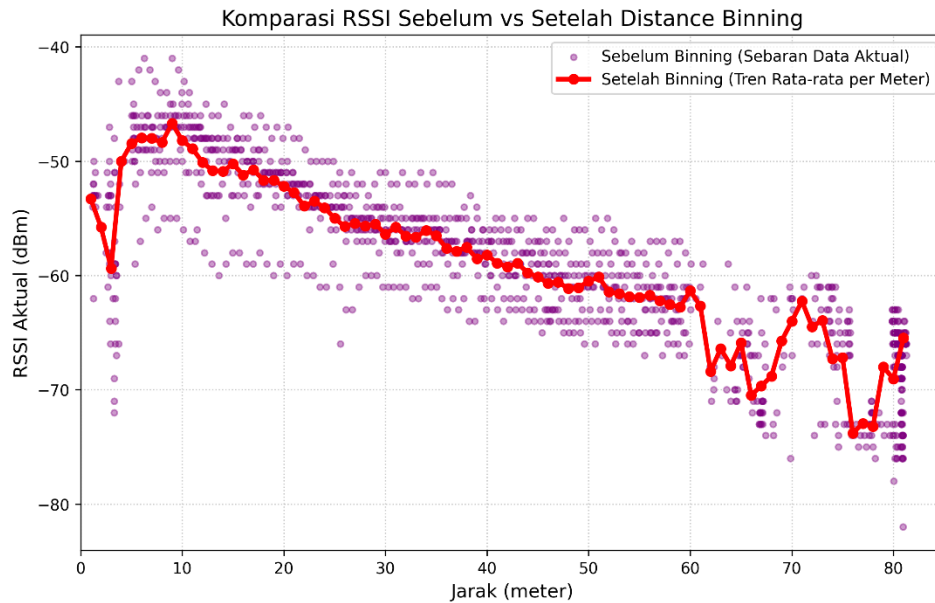
Berdasarkan Gambar 4.9 terlihat bahwa secara umum nilai RSSI menunjukkan kecenderungan menuRun seiring bertambahnya jarak antara *Ground Station* dan USV. Pada jarak dekat sebagian besar data berada pada kisaran sekitar -45 dBm hingga -55 dBm, sedangkan pada jarak sekitar 70–80 meter nilai RSSI umumnya berada pada kisaran -60 dBm hingga -75 dBm. Pola tersebut menunjukkan bahwa daya sinyal yang diterima mengalami pelemahan secara bertahap terhadap pertambahan jarak propagasi.

Selain menunjukkan kecenderungan menuRun, sebaran data juga memperlihatkan adanya variasi RSSI pada jarak yang sama. Sebagai contoh, pada jarak sekitar 50 meter nilai RSSI tersebar pada rentang sekitar -56 dBm hingga -64 dBm. Variasi tersebut menunjukkan bahwa pada satu jarak yang sama kekuatan sinyal yang diterima tidak selalu identik. Kondisi ini umum dijumpai pada komunikasi nirkabel di lingkungan perairan terbuka karena sinyal dipengaruhi oleh pantulan permukaan air, perubahan orientasi antenna, serta kondisi operasional selama pengujian. Hal lain yang terlihat pada Gambar 4.9 adalah adanya beberapa nilai RSSI yang menuRun cukup tajam pada rentang jarak sekitar 1–5 meter. Berdasarkan pemeriksaan terhadap data mentah seluruh repetisi, penurunan tersebut tidak muncul secara konsisten pada setiap pengujian, tetapi lebih banyak ditemukan pada *Run 5*, *Run 6*, *Run 7*, dan sebagian kecil *Run 8*. Pada rentang jarak tersebut nilai RSSI bervariasi antara sekitar -43 dBm hingga -82 dBm.

Karena fenomena ini hanya terjadi pada sebagian repetisi, penurunan RSSI tersebut tidak dapat dikaitkan secara langsung dengan pertambahan jarak propagasi. Kondisi tersebut lebih mungkin dipengaruhi oleh kombinasi beberapa faktor selama tahap awal pergerakan USV, seperti perubahan orientasi antenna ketika wahana mulai bergerak, pengaruh pantulan sinyal dari permukaan air (*multipath*), maupun dinamika komunikasi nirkabel pada saat koneksi mulai berlangsung. Setelah USV bergerak menjauhi *Ground Station*, nilai RSSI kembali mengikuti kecenderungan pelemahan yang lebih teratur terhadap pertambahan jarak.

4.3 *Distance Binning* dan Pengaruhnya Terhadap Data Empiris

Setelah dilakukan analisis terhadap data RSSI mentah, tahap berikutnya adalah proses *distance Binning*. Proses ini bertujuan untuk mengelompokkan seluruh data berdasarkan interval jarak sebesar 1 meter, kemudian menghitung nilai rata-rata RSSI pada setiap kelompok jarak (*local mean RSSI*). Dengan pendekatan tersebut, fluktuasi RSSI yang terjadi pada pengukuran individual dapat dikurangi sehingga diperoleh representasi pelemahan sinyal yang lebih menggambarkan karakteristik propagasi skala besar (*large-scale propagation*). Hasil proses *distance Binning* ditunjukkan pada Gambar 4.10. Pada gambar tersebut, titik berwarna abu-abu menunjukkan seluruh data RSSI hasil pengukuran, sedangkan garis berwarna merah menunjukkan nilai rata-rata RSSI pada setiap interval jarak setelah proses *Binning* dilakukan.



Gambar 4. 10 Pengaruh Proses *Distance Binning* Terhadap Sebaran Data RSSI.

Berdasarkan Gambar 4.10 terlihat bahwa data RSSI mentah memiliki penyebaran yang cukup besar pada hampir seluruh rentang jarak. Pada jarak yang sama terdapat beberapa nilai RSSI yang berbeda sehingga pola pelemahan sinyal sulit diamati secara langsung. Kondisi tersebut merupakan karakteristik umum pengukuran propagasi di lingkungan nyata, di mana nilai RSSI tidak hanya dipengaruhi oleh pertambahan jarak tetapi juga oleh variasi kondisi propagasi selama proses pengukuran. Setelah dilakukan proses *distance Binning*, pola pelemahan sinyal menjadi lebih mudah diamati. Nilai rata-rata RSSI pada setiap interval jarak membentuk tren yang cenderung menurun seiring bertambahnya jarak antara *Ground Station* dan USV. Dibandingkan dengan data mentah yang tersebar cukup lebar, hasil *Binning* menghasilkan kurva yang lebih halus sehingga perubahan rata-rata RSSI terhadap jarak dapat diamati dengan lebih jelas.

Meskipun demikian, proses *Binning* tidak menghilangkan seluruh variasi data. Pada rentang jarak sekitar 1–5 meter, kurva rata-rata masih menunjukkan perubahan yang cukup tajam. Hal ini terjadi karena pada rentang tersebut terdapat beberapa nilai RSSI yang berbeda cukup jauh dibandingkan nilai lainnya, sebagaimana telah dibahas pada Subbab 4.2. Karena jumlah sampel pada jarak dekat juga relatif lebih banyak dibandingkan jarak lainnya, nilai rata-rata pada beberapa bin awal masih dipengaruhi oleh variasi tersebut.

Selain itu, pada rentang jarak sekitar 70–80 meter kurva hasil *Binning* kembali memperlihatkan fluktuasi yang lebih besar dibandingkan rentang jarak sebelumnya. Berdasarkan hasil pengelompokan data, kondisi tersebut berkaitan dengan berkurangnya jumlah sampel pada beberapa interval jarak. Sebagai contoh, interval 76–77 meter dan 78–79 meter masing-masing hanya memiliki 5 sampel, sedangkan pada interval 3–4 meter terdapat 150 sampel. Jumlah sampel yang lebih

sedikit menyebabkan nilai rata-rata RSSI pada beberapa bin lebih sensitif terhadap variasi data hasil pengukuran sehingga perubahan antar bin menjadi lebih terlihat.

Secara keseluruhan, proses *distance Binning* mengubah 2.187 data RSSI mentah menjadi 81 titik data empiris yang merepresentasikan nilai rata-rata RSSI pada setiap interval jarak 1 meter. Proses ini tidak mengubah kecenderungan pelemahan sinyal terhadap jarak, tetapi mengurangi pengaruh fluktuasi lokal sehingga hubungan antara RSSI dan jarak menjadi lebih mudah diamati. Oleh karena itu, data hasil *Binning* digunakan sebagai dasar pada proses perhitungan *Path loss* empiris serta analisis karakteristik propagasi pada subbab berikutnya. Untuk memberikan gambaran kuantitatif mengenai hasil proses *distance Binning*, ringkasan parameter hasil pengelompokan data disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Ringkasan Hasil Proses *Distance Binning*

Parameter	Nilai
Jumlah data mentah	2.187
Interval bin	1 meter
Jumlah bin	81
Jumlah sampel maksimum/bin	150
Jumlah sampel minimum/bin	5
RSSI rata-rata seluruh bin	-59,02 dBm

Berdasarkan Tabel 4.5 terlihat bahwa proses *distance Binning* mengelompokkan sebanyak 2.187 data RSSI mentah menjadi 81 interval jarak dengan lebar bin sebesar 1 meter. Setiap interval merepresentasikan nilai rata-rata RSSI (*local mean RSSI*) pada rentang jarak tertentu, sehingga data yang semula tersebar menjadi lebih terstruktur untuk proses analisis selanjutnya. Distribusi jumlah sampel pada setiap bin tidak seragam. Interval dengan jumlah sampel terbanyak memiliki 150 data, sedangkan interval dengan jumlah sampel paling sedikit hanya terdiri atas 5 data. Perbedaan ini disebabkan oleh variasi durasi pengujian dan kecepatan pergerakan USV pada setiap repetisi, sehingga kepadatan data pada masing-masing rentang jarak tidak sama. Meskipun demikian, seluruh interval masih memiliki jumlah data yang cukup untuk memperoleh nilai rata-rata RSSI pada setiap bin.

Selain itu, hasil *Binning* menunjukkan bahwa nilai rata-rata RSSI dari seluruh interval adalah sekitar -59,02 dBm. Nilai tersebut memberikan gambaran umum mengenai tingkat kekuatan sinyal yang diterima selama proses pengukuran pada rentang jarak hingga sekitar 81 meter. Namun demikian, nilai rata-rata tersebut tidak digunakan secara langsung dalam analisis propagasi, melainkan setiap nilai *local mean RSSI* pada masing-masing interval jarak digunakan sebagai data empiris dalam proses perhitungan *path loss*.

Untuk memberikan gambaran mengenai hasil pengelompokan data pada setiap interval jarak, cuplikan hasil *distance Binning* disajikan pada Tabel 4.6. Tabel

ini menampilkan beberapa interval pada bagian awal dan akhir pengukuran sebagai contoh representatif hasil pengelompokan data. Informasi yang disajikan meliputi rentang jarak setiap bin, jumlah sampel yang berada pada interval tersebut, nilai RSSI minimum, RSSI maksimum, serta nilai rata-rata RSSI (*local mean RSSI*) yang digunakan sebagai data empiris pada proses analisis selanjutnya.

Tabel 4. 6 Cuplikan Hasil Pra-Pemrosesan Data Lapangan Menggunakan Metode *Distance Binning* Per 1 Meter.

Bin	Rentang Jarak (m)	Jumlah Sampel	RSSI Min (dBm)	RSSI Maks (dBm)	Mean RSSI (dBm)	Jarak Rata-rata (m)
1	1 - 2	69	-62	-50	-53.6522	1.40142
2	2 - 3	117	-66	-45	-56.0171	2.817667
3	3 - 4	150	-82	-43	-59.6133	3.4335
4	4 - 5	28	-65	-43	-51.2143	4.722
5	5 - 6	22	-59	-42	-48.7273	5.575636
77	77.172 - 78.172	16	-75	-71	-72.8125	77.79913
78	78.172 - 79.172	5	-76	-72	-73.6	78.604
79	79.172 - 80.172	35	-78	-63	-67.6571	80.01034
80	80.172 - 81.172	106	-82	-63	-69.0283	80.70084
81	81.172 - 82.172	6	-67	-65	-66	81.236

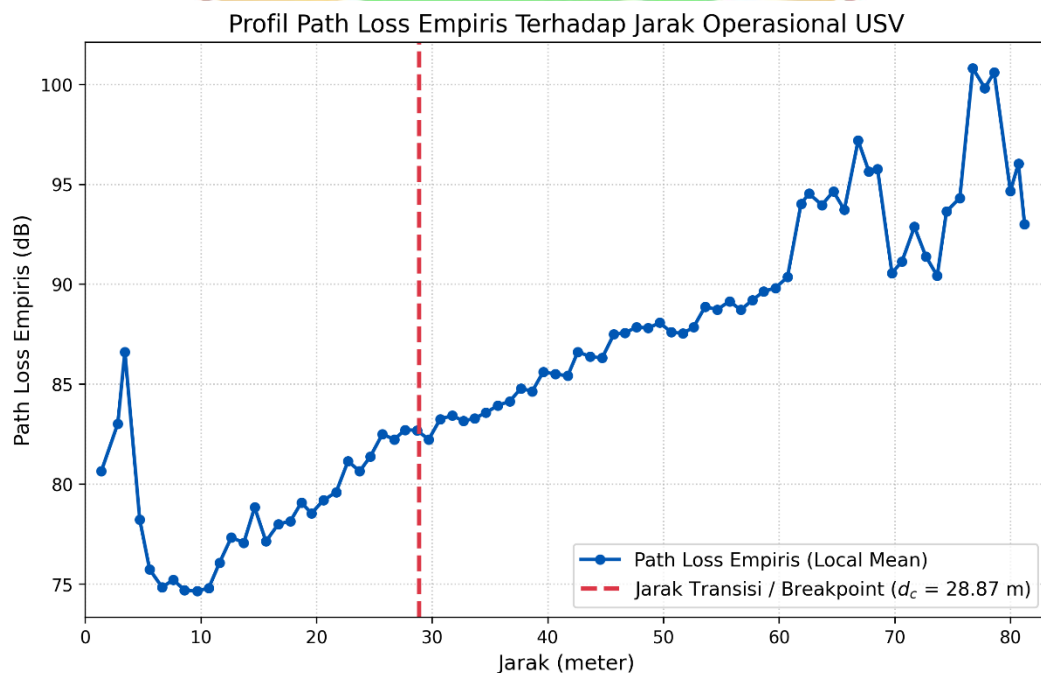
Berdasarkan Tabel 4.6 terlihat bahwa jumlah sampel pada setiap interval jarak tidak selalu sama. Pada interval awal, yaitu bin 1 hingga bin 5, jumlah sampel relatif lebih banyak dibandingkan interval pada bagian akhir pengukuran. Kondisi ini menunjukkan bahwa kepadatan data hasil akuisisi lebih tinggi pada jarak dekat, sedangkan pada jarak yang lebih jauh jumlah sampel cenderung berkurang. Perbedaan tersebut sejalan dengan hasil analisis pada Subbab 4.1 yang menunjukkan adanya variasi durasi pengujian dan kecepatan pergerakan USV pada setiap repetisi.

Selain jumlah sampel, rentang nilai RSSI minimum dan maksimum pada setiap bin juga menunjukkan bahwa masih terdapat variasi kekuatan sinyal meskipun berada pada interval jarak yang sama. Sebagai contoh, pada beberapa bin awal selisih antara nilai RSSI minimum dan maksimum masih cukup besar, demikian pula pada beberapa bin akhir yang menunjukkan variasi RSSI akibat kondisi propagasi selama pengukuran. Variasi tersebut merupakan karakteristik umum data pengukuran lapangan sehingga penggunaan satu nilai RSSI tunggal tidak cukup untuk merepresentasikan kondisi propagasi pada setiap jarak. Oleh karena itu, proses *distance Binning* menggunakan nilai rata-rata RSSI (*local mean RSSI*) sebagai representasi setiap interval jarak. Pendekatan ini mampu mempertahankan kecenderungan pelemahan sinyal terhadap pertambahan jarak sekaligus mengurangi pengaruh fluktuasi lokal pada data mentah. Dengan

demikian, setiap interval jarak direpresentasikan oleh satu nilai RSSI rata-rata yang lebih stabil dan selanjutnya digunakan sebagai data empiris pada proses perhitungan *Path Loss*. Seluruh hasil *distance Binning* terdiri atas 81 interval jarak. Untuk menjaga kerapian penyajian, hanya sebagian data yang ditampilkan pada Tabel 4.6, sedangkan hasil lengkap proses *distance Binning* disajikan pada Lampiran

4.4 Analisis *Path loss* Empiris dan Penentuan Jarak Transisi

Setelah proses *distance Binning* menghasilkan nilai local mean RSSI pada setiap interval jarak, tahap selanjutnya adalah menghitung *Path loss* empiris sebagai representasi pelemahan sinyal selama propagasi. Perhitungan dilakukan menggunakan Persamaan (2.15) dengan mengurangi nilai rata-rata RSSI terhadap daya transmisi pemancar yang dijaga konstan sebesar 27 dBm selama seluruh proses pengujian. Hasil perhitungan tersebut menghasilkan 81 nilai *Path loss* empiris, yang masing-masing merepresentasikan satu interval jarak hasil *distance Binning*.



Gambar 4. 11 Grafik Nilai *Path Loss* Empiris Hasil Kalkulasi Data Lapangan Terhadap Pertambahan Jarak.

Pada Berdasarkan Gambar 4.11, hubungan antara *Path loss* empiris terhadap jarak menunjukkan kecenderungan peningkatan redaman seiring bertambahnya jarak propagasi antara *Ground Station* dan USV. Hal ini sesuai dengan teori propagasi gelombang radio yang menyatakan bahwa daya sinyal yang diterima akan semakin melemah ketika jarak pemancar dan penerima semakin jauh. Secara umum, nilai *Path loss* hasil pengukuran berada pada kisaran sekitar 76 dB

hingga lebih dari 100 dB, dengan pola kenaikan yang tidak sepenuhnya linier terhadap jarak.

Meskipun menunjukkan tren peningkatan secara umum, grafik masih memperlihatkan fluktuasi pada beberapa interval jarak. Fluktuasi tersebut mengindikasikan bahwa propagasi sinyal di lingkungan perairan tidak hanya dipengaruhi oleh mekanisme redaman ruang bebas (*free-space attenuation*), tetapi juga oleh efek refleksi permukaan air yang menghasilkan interferensi antara lintasan langsung (*direct path*) dan lintasan pantul (*reflected path*). Setelah proses *distance Binning*, pengaruh *small-scale fading* telah berkurang sehingga tren *large-scale path loss* menjadi lebih jelas terlihat, namun variasi akibat karakteristik kanal propagasi masih tetap muncul pada beberapa titik pengamatan.

Secara visual terlihat bahwa laju peningkatan *Path loss* tidak bersifat seragam sepanjang rentang pengukuran. Pada jarak yang relatif dekat, kenaikan *Path loss* masih berlangsung secara perlahan, sedangkan setelah melewati jarak tertentu peningkatan redaman menjadi lebih cepat. Perubahan kecenderungan tersebut menunjukkan adanya perubahan mekanisme propagasi yang sesuai dengan karakteristik model *Exact Two-Ray Ground Reflection*, yaitu transisi dari daerah yang masih didominasi lintasan langsung menuju daerah yang semakin dipengaruhi oleh komponen refleksi permukaan air.

Berdasarkan teori yang telah dijelaskan pada Bab II, perubahan karakteristik propagasi tersebut dinyatakan melalui parameter *breakpoint distance*. Nilai *breakpoint distance* teoritis pada konfigurasi antenna penelitian ini adalah 28,87 meter, sehingga jarak tersebut digunakan sebagai batas untuk membagi data *Path loss* empiris ke dalam dua wilayah analisis propagasi yang memiliki karakteristik redaman berbeda. Pembagian wilayah analisis tersebut disajikan pada Tabel 4.7

Tabel 4. 7 Pembagian Wilayah Analisis Propagasi Berdasarkan *Breakpoint Distance*

Wilayah Propagasi	Rentang Jarak (m)	Jumlah Bin
Region 1	1–28,87	28
Region 2	>28,87–81	53

Berdasarkan Tabel 4.7, data *Path loss* empiris dibagi menjadi dua wilayah analisis, yaitu Region 1 yang mencakup rentang jarak 1 hingga 28,87 meter dengan 28 interval hasil *distance Binning*, serta Region 2 yang mencakup jarak lebih dari 28,87 meter hingga sekitar 81 meter dengan 53 interval. Pembagian ini didasarkan pada posisi *breakpoint distance* yang diperoleh dari hasil analisis data dan digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi perubahan karakteristik *Path loss* pada masing-masing wilayah propagasi. Analisis lebih rinci mengenai pola *Path loss* pada Region 1 dan Region 2 disajikan pada subbab selanjutnya.

4.4.1 Analisis Region 1 ($d \leq 28,87$ meter)

Region 1 merupakan wilayah propagasi sebelum mencapai jarak transisi (*breakpoint distance*) pada 28,87 meter, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.11. Berdasarkan hasil perhitungan *Path loss* empiris, nilai pelemahan sinyal pada wilayah ini berada pada kisaran 74,65 dB hingga 82,73 dB. Secara umum, nilai *Path loss* menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya jarak, namun peningkatan tersebut belum berlangsung secara konsisten. Pada beberapa interval jarak, terutama pada awal pengukuran sekitar 2–10 meter, terlihat perubahan nilai *Path loss* yang cukup tajam sebelum kembali meningkat secara bertahap hingga mendekati titik transisi.

Pola tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara jarak dan *Path loss* pada Region 1 belum sepenuhnya mengikuti kecenderungan linier. Sebagai contoh, nilai *Path loss* meningkat hingga sekitar 86 dB pada jarak sekitar 3 meter, kemudian menurun hingga mendekati 75 dB pada rentang 6–10 meter, sebelum kembali mengalami kenaikan secara bertahap menuju 82–83 dB saat mendekati jarak transisi. Fluktuasi ini terlihat lebih besar dibandingkan wilayah setelah *breakpoint*, meskipun data yang digunakan telah melalui proses *distance Binning*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa proses *Binning* berhasil mengurangi variasi data mentah, namun masih mempertahankan karakteristik perubahan sinyal yang terjadi selama pengukuran.

Salah satu faktor yang diduga berkontribusi terhadap pola tersebut adalah adanya kombinasi antara gelombang langsung (*line-of-sight*) dan gelombang pantul dari permukaan air yang diterima antena pada jarak dekat. Pada kondisi ini, perubahan posisi USV meskipun relatif kecil dapat menyebabkan perubahan fase antara kedua lintasan propagasi sehingga menghasilkan variasi daya sinyal yang diterima. Selain itu, orientasi wahana selama bergerak, riak permukaan danau, serta perubahan posisi antena terhadap *Ground Station* juga dapat memberikan kontribusi terhadap fluktuasi *Path loss* pada wilayah ini. Oleh karena itu, hubungan antara jarak dan pelemahan sinyal pada Region 1 belum sepenuhnya didominasi oleh mekanisme redaman propagasi akibat pertambahan jarak.

Meskipun demikian, setelah melewati sekitar 10 meter, kecenderungan kenaikan *Path loss* mulai terlihat lebih stabil hingga mendekati titik transisi pada 28,87 meter. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh fluktuasi lokal secara bertahap mulai berkurang sehingga perubahan *Path loss* mulai mengikuti kecenderungan pelemahan terhadap pertambahan jarak. Berdasarkan karakteristik tersebut, Region 1 dianalisis secara terpisah dari Region 2 agar perbedaan perilaku propagasi sebelum dan sesudah *breakpoint distance* dapat diidentifikasi dengan lebih jelas pada proses ekstraksi parameter model propagasi.

4.4.2 Analisis Region 2 ($d > 28,87$ meter)

Perubahan Region 2 merupakan wilayah propagasi setelah melewati *breakpoint distance* pada 28,87 meter, dengan rentang pengukuran hingga sekitar 81 meter. Berdasarkan hasil perhitungan *Path loss* empiris, nilai pelemahan sinyal pada wilayah ini berada pada kisaran 82,25 dB hingga 100,83 dB. Secara umum, *Path loss* menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya jarak antara *Ground Station* dan USV. Dibandingkan dengan Region 1, pola perubahan *Path loss* pada Region 2 terlihat lebih teratur pada sebagian besar interval pengukuran, meskipun masih terdapat fluktuasi pada beberapa jarak tertentu. Pada rentang sekitar 29 hingga 60 meter, kenaikan *Path loss* berlangsung secara bertahap dari sekitar 82 dB hingga mendekati 90 dB. Fluktuasi yang terjadi pada rentang ini relatif kecil sehingga hubungan antara pertambahan jarak dan pelemahan sinyal dapat diamati dengan lebih jelas. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan *Path loss* pada wilayah ini lebih didominasi oleh pengaruh pertambahan jarak dibandingkan fluktuasi lokal yang terlihat pada Region 1.

Namun, setelah melewati jarak sekitar 60 meter, variasi nilai *Path loss* kembali meningkat. Nilai *Path loss* mengalami beberapa kenaikan dan penurunan dengan rentang sekitar 90 dB hingga lebih dari 100 dB, meskipun kecenderungan umumnya tetap berada pada nilai yang lebih tinggi dibandingkan interval sebelumnya. Berdasarkan hasil *distance Binning*, peningkatan fluktuasi pada jarak yang lebih jauh ini kemungkinan dipengaruhi oleh berkurangnya jumlah sampel pada beberapa interval jarak, sehingga nilai rata-rata RSSI (*local mean RSSI*) menjadi lebih sensitif terhadap variasi data hasil pengukuran. Selain itu, kondisi propagasi di atas permukaan danau serta perubahan orientasi USV selama bergerak juga dapat memberikan kontribusi terhadap variasi *Path loss* pada wilayah ini.

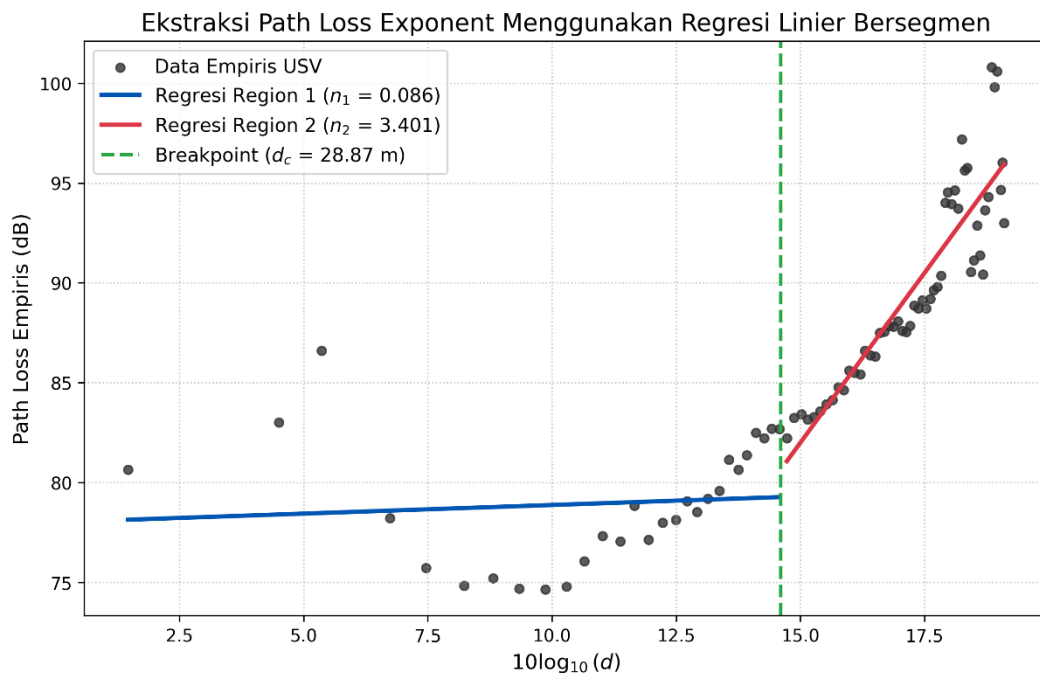
Meskipun demikian, kecenderungan peningkatan *Path loss* terhadap pertambahan jarak masih dapat diamati hingga akhir lintasan pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme pelemahan sinyal akibat propagasi tetap menjadi karakteristik utama pada Region 2, sementara fluktuasi yang muncul pada beberapa interval jarak merupakan bagian dari variasi hasil pengukuran lapangan. Oleh karena itu, Region 2 digunakan sebagai wilayah analisis lanjutan untuk memperoleh parameter model propagasi yang merepresentasikan karakteristik pelemahan sinyal pada jarak operasional USV setelah melewati *breakpoint distance*.

4.5 Ekstraksi *Path loss Exponent* Menggunakan Regresi Linier

Setelah diperoleh nilai *Path loss* empiris pada setiap interval hasil *distance Binning*, tahap selanjutnya adalah melakukan ekstraksi *Path loss Exponent* (PLE) menggunakan metode regresi linier bersegmen sebagaimana telah dijelaskan pada Subbab 3.5. Metode ini digunakan untuk memperoleh parameter propagasi berdasarkan hubungan antara *Path loss* empiris dan jarak pengukuran. Mengacu pada hasil analisis pada Subbab 4.4, data *Path loss* empiris dibagi menjadi dua

wilayah propagasi, yaitu Region 1 dan Region 2, sehingga proses regresi dilakukan secara terpisah pada masing-masing wilayah.

Pada penelitian ini, variabel bebas (*independent variable*) yang digunakan dalam proses regresi adalah $10\log_{10}(d)$, sedangkan variabel terikat (*dependent variable*) adalah nilai *Path loss* empiris hasil *distance Binning*. Sesuai dengan model propagasi yang digunakan pada penelitian ini, kemiringan (*slope*) garis regresi secara langsung merepresentasikan nilai *Path loss Exponent* (n). Selain menghasilkan nilai *Path loss Exponent*, proses regresi juga memberikan parameter statistik berupa intercept, koefisien determinasi (R^2), dan p-value, yang digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara *Path loss* empiris terhadap jarak pada masing-masing wilayah propagasi. Hasil regresi linier bersegmen ditunjukkan pada Gambar 4.12. Garis regresi berwarna biru menunjukkan hasil regresi pada Region 1, sedangkan garis regresi berwarna merah menunjukkan hasil regresi pada Region 2. Secara visual terlihat bahwa kedua wilayah menghasilkan kemiringan garis regresi yang berbeda, yang menunjukkan adanya perbedaan karakteristik pelemahan sinyal sebelum dan sesudah *breakpoint distance*.



Gambar 4. 12 Hasil Analisis Regresi Linier Bersegmen (*Ordinary Least Squares*) Terhadap Data *Path Loss* Empiris Berdasarkan *Breakpoint Distance*.

Untuk memberikan ringkasan hasil ekstraksi secara kuantitatif, parameter regresi yang diperoleh pada masing-masing wilayah propagasi dirangkum pada Tabel 4.8. Parameter yang disajikan meliputi rentang jarak pengamatan, nilai *Path loss Exponent* (n), intercept, koefisien determinasi (R^2), dan p-value hasil regresi. Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi karakteristik hubungan antara *Path loss* empiris dan jarak pada masing-masing wilayah propagasi.

Tabel 4. 8 Hasil Ekstraksi Parameter Regresi Linier Bersegmen.

Parameter	Region 1	Region 2
Rentang jarak (m)	1 – 28,87	>28,87 – 81
<i>Path loss Exponent</i> (<i>n</i>)	0,0863	3,4014
Intercept (dB)	78,0149	30,9781
Koefisien Determinasi (R^2)	0,0087	0,8204
<i>p-value</i>	0,6372	$1,18 \times 10^{-20}$

Berdasarkan Tabel 4.8, hasil regresi linier bersegmen menunjukkan bahwa parameter propagasi yang diperoleh pada Region 1 dan Region 2 memiliki karakteristik yang berbeda. Perbedaan tersebut tidak hanya ditunjukkan oleh nilai *Path loss Exponent*, tetapi juga oleh nilai intercept, koefisien determinasi (R^2), serta *p-value* yang dihasilkan dari proses regresi. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara *Path loss* empiris dan jarak pada kedua wilayah propagasi tidak memiliki karakteristik yang sama sehingga masing-masing wilayah perlu dianalisis secara terpisah.

Secara umum, hasil regresi pada Region 1 menghasilkan nilai *Path loss Exponent* yang jauh lebih kecil dibandingkan Region 2, sedangkan Region 2 menunjukkan nilai *Path loss Exponent* yang lebih besar disertai nilai R^2 yang lebih tinggi. Namun demikian, interpretasi mengenai penyebab perbedaan karakteristik tersebut tidak dilakukan pada subbab ini. Pembahasan lebih rinci mengenai hasil ekstraksi pada masing-masing wilayah propagasi disajikan pada Subbab 4.5.1 untuk Region 1 dan Subbab 4.5.2 untuk Region 2.

4.5.1 Ekstraksi *Path loss Exponent* pada Region 1

Pada Ekstraksi *Path loss Exponent* pada Region 1 dilakukan menggunakan data *Path loss* empiris pada rentang jarak 1 hingga 28,87 meter, yaitu wilayah sebelum *breakpoint distance* yang telah ditetapkan secara teoritis berdasarkan model propagasi *Two-Ray* sebagaimana dijelaskan pada Bab 3. Proses ekstraksi dilakukan menggunakan regresi linier dengan variabel bebas $10\log_{10}(d)$ dan variabel terikat berupa nilai *Path loss* empiris hasil *distance Binning*. Hasil regresi untuk Region 1 ditunjukkan oleh garis berwarna biru pada Gambar 4.12.

Berdasarkan hasil regresi, diperoleh nilai *Path loss Exponent* (n_1) sebesar 0,0863 dengan intercept sebesar 78,0149 dB. Selain itu, diperoleh koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,0087 dan *p-value* sebesar 0,6372. Nilai R^2 yang mendekati nol menunjukkan bahwa hubungan linier antara *Path loss* empiris dan variabel $10\log_{10}(d)$ pada Region 1 sangat lemah. Hal tersebut juga didukung oleh nilai *p-value* yang lebih besar dari 0,05, sehingga kemiringan garis regresi pada wilayah ini tidak menunjukkan hubungan linier yang signifikan berdasarkan data hasil pengukuran.

Hasil regresi tersebut sejalan dengan karakteristik *Path loss* yang telah dibahas pada Subbab 4.4.1. Pada wilayah sebelum *breakpoint distance*, perubahan *Path loss* masih menunjukkan fluktuasi yang cukup besar, khususnya pada rentang jarak awal pengukuran. Meskipun proses *distance Binning* telah mengurangi variasi data mentah, peningkatan *Path loss* terhadap pertambahan jarak belum membentuk kecenderungan yang konsisten. Kondisi tersebut menyebabkan titik-titik data empiris memiliki penyebaran yang relatif besar terhadap garis regresi sehingga hubungan linier yang terbentuk menjadi lemah.

Perlu diperhatikan bahwa pembagian Region 1 pada penelitian ini didasarkan pada nilai *breakpoint distance* yang dihitung secara teoritis menggunakan model propagasi *Two-Ray*, bukan ditentukan melalui proses optimasi terhadap data empiris. Oleh karena itu, nilai *Path loss Exponent* yang diperoleh pada Region 1 merupakan hasil regresi terhadap data pengukuran pada wilayah sebelum *breakpoint* teoritis. Dengan demikian, nilai *Path loss Exponent* sebesar 0,0863 tidak menunjukkan bahwa pelemahan sinyal hampir tidak terjadi ataupun bahwa nilai *breakpoint distance* yang digunakan tidak sesuai, melainkan menunjukkan bahwa hubungan linier antara *Path loss* dan jarak pada wilayah sebelum *breakpoint* belum terbentuk secara kuat berdasarkan data hasil pengukuran.

Berdasarkan hasil tersebut, Region 1 menunjukkan bahwa perubahan *Path loss* pada wilayah sebelum *breakpoint distance* masih didominasi oleh variasi data empiris sehingga parameter *Path loss Exponent* yang diperoleh belum merepresentasikan kecenderungan pelemahan sinyal terhadap jarak secara kuat. Oleh karena itu, analisis selanjutnya difokuskan pada Region 2 untuk mengevaluasi hasil ekstraksi *Path loss Exponent* setelah melewati *breakpoint distance*, di mana hubungan antara *Path loss* empiris dan jarak menunjukkan kecenderungan yang lebih jelas.

4.5.2 Ekstraksi *Path loss Exponent* pada Region 2

Perubahan Ekstraksi *Path loss Exponent* pada Region 2 dilakukan menggunakan data *Path loss* empiris pada rentang jarak lebih dari 28,87 meter, yaitu setelah batas *breakpoint distance* yang digunakan sebagai acuan pembagian wilayah analisis. Regresi linier dilakukan terhadap hubungan antara nilai *Path loss* empiris dan variabel $10\log_{10}(d)$ untuk memperoleh karakteristik pelemahan sinyal pada wilayah ini.

Hasil regresi menunjukkan bahwa Region 2 memiliki nilai *Path loss Exponent* (n_2) sebesar 3,4014 dengan intercept sebesar 30,9781 dB. Selain itu, diperoleh koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8204 dan p-value sebesar $1,1777 \times 10^{-20}$. Nilai R^2 tersebut menunjukkan bahwa sekitar 82,04% variasi nilai *Path loss* empiris pada Region 2 dapat dijelaskan oleh hubungan linier terhadap variabel $10\log_{10}(d)$. Sementara itu, nilai p-value yang jauh lebih kecil dari 0,05

menunjukkan bahwa kemiringan garis regresi pada wilayah ini signifikan secara statistik.

Hasil tersebut sejalan dengan karakteristik *Path loss* yang telah dibahas pada Subbab 4.4.2. Setelah melewati *breakpoint distance*, nilai *Path loss* secara umum menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya jarak meskipun masih terdapat fluktuasi pada beberapa bin, terutama pada jarak yang lebih jauh. Dibandingkan dengan Region 1, penyebaran titik data pada Region 2 mengikuti pola yang lebih konsisten terhadap garis regresi sehingga menghasilkan hubungan linier yang lebih kuat.

Nilai *Path loss Exponent* sebesar 3,4014 menunjukkan bahwa laju peningkatan *Path loss* terhadap pertambahan jarak pada Region 2 lebih besar dibandingkan karakteristik propagasi ruang bebas yang secara umum memiliki nilai eksponen mendekati 2. Dengan demikian, hasil pengukuran mengindikasikan bahwa pelemahan sinyal pada wilayah setelah *breakpoint distance* terjadi lebih cepat dibandingkan kondisi ruang bebas. Kondisi tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh karakteristik kanal propagasi pada lingkungan pengujian, termasuk propagasi di atas permukaan danau, kondisi lingkungan sekitar, serta karakteristik sistem komunikasi yang digunakan. Namun, penelitian ini tidak melakukan pengukuran secara khusus terhadap kontribusi masing-masing faktor tersebut sehingga pembahasan difokuskan pada hasil empiris yang diperoleh dari pengukuran lapangan.

Secara keseluruhan, hasil regresi pada Region 2 menunjukkan bahwa model linier memberikan representasi yang baik terhadap hubungan antara *Path loss* dan jarak setelah melewati *breakpoint distance*. Oleh karena itu, nilai *Path loss Exponent* sebesar 3,4014 dapat digunakan sebagai parameter empiris yang mewakili karakteristik pelemahan sinyal pada wilayah tersebut. Parameter ini selanjutnya digunakan sebagai dasar pada pembahasan berikutnya mengenai kalibrasi rugi-rugi sistem.

4.6 Kalibrasi Model Propagasi Menggunakan Faktor Offset

Sebelum dilakukan evaluasi akurasi model propagasi, terlebih dahulu dilakukan proses kalibrasi menggunakan faktor *offset* untuk menyelaraskan hasil prediksi model teoritis dengan data hasil pengukuran lapangan. Tahapan kalibrasi ini bertujuan agar kedua model propagasi memiliki titik acuan awal yang sama dengan data empiris sehingga perbedaan yang diamati pada jarak berikutnya lebih merepresentasikan karakteristik model propagasi dibandingkan perbedaan level daya awal.

Proses penentuan faktor *offset* dilakukan menggunakan titik referensi d_0 , yaitu nilai rata-rata RSSI hasil proses *Distance Binning* pada interval jarak pertama. Penggunaan nilai rata-rata pada bin pertama bertujuan untuk memperoleh representasi *local mean RSSI*, sehingga pengaruh fluktuasi sinyal sesaat (*small-scale fading*) dapat dikurangi. Dengan demikian, nilai referensi yang digunakan

dalam proses kalibrasi bukan berasal dari satu sampel pengukuran, melainkan merupakan representasi rata-rata seluruh data pada interval jarak tersebut. Perhitungan faktor *offset* serta penerapannya pada model propagasi dilakukan sesuai dengan prosedur yang telah dijelaskan pada Persamaan (3.2) dan Persamaan (3.3) pada Bab III. Berdasarkan perhitungan tersebut, diperoleh nilai faktor *offset* untuk masing-masing model propagasi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.9

Tabel 4. 9 Perhitungan Parameter Kalibrasi Offset Berdasarkan Jarak Referensi Terdekat

Model Propagasi	RSSI Teoritis (dBm)	RSSI Empiris pada (d ₀) (dBm)	Faktor Offset (dB)
<i>Free Space Path loss</i> (FSPL)	-1,021	-53,652	52,631
<i>Exact Two-Ray Ground Reflection</i>	-8,544	-53,652	45,108

Berdasarkan Tabel 4.9, model *Free Space Path loss* memerlukan faktor *offset* sebesar 52,631 dB, sedangkan model *Exact Two-Ray Ground Reflection* memerlukan faktor *offset* sebesar 45,108 dB. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan bahwa hasil prediksi daya terima dari kedua model teoritis pada titik referensi masih berada di atas nilai RSSI hasil pengukuran sehingga diperlukan proses penyelarasan sebelum dilakukan evaluasi lebih lanjut. Selain itu, model *Exact Two-Ray Ground Reflection* memerlukan faktor *offset* yang lebih kecil dibandingkan model *Free Space Path Loss*. Hal ini menunjukkan bahwa pada titik referensi d₀, prediksi awal model *Exact Two-Ray* lebih mendekati hasil pengukuran dibandingkan model *Free Space Path Loss*. Namun demikian, kesesuaian tersebut masih terbatas pada titik referensi yang digunakan dalam proses kalibrasi dan belum menunjukkan tingkat akurasi model pada seluruh rentang jarak pengukuran. Setelah faktor *offset* diterapkan sesuai prosedur kalibrasi, kedua model propagasi memiliki titik referensi awal yang sama dengan data empiris sehingga dapat dibandingkan secara langsung terhadap hasil pengukuran lapangan. Tingkat kesesuaian masing-masing model propagasi terhadap data empiris selanjutnya dievaluasi menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) pada Subbab selanjutnya.

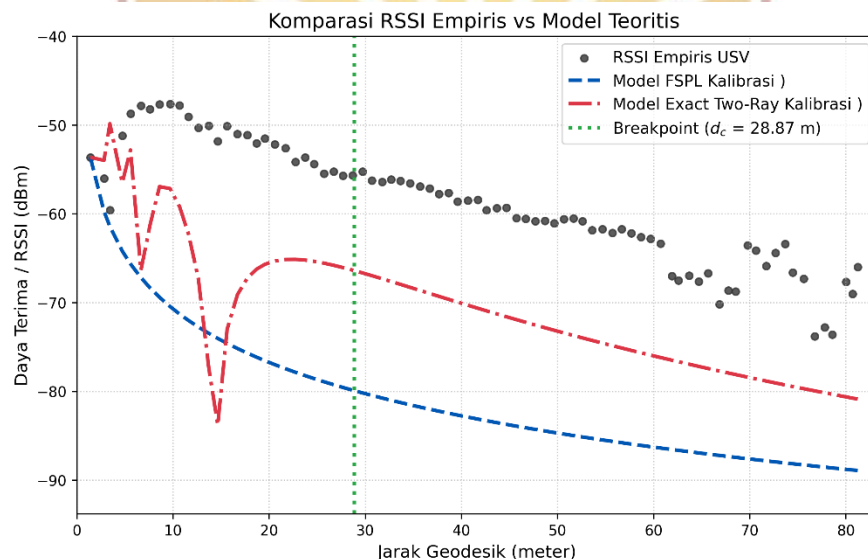
4.7 Komparasi Daya Terima Empiris Terhadap Model Teoritis

Setelah dilakukan proses kalibrasi menggunakan faktor *offset* pada Subbab 4.6, model propagasi *Free Space Path loss* (FSPL) dan *Exact Two-Ray Ground Reflection* selanjutnya dievaluasi terhadap data hasil pengukuran lapangan. Tahap evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kesesuaian masing-masing model dalam merepresentasikan karakteristik propagasi sinyal komunikasi *surface-to-shore* pada lingkungan perairan Danau Maninjau. Evaluasi dilakukan melalui dua pendekatan. Pertama, dilakukan komparasi secara visual antara kurva daya terima

hasil prediksi model propagasi yang telah dikalibrasi dengan data RSSI empiris hasil pengukuran. Tahap ini digunakan untuk mengamati kesesuaian pola perubahan daya terima terhadap pertambahan jarak. Selanjutnya, tingkat akurasi masing-masing model dievaluasi secara kuantitatif menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) sehingga diperoleh ukuran galat prediksi setiap model terhadap data empiris.

4.7.1 Komparasi Daya Terima Empiris terhadap Model Teoritis

Sebagai tahap awal evaluasi, dilakukan komparasi antara data RSSI empiris hasil pengukuran dengan hasil prediksi model *Free Space Path loss* (FSPL) dan *Exact Two-Ray Ground Reflection* yang telah dikalibrasi menggunakan faktor *offset*. Komparasi ini bertujuan untuk mengamati sejauh mana masing-masing model mampu mengikuti kecenderungan perubahan daya terima terhadap pertambahan jarak pengukuran.



Gambar 4. 13 Komparasi RSSI Empiris Terhadap Model Propagasi Teoritis Hasil Kalibrasi

Melalui Berdasarkan Gambar 4.13, kedua model propagasi memiliki titik awal yang sama dengan data empiris sebagai akibat dari proses kalibrasi menggunakan titik referensi d_0 . Setelah melewati titik referensi tersebut, masing-masing model menunjukkan karakteristik perubahan daya terima yang berbeda terhadap pertambahan jarak. Model *Free Space Path loss* memperlihatkan penurunan daya terima yang berlangsung secara bertahap mengikuti karakteristik propagasi ruang bebas. Namun, seiring bertambahnya jarak, kurva hasil prediksi semakin menjauh dari data RSSI empiris, terutama setelah melewati *breakpoint distance* pada jarak 28,87 meter. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa model FSPL belum mampu mengikuti karakteristik pelemahan sinyal yang teramati pada lingkungan pengujian.

Sementara itu, model *Exact Two-Ray Ground Reflection* memperlihatkan pola perubahan daya terima yang lebih mendekati kecenderungan data empiris. Pada jarak sebelum *breakpoint distance*, model ini masih menunjukkan variasi daya terima yang dipengaruhi oleh karakteristik propagasi dua lintasan (*two-ray propagation*). Setelah melewati *breakpoint distance*, kurva prediksi memperlihatkan kecenderungan penurunan daya terima yang mengikuti pola perubahan data empiris dengan lebih baik dibandingkan model FSPL.

Hasil komparasi visual tersebut juga sejalan dengan karakteristik *Path loss* empiris yang telah dibahas pada Subbab 4.4 dan hasil ekstraksi *Path loss Exponent* pada Subbab 4.5. Pada wilayah setelah *breakpoint distance*, data empiris menunjukkan hubungan yang lebih konsisten terhadap pertambahan jarak sehingga model *Exact Two-Ray Ground Reflection* mampu mengikuti kecenderungan perubahan daya terima dengan lebih baik dibandingkan model *Free Space Path Loss*. Meskipun demikian, pada beberapa rentang jarak masih terlihat adanya deviasi antara kurva prediksi dan data hasil pengukuran. Hal tersebut menunjukkan bahwa kedua model teoritis belum dapat merepresentasikan seluruh variasi daya terima yang terjadi selama pengujian lapangan. Secara umum, komparasi visual memberikan gambaran bahwa model *Exact Two-Ray Ground Reflection* memiliki tingkat kesesuaian yang lebih baik terhadap data hasil pengukuran dibandingkan model *Free Space Path Loss*. Namun, pengamatan visual saja belum cukup untuk menunjukkan tingkat akurasi masing-masing model secara kuantitatif. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) yang dibahas pada Subbab selanjutnya.

4.7.2 Evaluasi Model Menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE)

Untuk melengkapi hasil komparasi visual pada Subbab 4.7.1, dilakukan evaluasi kuantitatif terhadap model *Free Space Path loss* (FSPL) dan *Exact Two-Ray Ground Reflection* menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE). Perhitungan RMSE dilakukan sesuai metode yang telah dijelaskan pada Bab III dengan membandingkan hasil prediksi model propagasi yang telah dikalibrasi terhadap data *Path loss* empiris pada setiap titik hasil *Distance Binning*. Selain RMSE, dihitung pula galat relatif sebagai ukuran persentase penyimpangan rata-rata prediksi model terhadap nilai *Path loss* empiris.

Karena penelitian ini menggunakan *breakpoint distance* teoritis sebesar 28,87 meter sebagai batas pembagian wilayah propagasi, evaluasi dilakukan secara terpisah pada Region 1 (jarak $\leq 28,87$ m) dan Region 2 (jarak $> 28,87$ m). Pendekatan ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kesesuaian masing-masing model propagasi pada kedua wilayah analisis. Hasil evaluasi akurasi kedua model propagasi disajikan pada Tabel 4.10

Tabel 4. 10 Hasil Evaluasi Akurasi Model Propagasi

Region	Model Propagasi	Jumlah Data	RMSE (dB)	Galat Relatif (%)
Region 1 ($\leq 28,87$ m)	<i>Free Space Path Loss</i>	28	21,649	27,42
	<i>Exact Two-Ray</i>	28	14,445	18,30
	<i>Ground Reflection</i>			
Region 2 ($> 28,87$ m)	<i>Free Space Path Loss</i>	53	22,683	25,27
	<i>Exact Two-Ray</i>	53	11,866	13,22
	<i>Ground Reflection</i>			

Berdasarkan Tabel 4.10, model *Exact Two-Ray Ground Reflection* menghasilkan nilai RMSE yang lebih kecil dibandingkan model *Free Space Path loss* pada kedua wilayah propagasi. Pada Region 1, model *Exact Two-Ray* menghasilkan RMSE sebesar 14,445 dB, sedangkan model *Free Space Path loss* menghasilkan RMSE sebesar 21,649 dB. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada wilayah sebelum *breakpoint distance*, model *Exact Two-Ray* memberikan prediksi yang lebih mendekati data empiris dibandingkan model *Free Space Path Loss*, meskipun kedua model masih memiliki nilai galat yang relatif besar. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil pembahasan pada Subbab 4.4 dan Subbab 4.5 yang menunjukkan bahwa hubungan antara *Path loss* dan jarak pada Region 1 masih belum membentuk kecenderungan linier yang kuat. Fluktuasi *Path loss* yang masih cukup besar pada wilayah ini menyebabkan kedua model teoritis belum mampu mengikuti seluruh variasi data hasil pengukuran secara optimal.

Pada Region 2, perbedaan tingkat akurasi kedua model terlihat semakin jelas. Model *Exact Two-Ray Ground Reflection* menghasilkan RMSE sebesar 11,866 dB, sedangkan model *Free Space Path loss* menghasilkan RMSE sebesar 22,683 dB. Nilai tersebut menunjukkan bahwa galat prediksi model *Exact Two-Ray* hampir setengah dari galat prediksi model *Free Space Path loss* pada wilayah setelah *breakpoint distance*. Hasil ini menunjukkan bahwa model *Exact Two-Ray* memiliki tingkat kesesuaian yang lebih baik terhadap data empiris dibandingkan model *Free Space Path loss* pada kondisi pengujian penelitian ini.

Hasil evaluasi juga menunjukkan kecenderungan yang sama pada nilai galat relatif. Pada Region 1, model *Exact Two-Ray* menghasilkan galat relatif sebesar 18,30%, lebih kecil dibandingkan model *Free Space Path loss* sebesar 27,42%. Sementara itu, pada Region 2 galat relatif model *Exact Two-Ray* menurun menjadi 13,22%, sedangkan model *Free Space Path loss* masih sebesar 25,27%. Penurunan galat relatif pada Region 2 mengindikasikan bahwa model *Exact Two-Ray* mampu merepresentasikan karakteristik propagasi setelah *breakpoint distance* dengan lebih baik dibandingkan model *Free Space Path Loss*.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi kuantitatif konsisten dengan komparasi visual pada Subbab 4.7.1. Model *Exact Two-Ray Ground Reflection* menunjukkan

tingkat kesesuaian yang lebih baik terhadap data empiris baik sebelum maupun setelah *breakpoint distance*. Meskipun demikian, nilai RMSE yang masih berada di atas nol menunjukkan bahwa kedua model teoritis belum sepenuhnya merepresentasikan seluruh variasi daya terima yang diperoleh selama pengujian lapangan. Variasi tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh karakteristik propagasi pada lingkungan pengujian, perubahan kondisi lintasan komunikasi selama pengukuran, serta faktor-faktor lain yang tidak dimodelkan secara eksplisit dalam penelitian ini. Dengan demikian, berdasarkan hasil komparasi visual dan evaluasi kuantitatif menggunakan RMSE, model *Exact Two-Ray Ground Reflection* memberikan representasi yang lebih sesuai terhadap karakteristik propagasi komunikasi surface-to-shore pada lingkungan Danau Maninjau dibandingkan model *Free Space Path Loss*.

Berdasarkan seluruh tahapan analisis yang telah dilakukan, mulai dari pengolahan data RSSI, pembentukan *Path loss* empiris, ekstraksi *Path loss Exponent*, kalibrasi model, hingga evaluasi menggunakan RMSE, diperoleh bahwa model *Exact Two-Ray Ground Reflection* memberikan tingkat kesesuaian yang lebih baik dibandingkan model *Free Space Path loss* pada skenario komunikasi surface-to-shore di Danau Maninjau. Temuan ini menunjukkan bahwa karakteristik propagasi pada lingkungan pengujian lebih tepat direpresentasikan oleh model yang mempertimbangkan pengaruh lintasan pantulan dibandingkan model propagasi ruang bebas.

