

**ANALISIS KARAKTERISTIK *PATH LOSS* DAERAH
PERAIRAN PADA WIFI 2,4 GHZ MENGGUNAKAN MODEL
*EXACT TWO-RAY GROUND REFLECTION***

LAPORAN TUGAS AKHIR

*Karya Ilmiah sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan jenjang strata satu
(S-1) di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas*

Oleh

Fadhel

2210951028

Pembimbing

Ir. Hanalde Andre, S.T., M.T.

NIP. 198612252015041001



Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Elektro Fakultas

Teknik Universitas Andalas

2026

LEMBAR PENGESAHAN

Analisis Karakteristik *Path loss* Daerah Perairan Pada Wifi 2,4 GHz
Menggunakan Model *Exact Two-Ray Ground Reflection*

Oleh:

Fadhel

NIM. 2210951028

Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas

Disetujui pada tanggal: 31 Juli 2026

Pembimbing



Ir. Hanalde Andre, S.T., M.T.

NIP. 198612252015041001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Elektro



Prof. Syafii, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 197405051998021001

HALAMAN PENGHARGAAN

Alhamdulillah puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan kemudahan dan kelancaran bagi penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat serta salam tidak lupa penulis ucapkan dan kirimkan kepada junjungan umat manusia yaitu Nabi Muhammad SAW. Penulis secara khusus mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu. Penulis menerima banyak arahan, masukan, motivasi, serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada Allah SWT dengan segala Rahmat dan karunia dari-Nya yang telah memberikan kesempatan, kekuatan dan kemudahan bagi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

1. Mama, Yuni Melysa, engkau adalah pilar kekuatan dan kelembutan dalam hidup. Terima kasih, mama, atas cinta dan dukungan tanpa batas yang telah kau berikan sehingga penulis mampu menyelesaikan studinya.
2. Papa, Mayindra Yandi engkau adalah teladan kegigihan dan kebijaksanaan. Terima kasih, Ayah, karena engkau selalu menjadi benteng pertahanan dan sumber inspirasi bagi penulis sehingga dapat menyelesaikan studinya.
3. Teruntuk ketiga adikku, Maulana Raffi, Qisya Hafidzah, dan Faaz Humam Mudzaffar. Penulis selaku abang berterima kasih atas dukungan yang kalian berikan selama ini.
4. Keluarga besar, terimakasih atas dukungan, motivasi dan juga sebagai tempat rumah kedua bagi penulis selama di Padang.
5. Kepada Bapak Ir. Hanalde Andre, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan bimbingan, arahan, dorongan, dan semangat kepada peneliti, sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
6. Teman Phouse yang telah memberikan dukungan serta semangat yang tidak pernah henti habisnya.
7. Teman Angkatan 22 yang telah hadir dan menyemangati penulis dalam menghadapi Tugas Akhir.

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

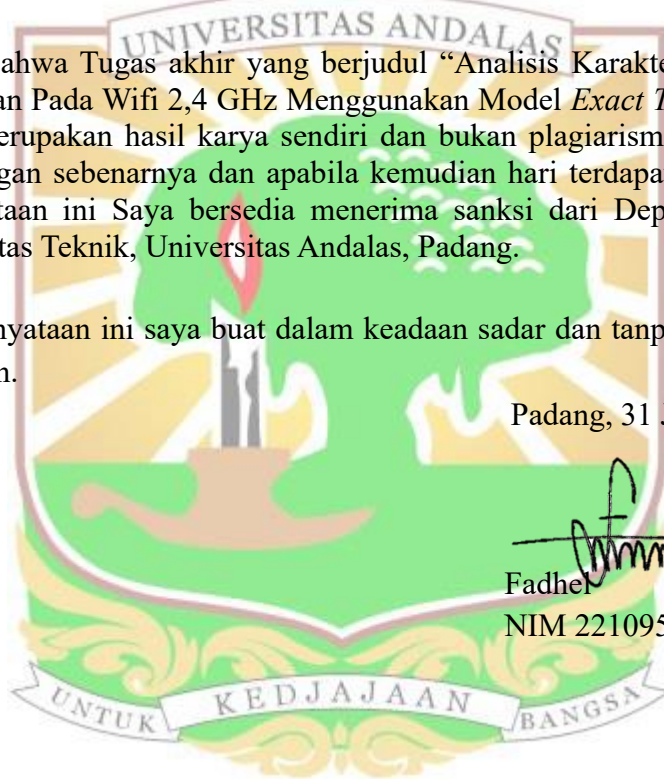
Nama : Fadhel
NIM : 2210951028
Program studi : Teknik Elektro
Perguruan tinggi : Universitas Andalas

Menyatakan bahwa Tugas akhir yang berjudul “Analisis Karakteristik *Path loss* Daerah Perairan Pada Wifi 2,4 GHz Menggunakan Model *Exact Two-Ray Ground Reflection*” merupakan hasil karya sendiri dan bukan plagiarism. Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya dan apabila kemudian hari terdapat penyimpangan dalam pernyataan ini Saya bersedia menerima sanksi dari Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa paksaan dari pihak manapun.

Padang, 31 Juli 2026

Fadhel
NIM 2210951028



RIWAYAT HIDUP



Fadhel, lahir di Padang, Kota Padang, Provinsi Sumatera Barat, pada tanggal 27 Maret 2004. Merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Dilahirkan dari pasangan Bapak Mayindra Yandi dan Ibu Yuni Melysa. Penulis menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di SDN 02 Tanjungpandan, kemudian melanjutkan pendidikan ke SMPN 01 Tanjungpandan. Pada tahun 2022, penulis lulus dari MAN 1 Belitung dan melanjutkan pendidikan sebagai salah satu mahasiswa Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas. Selama menempuh pendidikan di Universitas Andalas penulis aktif dalam kegiatan riset yang dilakukan di organisasi *Andalas Naval Research and Development*. Penulis dipercaya sebagai *Network Engineer* pada pengembangan RSTA-A2 *Autonomous Surface Vessel* (ASV) dan kemudian penulis juga sebagai tim *Project* pada pengembangan RSTA-A3 *Autonomous Surface Vessel* (ASV). Pada proyek tersebut, penulis berfokus pada pengembangan website *real time* dan konfigurasi jaringan. Penulis juga pernah melaksanakan program magang di PT PLN (Persero), Unit Pelaksana Pengatur Distribusi (UP2D), dengan terlibat dalam kegiatan Inspeksi, Monitoring pemeliharaan Kubikel di gardu induk. Semasa masa perkuliahan, Penulis telah menyelesaikan KKN di Nagari Simpang Utara, Kecamatan Simpang Alahan Mati, Kabupaten Pasaman, Sumatera Barat Sebagai Ketua KKN. Penulis juga aktif dalam beberapa kegiatan diantaranya keanggotaan Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HMTE), asisten Laboratorium Pengolahan Sinyal Multimedia, dan asisten Laboratorium Sistem dan Jaringan Telekomunikasi.



Judul	Analisis Karakteristik <i>Path loss</i> Daerah Perairan Pada Wifi 2,4 GHz Menggunakan Model <i>Exact Two-Ray Ground Reflection</i>	Fadhel
Program Studi	Departemen Teknik Elektro	2210951028
Fakultas Teknik		
ABSTRAK Komunikasi nirkabel pada daerah perairan memiliki karakteristik propagasi yang berbeda dibandingkan lingkungan terestrial akibat adanya pantulan gelombang dari permukaan air yang memengaruhi pelemahan sinyal (<i>path loss</i>). Kondisi tersebut menyebabkan model propagasi ruang bebas (<i>Free Space Path loss</i> atau FSPL) tidak selalu mampu merepresentasikan karakteristik propagasi secara akurat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik <i>path loss</i> komunikasi WiFi 2,4 GHz pada daerah perairan, menentukan nilai <i>Path loss Exponent</i> (PLE) empiris, serta mengevaluasi kesesuaian model <i>Exact Two-Ray Ground Reflection</i> terhadap hasil pengukuran dengan menggunakan model FSPL sebagai pembanding. Akuisisi data dilakukan menggunakan sistem berbasis <i>Robot Operating System 2</i> (ROS 2) pada NVIDIA Jetson Orin Nano untuk merekam data <i>Received Signal Strength Indicator</i> (RSSI) dan koordinat GPS secara otomatis. Pengukuran dilakukan sebanyak delapan kali di Danau Maninjau. Data RSSI diproses menggunakan metode <i>Distance Binning</i> untuk memperoleh nilai <i>Local Mean</i>, kemudian dilakukan ekstraksi nilai PLE menggunakan regresi linier berdasarkan <i>breakpoint distance</i> teoritis sebesar 28,87 meter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebanyak 2.187 sampel berhasil diproses menjadi 81 titik <i>Local Mean</i>. Nilai PLE yang diperoleh sebesar 0,0863 pada Region 1 dan 3,4014 pada Region 2. Setelah dilakukan kalibrasi menggunakan faktor <i>offset</i>, model <i>Exact Two-Ray Ground Reflection</i> menghasilkan nilai <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE) sebesar 14,445 dB pada Region 1 dan 11,866 dB pada Region 2, lebih rendah dibandingkan model FSPL yang menghasilkan RMSE sebesar 21,649 dB dan 22,683 dB. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model <i>Exact Two-Ray Ground Reflection</i> lebih mampu merepresentasikan karakteristik propagasi komunikasi WiFi 2,4 GHz pada daerah perairan dibandingkan model FSPL. Kata kunci: <i>path loss</i>, <i>Path loss Exponent</i>, <i>Exact Two-Ray Ground Reflection</i>, WiFi 2,4 GHz, daerah perairan.		

Title	<i>Analysis of Path loss Characteristics in Aquatic Environments for 2.4 GHz WiFi Using the Exact Two-Ray Ground Reflection Model</i>	Fadhel
Mayor	Electrical Engineering Department	2210951028
Engineering Faculty		
ABSTRACT <i>Wireless communication over aquatic environments exhibits propagation characteristics that differ from those in terrestrial environments due to signal reflections from the water surface, which affect signal attenuation (path loss). Consequently, the Free Space Path loss (FSPL) model does not always accurately represent the actual propagation characteristics. This study aims to analyze the path loss characteristics of 2.4 GHz WiFi communication over aquatic environments, determine the empirical Path loss Exponent (PLE), and evaluate the suitability of the Exact Two-Ray Ground Reflection model using the FSPL model as a baseline for comparison. Data acquisition was performed using a Robot Operating System 2 (ROS 2)-based system implemented on an NVIDIA Jetson Orin Nano to automatically record Received Signal Strength Indicator (RSSI) and GPS coordinate data. Field measurements were conducted in eight measurement Runs at Lake Maninjau. The collected RSSI data were processed using the Distance Binning method to obtain Local Mean values, followed by PLE extraction through linear regression based on a theoretical breakpoint distance of 28.87 m. The results show that 2,187 measurement samples were reduced to 81 Local Mean points. The extracted PLE values are 0.0863 for Region 1 and 3.4014 for Region 2. After applying offset-based calibration, the Exact Two-Ray Ground Reflection model achieved Root Mean Square Error (RMSE) values of 14.445 dB and 11.866 dB for Region 1 and Region 2, respectively, which are lower than those obtained using the FSPL model (21.649 dB and 22.683 dB). These results indicate that the Exact Two-Ray Ground Reflection model provides a more accurate representation of 2.4 GHz WiFi propagation characteristics over aquatic environments than the FSPL model.</i> Keywords: <i>path loss, Path loss Exponent, Exact Two-Ray Ground Reflection, 2.4 GHz WiFi, aquatic environment.</i>		

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
HALAMAN PENGHARGAAN.....	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	iv
RIWAYAT HIDUP.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
PRAKATA.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
DAFTAR ISTILAH.....	xvii
DAFTAR SINGKATAN	1
BAB I PENDAHULUAN.....	2
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Komunikasi <i>Surface-to-Shore</i> pada <i>Unmanned Surface Vehicle</i> (USV)	6
2.2 Spektrum Frekuensi WiFi 2,4 GHz.....	8
2.3 Analisis Kelonggaran Zona Fresnel Pertama.....	10
2.4 Model Propagasi Gelombang Radio	12
2.4.1 <i>Free Space Path Loss</i> (FSPL)	13
2.4.2 <i>Two Ray Ground Reflection Model</i>	13
2.4.4 Jarak Transisi (<i>Breakpoint Distance</i>)	15
2.5 <i>Received Signal Strength Indicator</i> (RSSI).....	16

2.5.1	Hubungan RSSI dengan Daya Terima	16
2.5.2	Hubungan RSSI dengan <i>Path Loss</i>	17
2.6	<i>Path loss Exponent</i>	17
2.6.1	Model <i>Log-Distance Path Loss</i>	17
2.6.2	Hubungan <i>Path loss Exponent</i> dengan RSSI	18
2.6.3	Penurunan Model <i>Path loss Exponent</i> Berbasis RSSI	18
2.6.4	Interpretasi Nilai <i>Path loss Exponent</i>	19
2.7	Sistem Penentuan Jarak Berbasis GPS	19
2.7.1	Sistem Penentuan Posisi Berbasis GPS	20
2.7.2	Representasi Koordinat Geografis	20
2.7.3	Jarak <i>Euclidean</i> dan Keterbatasannya	21
2.8	Teorema <i>Haversine</i>	21
2.8.1	Asumsi Bumi sebagai Bola	21
2.8.2	Persamaan Teorema <i>Haversine</i>	22
2.8.3	Dasar Geometris dan Penurunan Singkat Teorema <i>Haversine</i>	22
2.9	Penelitian Terdahulu	23
BAB 3 METODOLOGI		27
3.1	Alir Penelitian	27
3.2	Perancangan Sistem dan Instrumen Pengujian	29
3.2.1	Arsitektur Perangkat Keras	29
3.2.2	Topologi Jaringan dan Komunikasi Data	34
3.3	Pengembangan Perangkat Lunak Akuisisi Data	35
3.3.1	Arsitektur Perangkat Lunak (ROS 2)	36
3.3.2	Algoritma Pembacaan Parameter (RSSI dan GPS)	37
3.3.3	Implementasi Teorema <i>Haversine</i> untuk Penentuan Jarak	39
3.4	Skenario dan Prosedur Pengujian Lapangan	40
3.4.1	Lokasi dan Lingkungan Pengujian	40
3.4.2	Konfigurasi Parameter Fisik (Geometri Antena)	41
3.4.3	Skenario Pergerakan Wahana	42
3.4.4	Standar Operasional Prosedur (SOP) Pengujian	43
3.5	Metode Analisis Data	43
3.5.1	Pra-pemrosesan Data dan <i>Distance Binning</i>	44

3.5.2	Perhitungan <i>Path loss</i> Empiris	45
3.5.3	Ekstraksi <i>Path loss Exponent</i> (<i>n</i>)	45
3.5.4	Kalibrasi Model Propagasi Menggunakan Faktor <i>Offset</i>	46
3.5.5	Evaluasi dan Komparasi Model	47
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		49
4.1	Hasil Akuisisi Data dan Algoritma <i>Haversine</i>	49
4.1.1	Algoritma <i>Haversine</i> Dalam Perhitungan Jarak	54
4.1.2	Analisis Pergerakan dan Kecepatan Wahana	58
4.1.3	Analisis Trajektori USV	60
4.2	Analisis Kekuatan Sinyal (RSSI) Hasil Pengukuran	63
4.3	<i>Distance Binning</i> dan Pengaruhnya Terhadap Data Empiris	64
4.4	Analisis <i>Path loss</i> Empiris dan Penentuan Jarak Transisi	68
4.4.1	Analisis Region 1 ($d \leq 28,87$ meter)	70
4.4.2	Analisis Region 2 ($d > 28,87$ meter)	71
4.5	Ekstraksi <i>Path loss Exponent</i> Menggunakan Regresi Linier	71
4.5.1	Ekstraksi <i>Path loss Exponent</i> pada Region 1	73
4.5.2	Ekstraksi <i>Path loss Exponent</i> pada Region 2	74
4.6	Kalibrasi Model Propagasi Menggunakan Faktor <i>Offset</i>	75
4.7	Komparasi Daya Terima Empiris Terhadap Model Teoritis	76
4.7.1	Komparasi Daya Terima Empiris terhadap Model Teoritis	77
4.7.2	Evaluasi Model Menggunakan <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE)	78
BAB V PENUTUP		81
5.1	Kesimpulan	81
5.2	Saran	82
DAFTAR PUSTAKA		83
LAMPIRAN		90
Lampiran A		90
Lampiran B		93
Lampiran C		95
Lampiran D		99

PRAKATA

Alhamdulillahirabbil 'alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan ridho-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "*Analisis Karakteristik Path Loss Daerah Perairan pada WiFi 2,4 GHz Menggunakan Model Exact Two-Ray Ground Reflection*". Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada junjungan umat Islam, Nabi Muhammad SAW.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Sarjana, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas. Selama proses penelitian dan penyusunan laporan ini, penulis memperoleh banyak pengalaman, pengetahuan, serta pembelajaran yang sangat berharga.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki berbagai kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan karya ilmiah ini di masa mendatang.

Akhir kata, penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta menjadi salah satu referensi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang sistem komunikasi nirkabel dan propagasi gelombang radio

Padang, 31 Juli 2026

Fadhel

NIM 2210951028

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu	23
Tabel 4. 1 Spesifikasi Sistem Komunikasi Ground Station dan USV	52
Tabel 4. 2 Rekapitulasi Profil Akuisisi Data Mentah Pada Setiap Repetisi (Run) Pergerakan USV.	53
Tabel 4. 3 Sample Data Mentah Pada Index Ke-738.....	55
Tabel 4. 4 Hubungan Ketelitian Koordinat Geografis Terhadap Resolusi Jarak..	57
Tabel 4. 5 Ringkasan Hasil Proses Distance Binning.....	66
Tabel 4. 6 Cuplikan Hasil Pra-Pemrosesan Data Lapangan Menggunakan Metode Distance Binning Per 1 Meter.....	67
Tabel 4. 7 Pembagian Wilayah Analisis Propagasi Berdasarkan Breakpoint Distance.....	69
Tabel 4. 8 Hasil Ekstraksi Parameter Regresi Linier Bersegmen.....	73
Tabel 4. 9 Perhitungan Parameter Kalibrasi Offset Berdasarkan Jarak Referensi Terdekat.....	76
Tabel 4. 10 Hasil Evaluasi Akurasi Model Propagasi	79



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram Umum Unmanned Surface Vehicle (USV) Beserta Komponen Pendukung Operasional [17].	6
Gambar 2. 2 Arsitektur Komunikasi Surface-To-Shore Untuk Pertukaran Data Pada Sistem USV [19].	7
Gambar 2. 3 Ilustrasi Propagasi Gelombang Radio di Atas Permukaan Air yang Menunjukkan Interferensi Multipath Dari Direct Path Dan Reflected Path [22]. ..	8
Gambar 2. 4 Distribusi Kanal Wifi Pada Pita Frekuensi 2,4 GHz dan Konsep Kanal Tidak Saling Tumpang Tindih (Non-Overlapping Channels) [27].	8
Gambar 2. 5 Model Propagasi Multipath Gelombang Radio di Atas Permukaan Air Dengan Komponen Lintasan Langsung, Refleksi Spekular, dan Refleksi Difus [29].	9
Gambar 2. 6 Representasi zona Fresnel dan pengaruh hambatan terhadap propagasi gelombang radio [28].	10
Gambar 2. 7 Lustrasi Clearance Zona Fresnel Pertama Pada Sistem Komunikasi Radio Dengan Hambatan di Sepanjang Jalur Line-Of-Sight [35].	11
Gambar 2. 8 Two Ray Ground Reflection Model [3].	14
Gambar 2. 9 Proses Trilateration GPS Berbasis Pseudorange Yang Menunjukkan Kebutuhan Minimal Empat Satelit Untuk Estimasi Posisi dan Sinkronisasi Waktu [56].	20
Gambar 3. 1 Diagram Alir Metodologi Penelitian	28
Gambar 3. 2 Router Tp-Link Mr100	29
Gambar 3. 3 TP-Link CPE210.....	30
Gambar 3. 4 Laptop Operator Lenovo Ideapad 330	30
Gambar 3. 5 Remote Control Radiomaster Boxer JP4IN1	31
Gambar 3. 6 Wahana Kapal USV	31
Gambar 3. 7 Single Board Computer (Nvidia Jetson Super Orin Nano)	32
Gambar 3. 8 MikroTik Groove A-52HPn.....	32
Gambar 3. 9 RadioLink SE100 GPS	33
Gambar 3. 10 Receiver Teleoperasi (FlySky FS-R7P).....	33
Gambar 3. 11 Sistem Catu Daya (Power Supply)	33
Gambar 3. 12 Flight Controller (Pixhawk).....	34
Gambar 3. 13 Diagram Blok Topologi Jaringan dan Komunikasi Data	34
Gambar 3. 14 arsitektur aliran komunikasi data antar node	36
Gambar 3. 15 Algoritma Pembacaan RSSI	38
Gambar 3. 16 Diagram Alir Implementasi Algoritma Haversine	40
Gambar 3. 17 Lokasi Pengujian Danau Maninjau.....	41

Gambar 3. 18 Ilustrasi Skenario Pergerakan Radial USV dan Transisi Region Propagasi	42
Gambar 3. 19 Diagram Alir Metode Analisis Data	44
Gambar 4. 1 Proses Akuisisi Data Propagasi Gelombang Radio Menggunakan Wahana USV di Danau Maninjau.	50
Gambar 4. 2 Lintasan Pengambilan Data Pada Salah Satu Sample Pengujian Berdasarkan Koordinat GPS	50
Gambar 4. 3 Konfigurasi Komunikasi Ground Station.	51
Gambar 4. 4 Konfigurasi Komunikasi USV	51
Gambar 4. 5 Grafik Pergerakan Jarak Pengujian Terhadap Waktu Pada Delapan Repetisi Pengujian.....	58
Gambar 4. 6 Kecepatan Rata-Rata Linier Wahana USV Pada Setiap Repetisi Pengujian.....	59
Gambar 4. 7 Trajektori Lintasan USV Pada Delapan Repetisi Pengujian yang Ditampilkan Pada Peta Lokasi Pengujian.	61
Gambar 4. 8 Validasi Trajektori Spasial USV Berdasarkan Koordinat Latitude dan Longitude.	62
Gambar 4. 9 Grafik Sebaran Data Mentah (Raw Data) RSSI Terhadap Jarak Operasional Wahana USV di Danau Maninjau.....	63
Gambar 4. 10 Pengaruh Proses Distance Binning Terhadap Sebaran Data RSSI.	65
Gambar 4. 11 Grafik Nilai Path Loss Empiris Hasil Kalkulasi Data Lapangan Terhadap Pertambahan Jarak.....	68
Gambar 4. 12 Hasil Analisis Regresi Linier Bersegmen (Ordinary Least Squares) Terhadap Data Path Loss Empiris Berdasarkan Breakpoint Distance.	72
Gambar 4. 13 Komparasi RSSI Empiris Terhadap Model Propagasi Teoritis Hasil Kalibrasi	77



DAFTAR SIMBOL

Simbol	Nama	Keterangan
P_t	Daya pancar	Daya yang dipancarkan oleh antena pemancar
P_r	Daya terima	Daya yang diterima oleh antena penerima
PL	<i>Path Loss</i>	Redaman propagasi antara pemancar dan penerima
n	<i>Path loss Exponent</i>	Eksponen redaman propagasi
d_c	<i>Breakpoint Distance</i>	Jarak transisi antara Region 1 dan Region 2
h_t	Tinggi antena pemancar	Tinggi antena <i>Ground Station</i> dari permukaan air
h_r	Tinggi antena penerima	Tinggi antena USV dari permukaan air
Λ	Panjang gelombang	Panjang gelombang sinyal radio
Γ	Koefisien refleksi	Koefisien refleksi permukaan air pada model <i>Two-Ray</i>
Φ	Beda fase	Perbedaan fase antara lintasan langsung dan lintasan pantul
(G_t)	Gain antena pemancar	Penguatan antena pemancar
(G_r)	Gain antena penerima	Penguatan antena penerima
N	Jumlah data	Banyaknya sampel atau observasi

DAFTAR LAMPIRAN

Tabel A. 1 Data Hasil <i>Distance Binning</i>	90
Tabel B. 1 Data Hasil Perhitungan Path loss	93
Tabel C. 1 Data Hasil Perhitungan Teoritis Model Propagasi.....	95
Tabel C. 2 Data Hasil Perhitungan Kalibrasi Dan Error Model Propagasi	97



DAFTAR ISTILAH

<i>Surface-to-Shore</i>	Komunikasi nirkabel antara wahana USV yang berada di permukaan air dengan stasiun darat (<i>Ground Station</i>).
<i>Ground Station</i>	Stasiun pengendali di darat yang berfungsi sebagai pusat komunikasi dengan USV.
<i>Path Loss</i>	Pelemahan daya sinyal radio selama proses propagasi dari pemancar menuju penerima.
<i>Path loss Exponent</i>	Parameter yang menunjukkan laju pelemahan sinyal terhadap pertambahan jarak propagasi.
<i>Distance Binning</i>	Metode pengelompokan data berdasarkan interval jarak tertentu untuk memperoleh nilai representatif pada setiap interval.
<i>Local Mean RSSI</i>	Nilai rata-rata RSSI pada setiap interval jarak hasil proses <i>Distance Binning</i> .
<i>Breakpoint Distance</i>	Jarak transisi yang membatasi perubahan karakteristik propagasi menjadi dua region analisis.
<i>Free Space Propagation</i>	Kondisi propagasi gelombang radio tanpa adanya penghalang maupun pantulan.
<i>Two-Ray Ground Reflection</i>	Model propagasi yang mempertimbangkan lintasan langsung dan lintasan pantulan dari permukaan.
<i>Line-of-Sight (LOS)</i>	Kondisi ketika pemancar dan penerima memiliki lintasan propagasi langsung tanpa hambatan.
<i>Multipath Propagation</i>	Fenomena propagasi ketika sinyal diterima melalui lebih dari satu lintasan akibat pantulan.
<i>Reflection Coefficient</i>	Besaran yang menyatakan karakteristik pemantulan gelombang elektromagnetik pada suatu permukaan.
<i>Regression</i>	Metode statistik yang digunakan untuk memperoleh hubungan matematis antara variabel penelitian.
<i>Small-Scale Fading</i>	Fluktuasi cepat kekuatan sinyal yang terjadi akibat interferensi <i>multipath</i> dalam jarak yang relatif pendek.
<i>Large-Scale Fading</i>	Variasi rata-rata daya sinyal akibat pertambahan jarak propagasi dan karakteristik lingkungan.
<i>Link Budget</i>	Perhitungan keseimbangan daya antara pemancar dan penerima pada suatu sistem komunikasi radio.

DAFTAR SINGKATAN

USV	<i>Unmanned Surface Vehicle</i>
ROS 2	<i>Robot Operating System 2</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
FSPL	<i>Free Space Path Loss</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
PLE	<i>Path loss Exponent</i>
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i>
LOS	<i>Line-of-Sight</i>
SBC	<i>Single Board Computer</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
SSID	<i>Service Set Identifier</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
dB	<i>Desibel</i>
dBm	<i>Desibel-milliwatt</i>
dB _i	<i>Desibel Isotropik</i>
GHz	<i>Gigahertz</i>
MHz	<i>Megahertz</i>
Hz	<i>Hertz</i>
m	<i>Meter</i>
s	<i>Sekon (Second)</i>



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan sistem komunikasi nirkabel telah menjadi salah satu teknologi yang mendukung berbagai aplikasi modern, seperti sistem pemantauan, otomasi, *Internet of Things* (IoT), hingga kendaraan tanpa awak. Salah satu teknologi yang masih banyak digunakan adalah WiFi pada pita frekuensi 2,4 GHz karena memiliki keunggulan berupa spektrum bebas lisensi, biaya implementasi yang relatif rendah, serta kompatibilitas yang luas dengan standar IEEE 802.11. Pada berbagai aplikasi di lingkungan terbuka, termasuk komunikasi pada daerah perairan, keandalan sistem komunikasi sangat dipengaruhi oleh karakteristik propagasi gelombang radio yang terjadi pada media transmisi [1-2].

Karakteristik propagasi gelombang radio pada daerah perairan memiliki kondisi yang berbeda dibandingkan dengan lingkungan daratan. Permukaan air memiliki sifat reflektif yang tinggi sehingga sinyal yang diterima tidak hanya berasal dari lintasan langsung (*line-of-sight*), tetapi juga dari lintasan pantulan permukaan air [3]. Superposisi kedua lintasan tersebut dapat menimbulkan interferensi konstruktif maupun destruktif yang menyebabkan fluktuasi daya terima serta perubahan karakteristik redaman sinyal terhadap jarak [4]. Akibatnya, model propagasi ruang bebas (*Free Space Path loss* atau FSPL) yang mengasumsikan hanya terdapat satu lintasan propagasi tidak selalu mampu merepresentasikan kondisi propagasi sebenarnya pada lingkungan perairan [5-6]. Salah satu parameter penting dalam analisis propagasi adalah *path loss*, yaitu besarnya pelemahan daya sinyal selama proses perambatan dari antenna pemancar menuju antenna penerima. Informasi mengenai karakteristik *path loss* sangat diperlukan dalam perancangan sistem komunikasi nirkabel karena berkaitan dengan estimasi jangkauan komunikasi, perhitungan *link budget*, pemilihan konfigurasi antenna, serta evaluasi kualitas kanal komunikasi [7].

Pada lingkungan perairan, salah satu model propagasi yang banyak digunakan adalah *Exact Two-Ray Ground Reflection* karena mempertimbangkan keberadaan lintasan langsung dan lintasan pantulan permukaan secara simultan [4]. Berbeda dengan model *Free Space Path Loss*, model ini mampu merepresentasikan pengaruh refleksi permukaan terhadap daya sinyal yang diterima sehingga lebih sesuai untuk lingkungan dengan dominasi pantulan, seperti danau, sungai, maupun wilayah pesisir [8-9]. Namun demikian, karakteristik propagasi pada setiap lingkungan tetap dipengaruhi oleh kondisi fisik lokasi, konfigurasi antenna, serta geometri komunikasi, sehingga kesesuaian model propagasi perlu dievaluasi menggunakan data hasil pengukuran lapangan [6,10].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengkaji karakteristik propagasi gelombang radio pada komunikasi nirkabel dengan pendekatan dan fokus yang

beragam. De Piante dkk. melakukan pengukuran *path loss* pada lingkungan laut menggunakan pita frekuensi sub-GHz dan menunjukkan bahwa karakteristik propagasi di atas permukaan air berbeda dengan ruang bebas sehingga menghasilkan nilai *Path loss Exponent* (PLE) yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan [6]. Selanjutnya, Eyuboglu dkk. mengevaluasi beberapa model propagasi pada komunikasi *shore-to-ship* frekuensi 5,6 GHz dan menunjukkan bahwa model yang mempertimbangkan karakteristik propagasi lingkungan perairan memberikan tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan model konvensional [10]. Dari sisi pengembangan model, Staudinger dkk. menjelaskan bahwa fenomena *breakpoint distance* merupakan salah satu karakteristik utama pada model Two-Ray Ground Reflection yang membedakan perilaku propagasi sebelum dan sesudah titik transisi [4]. Sementara itu, berbagai penelitian mengenai komunikasi WiFi 2,4 GHz menunjukkan bahwa pita frekuensi ini masih banyak digunakan pada sistem komunikasi nirkabel berbasis RSSI untuk analisis propagasi dan estimasi jarak, namun sebagian besar penelitian masih dilakukan pada lingkungan *indoor* maupun *terrestrial* [11-13]. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik propagasi dipengaruhi oleh frekuensi operasi, kondisi lingkungan, serta model propagasi yang digunakan, sehingga diperlukan kajian lebih lanjut untuk mengevaluasi karakteristik propagasi WiFi 2,4 GHz pada lingkungan perairan menggunakan model propagasi yang sesuai.

Meskipun berbagai penelitian mengenai komunikasi WiFi 2,4 GHz, propagasi pada lingkungan perairan, pengembangan model propagasi, serta ekstraksi *Path loss Exponent* telah banyak dilakukan, sebagian besar penelitian tersebut masih membahas aspek-aspek tersebut secara terpisah. Penelitian pada lingkungan perairan umumnya dilakukan pada frekuensi sub-GHz, 3,2 GHz, maupun 5,6 GHz [9-10,14], sedangkan penelitian WiFi 2,4 GHz lebih banyak difokuskan pada lingkungan *indoor* maupun *terrestrial* [11-12]. Di sisi lain, penelitian yang menggunakan model *Two-Ray Ground Reflection* umumnya masih berupa analisis teoritis atau pengembangan model, sedangkan validasi empiris terhadap model *Exact Two-Ray Ground Reflection* menggunakan data hasil pengukuran lapangan masih relatif terbatas. Selain itu, kajian mengenai karakteristik *path loss* dan *Path loss Exponent* pada komunikasi WiFi 2,4 GHz di atas permukaan air, khususnya pada lingkungan perairan Indonesia, masih belum banyak dilaporkan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa masih diperlukan penelitian yang mampu mengintegrasikan pengukuran empiris WiFi 2,4 GHz di lingkungan perairan dengan analisis *path loss*, ekstraksi *Path loss Exponent*, serta evaluasi model *Exact Two-Ray Ground Reflection* menggunakan parameter RMSE, sehingga diperoleh validasi empiris terhadap penerapan model propagasi tersebut pada lingkungan perairan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik *path loss* pada komunikasi WiFi 2,4 GHz di daerah perairan menggunakan model *Exact Two-Ray Ground Reflection*. Pengukuran

dilakukan pada skenario komunikasi *surface-to-shore*, dengan *Unmanned Surface Vehicle* (USV) digunakan sebagai platform pengambilan data selama proses pengujian [2,15]. Data hasil pengukuran selanjutnya dianalisis untuk memperoleh karakteristik *path loss* empiris, menentukan nilai *Path loss Exponent*, serta mengevaluasi kesesuaian model propagasi terhadap kondisi lapangan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan maupun perancangan sistem komunikasi nirkabel pada lingkungan perairan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik *path loss* komunikasi WiFi 2,4 GHz pada daerah perairan berdasarkan data hasil pengukuran lapangan?
2. Bagaimana nilai *Path loss Exponent* (PLE) yang diperoleh dari karakteristik *path loss* empiris pada komunikasi WiFi 2,4 GHz di daerah perairan?
3. Bagaimana kesesuaian model *Exact Two-Ray Ground Reflection* terhadap karakteristik *path loss* empiris pada komunikasi WiFi 2,4 GHz di daerah perairan?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik *path loss* komunikasi WiFi 2,4 GHz pada daerah perairan berdasarkan data hasil pengukuran lapangan.
2. Menentukan nilai *Path loss Exponent* (PLE) berdasarkan karakteristik *path loss* empiris pada komunikasi WiFi 2,4 GHz di daerah perairan.
3. Mengevaluasi kesesuaian model *Exact Two-Ray Ground Reflection* terhadap karakteristik *path loss* empiris pada komunikasi WiFi 2,4 GHz di daerah perairan.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang dibahas pada tugas akhir ini adalah :

1. Frekuensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah WiFi pada pita 2,4 GHz.
2. Daya pancar (*transmit power*) pada stasiun darat ditetapkan secara konstan pada nilai 27 dBm.
3. Penggunaan antena dibatasi pada jenis *directional* dengan penguatan 9 dBi untuk pemancar dan *omni-directional* 6 dBi untuk penerima.
4. Objek penelitian dibatasi pada satu unit *Unmanned Surface Vehicle* (USV).
5. Lingkungan pengujian dilakukan pada perairan air tawar dengan kondisi *line-of-sight* (LOS).
6. Pengukuran dilakukan pada kondisi cuaca relatif stabil dan tidak membahas pengaruh cuaca ekstrem.
7. Model propagasi yang dievaluasi adalah *Exact Two-Ray Ground Reflection* dan *Free Space Path Loss*

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari tugas akhir ini adalah :

1. Menjadi referensi dalam perancangan sistem komunikasi nirkabel untuk *Unmanned Surface Vehicle* (USV) yang beroperasi di lingkungan perairan terbuka.
2. Menyediakan data empiris yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan dan validasi model propagasi gelombang radio pada komunikasi *surface-to-shore*.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari tugas akhir ini adalah:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori dasar yang mendukung dalam penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

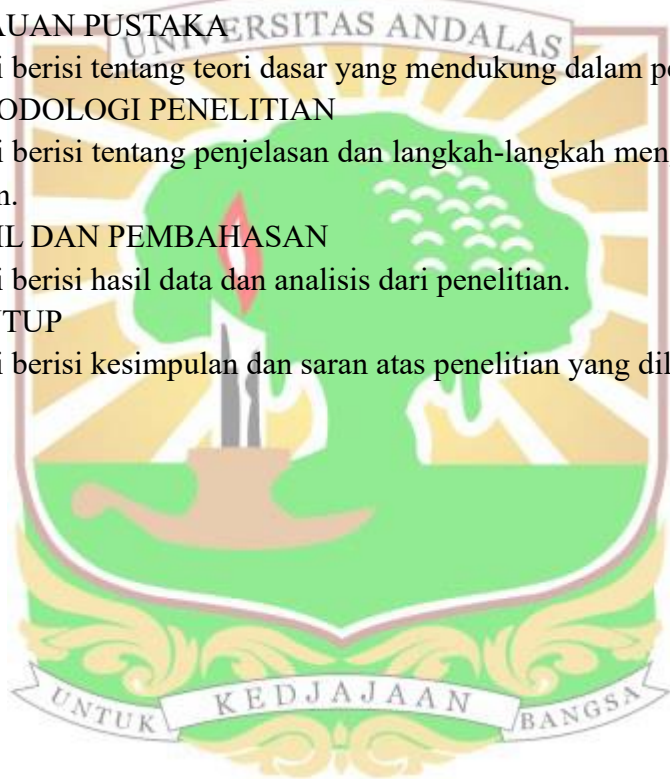
Bab ini berisi tentang penjelasan dan langkah-langkah mengenai penelitian yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi hasil data dan analisis dari penelitian.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran atas penelitian yang dilakukan.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komunikasi *Surface-to-Shore* pada *Unmanned Surface Vehicle* (USV)

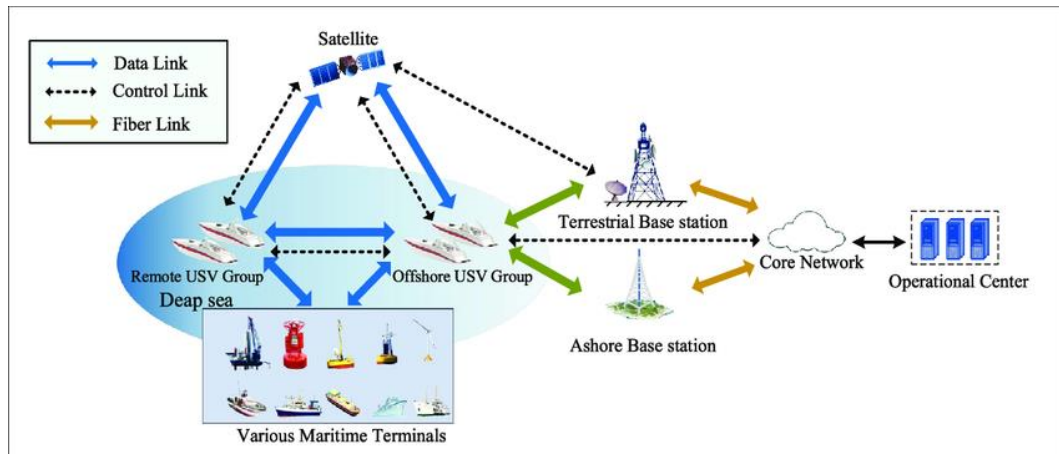
Unmanned Surface Vehicle (USV) merupakan platform cerdas nirawak yang beroperasi di permukaan air untuk menjalankan misi navigasi secara otonom maupun semi-otonom (teleoperasi) [15]. Dalam pengujian eksperimental skala lapangan, seperti akuisisi data propagasi, mode teleoperasi sering kali digunakan secara spesifik untuk menjamin pergerakan lintasan wahana tetap presisi sesuai dengan rancangan skenario pengukuran. Agar dapat beroperasi secara optimal, platform USV mengintegrasikan berbagai subsistem yang kompleks, mulai dari sistem propulsi mekanik, modul sensor geospasial, unit pemroses data, hingga modul komunikasi radio. Berbagai komponen penyusun dan instrumen operasional tersebut dapat dilihat secara representatif pada Gambar 2.1. Gambar ini mengilustrasikan anatomi sebuah wahana air modern yang membutuhkan ekosistem perangkat keras terpadu agar dapat memfasilitasi komunikasi dan pengukuran data lingkungan kelautan secara mandiri [16-18].



Gambar 2. 1 Diagram Umum *Unmanned Surface Vehicle* (USV) Beserta Komponen Pendukung Operasional [17].

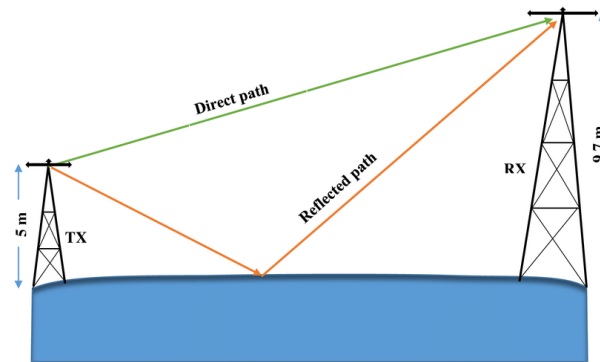
Keberhasilan integrasi seluruh komponen pada Gambar 2.1 tersebut sangat bergantung pada ketersediaan dan keandalan sistem komunikasi nirkabel. Secara umum, arsitektur komunikasi yang diimplementasikan pada USV berjenis *surface-to-shore*, yang topologinya diilustrasikan pada Gambar 2.2. Pada arsitektur ini, stasiun kendali darat (*Ground Control Station*) bertindak sebagai pusat komando yang membangun pertukaran data dua arah dengan USV yang berlayar di perairan

[19]. Tautan komunikasi nirkabel tersebut memegang peranan sangat krusial, karena bertugas membawa aliran data multi-variabel; mulai dari sinyal perintah kendali manuver (*control link*), transmisi data titik koordinat (telemetri), hingga aliran data sensor berkapasitas besar seperti *streaming* video beresolusi tinggi [20-21]. Kegagalan atau tingginya latensi pada tautan *surface-to-shore* ini tidak hanya menyebabkan hilangnya data, tetapi juga berisiko tinggi terhadap keselamatan fisik wahana, seperti kehilangan kendali yang berujung pada tabrakan [17].



Gambar 2. 2 Arsitektur Komunikasi *Surface-To-Shore* Untuk Pertukaran Data Pada Sistem USV [19].

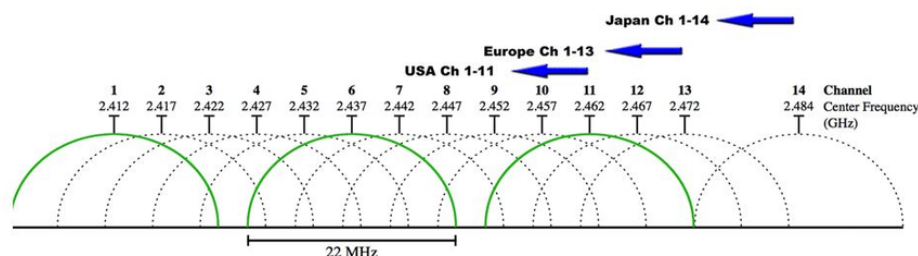
Meskipun arsitektur pada Gambar 2.2 terlihat konseptual, implementasinya di dunia nyata berhadapan dengan karakteristik fisik lingkungan perairan yang sangat keras dan dinamis. Tantangan fundamental propagasi gelombang radio di atas permukaan air ini dijelaskan secara visual pada Gambar 2.3. Tidak seperti lingkungan daratan (*terrestrial*) yang redamannya banyak dipengaruhi oleh absorpsi material atau hambatan gedung, permukaan air memiliki konstanta dielektrik yang tinggi sehingga menjadikannya reflektor (pemantul) yang sangat efisien [22]. Seperti yang ditunjukkan pada ilustrasi, sinyal yang memancar dari stasiun darat tidak hanya merambat lurus menuju USV melalui jalur langsung (*direct path*), tetapi sebagian besar energinya juga menghantam air dan memantul ke arah antenna penerima (*reflected path*). Fenomena ini menciptakan superposisi gelombang yang dikenal sebagai interferensi *multipath* [23]. Akibatnya, sistem penerima di USV akan menangkap sinyal-sinyal tersebut pada fase dan waktu yang berbeda, memicu fluktuasi *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) yang sangat ekstrem. Kondisi ini semakin diperparah oleh riak ombak yang membuat lambung kapal terus bergoyang, sehingga orientasi tangkapan antenna akan berubah-ubah setiap detiknya. Untuk mempertahankan keandalan transmisi data bervolume besar di tengah tantangan fisik propagasi *multipath* perairan tersebut, pemilihan spesifikasi teknologi nirkabel dan karakteristik spektrum frekuensi yang tepat menjadi syarat mutlak bagi operasional USV



Gambar 2. 3 Ilustrasi Propagasi Gelombang Radio di Atas Permukaan Air yang Menunjukkan *Interferensi Multipath* Dari *Direct Path* Dan *Reflected Path* [22].

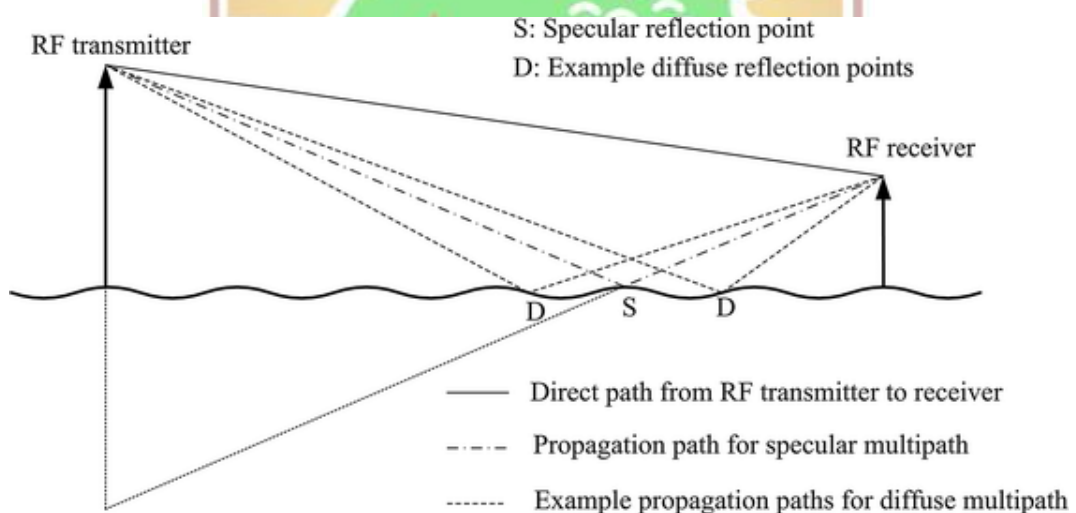
2.2 Spektrum Frekuensi WiFi 2,4 GHz

Teknologi WiFi yang beroperasi berdasarkan standar spesifikasi IEEE 802.11 merupakan protokol *Wireless Local Area Network* (WLAN) yang mendukung transmisi data berbasis *Internet Protocol* (IP) [24]. Spektrum frekuensi WiFi pada pita ini bekerja dalam rentang spektrum *Industrial, Scientific, and Medical* (ISM) bebas lisensi (*license-free*), yaitu antara 2,4 GHz hingga 2,4835 GHz [25]. Alokasi frekuensi ini dibagi menjadi beberapa kanal selebar 20 MHz, di mana distribusi pengaturan kanal dan konsep kanal yang tidak saling tumpang tindih (*non-overlapping channels*) dapat dilihat secara mendalam pada Gambar 2.4. Berdasarkan visualisasi tersebut, pengaturan kanal yang renggang sangat krusial dalam perancangan jaringan untuk meminimalkan interferensi antar-saluran yang berdekatan. Dalam konteks penelitian USV di lingkungan perairan terbuka Danau Maninjau, penggunaan jaringan lokal tertutup (*closed local network*) bertipe *Point-to-Point* (P2P) sengaja diterapkan untuk mengisolasi kanal komunikasi, sehingga nilai redaman sinyal yang terukur murni berasal dari karakteristik medium perairan tanpa adanya bias latensi akibat kepadatan spektrum dari teknologi nirkabel lain [26].



Gambar 2. 4 Distribusi Kanal Wifi Pada Pita Frekuensi 2,4 GHz dan Konsep Kanal Tidak Saling Tumpang Tindih (*Non-Overlapping Channels*) [27].

Ditinjau dari aspek fisika gelombang elektromagnetik, frekuensi operasi memiliki hubungan terbalik yang mutlak terhadap panjang gelombang (λ). Pada frekuensi 2,4 GHz, nilai panjang gelombangnya berada pada kisaran 12,08 cm [25]. Karakteristik fisik panjang gelombang 12,08 cm ini memberikan dampak langsung terhadap perilaku propagasi sinyal saat berinteraksi dengan permukaan air. Sifat air danau yang relatif datar dan memiliki konduktivitas tinggi menjadikannya sebagai medium reflektor spekular yang sangat efisien bagi gelombang mikro. Ketika gelombang elektromagnetik WiFi 2,4 GHz menghantam permukaan air yang tenang, sebagian besar energi gelombangnya akan dipantulkan kembali dengan sudut yang sama terhadap sudut datang. Perilaku interaksi ini memicu pembentukan lintasan jamak (*multipath channel*), seperti yang dimodelkan secara matematis melalui komponen lintasan langsung (*direct ray*) serta komponen refleksi spekular dan difus (*reflected ray*) pada Gambar 2.5 [28].



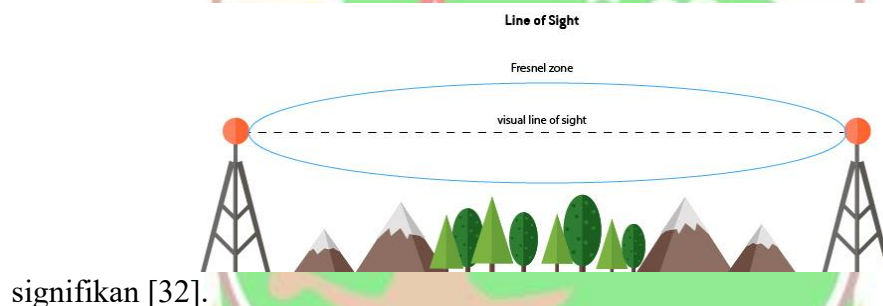
Gambar 2. 5 Model Propagasi *Multipath* Gelombang Radio di Atas Permukaan Air Dengan Komponen Lintasan Langsung, Refleksi Spekular, dan Refleksi Difus [29].

Melalui pemodelan saluran pada Gambar 2.5, terlihat jelas mengapa perairan danau dikategorikan sebagai lingkungan yang bersih secara spasial (*line-of-sight* terbuka) namun sangat dinamis secara gelombang elektromagnetik. Berbeda dengan lingkungan daratan terrestrial yang memiliki konturi bumi tidak beraturan serta hambatan berupa vegetasi atau bangunan, lingkungan danau cenderung homogen secara materi namun fluktuatif secara fisik akibat adanya riak gelombang kecil. Meskipun kontribusi hamburan (*scattering*) akibat riak air kecil ini lebih minor dibandingkan dengan kekuatan pantulan spekular utamanya, pergerakan dinamis permukaan air ini secara konstan merubah perbedaan fase antara *direct ray* dan *reflected ray* yang tiba di antenna USV [28]. Ketika kedua

gelombang tersebut bertemu pada fase yang berlawanan mendekati 180° , interferensi destruktif akan terjadi dan memicu penurunan daya terima secara tajam [30]. Dinamika inilah yang membentuk fenomena *small-scale fading*, yang melandasi pentingnya penggunaan metode perataan statistik (*averaging*) dalam proses akuisisi data ini agar karakteristik pelemahan sinyal skala besar (*large-scale path loss*) dapat terekstraksi tanpa bias fluktuasi sesaat.

2.3 Analisis Kelonggaran Zona Fresnel Pertama

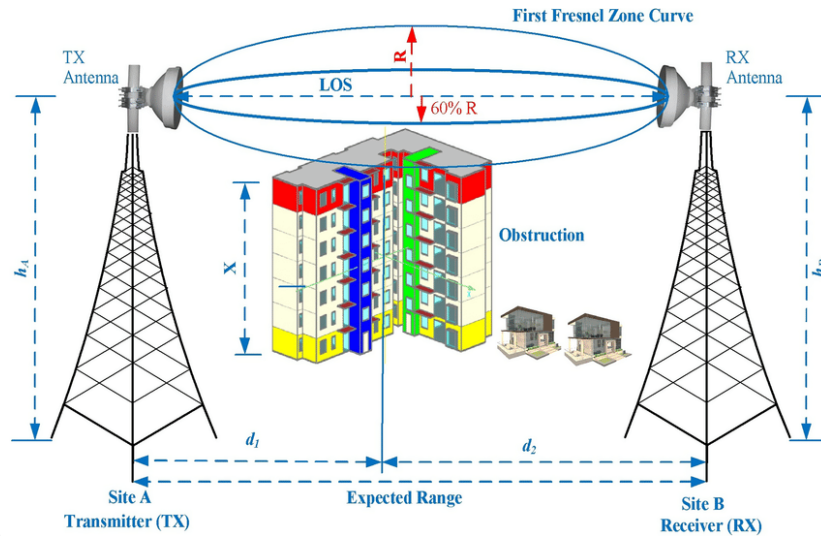
Zona Fresnel merupakan konsep fundamental dalam teknik propagasi gelombang radio yang menggambarkan volume berbentuk elipsoid di sekitar jalur langsung (*line-of-sight*) antara antenna pemancar dan antenna penerima [31]. Berbeda dengan asumsi geometris konvensional yang memandang perambatan sinyal sebagai garis lurus tunggal, energi gelombang elektromagnetik sebenarnya menyebar dalam ruang tiga dimensi berbentuk elipsoid tersebut. Karakteristik spasial ini ditunjukkan secara visual pada Gambar 2.6, di mana keberadaan objek fisik atau permukaan reflektif yang memasuki batas volume elipsoid ini akan memicu terjadinya perubahan fase dan amplitudo pada sinyal terima secara



signifikan [32].

Gambar 2. 6 Representasi zona Fresnel dan pengaruh hambatan terhadap propagasi gelombang radio [28].

Dalam struktur ruang elipsoid tersebut, Zona Fresnel terbagi menjadi beberapa lapisan zona konsentris. Di antara lapisan-lapisan tersebut, Zona Fresnel pertama (*first Fresnel zone*) memiliki kontribusi elektronika yang paling dominan dalam menentukan kualitas daya sinyal yang diterima. Batas spasial Zona Fresnel pertama didefinisikan sebagai daerah tempat perbedaan panjang lintasan antara gelombang langsung (*direct ray*) dan gelombang sekunder yang melewati batas terluar zona tersebut bernilai tepat setengah panjang gelombang ($\frac{1}{2}\lambda$) [33]. Berdasarkan teori propagasi, untuk menjaga kualitas *link* komunikasi yang optimal, sekitar 60% dari jari-jari Zona Fresnel pertama ($0,6R$) sebaiknya bebas dari segala bentuk hambatan fisik [34]. Batasan kelonggaran ruang rambat (*clearance*) dan dampak pemotongan elipsoid oleh suatu objek penghalang (*obstruction*) di sepanjang jalur transmisi ini dapat dipahami secara konseptual melalui Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Lustrasi *Clearance* Zona Fresnel Pertama Pada Sistem Komunikasi Radio Dengan Hambatan di Sepanjang Jalur *Line-Of-Sight* [35].

Secara analogi, jika objek gedung pada Gambar 2.8 memotong Zona Fresnel dari arah bawah karena faktor ketinggian bangunan, maka pada sistem komunikasi *surface-to-shore* USV, faktor pemotong terbesarnya adalah permukaan air itu sendiri yang dipicu oleh konfigurasi geometri antena yang sangat rendah. Dengan ketinggian antena penerima di sisi lambung kapal yang hanya berada pada posisi $h_r = 0,45$ meter di atas garis air (*Load Waterline* / LWL) saat beban penuh, bagian bawah dari elipsoid Zona Fresnel pertama akan secara otomatis terpotong oleh permukaan air danau. Pemotongan ruang rambat ini terjadi secara kontinu di sepanjang lintasan pergerakan wahana, meskipun secara visual pandangan mata (*visual line-of-sight*) antara stasiun darat dan USV tidak terhalang oleh objek vertikal apa pun [36].

Secara matematis, variasi nilai jari-jari Zona Fresnel ke- n (r_n) pada titik tertentu di sepanjang jalur propagasi dikalkulasikan menggunakan rumusan pada Persamaan 2.1 berikut [3]:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.1)$$

Keterangan:

r_n = jari-jari zona Fresnel ke- n (meter)

n = nomor zona Fresnel

λ = panjang gelombang

$d_1 d_2$, = jarak dari titik tersebut ke pemancar dan penerima (meter).

Di mana r_n merepresentasikan jari-jari zona Fresnel ke- n dalam satuan meter, n adalah indeks nomor zona, λ adalah panjang gelombang operasi (12,08 cm pada frekuensi 2,4 GHz), serta d_1 dan d_2 masing-masing menyatakan jarak titik ukur dari antenna pemancar dan antenna penerima. Berdasarkan karakteristik Persamaan 2.1 tersebut, nilai jari-jari maksimum elipsoid (R_{max}) akan tercapai tepat pada titik tengah jalur komunikasi ($d_1 = d_2 = \frac{d}{2}$). Pada jarak jangkauan komunikasi WiFi ratusan meter, nilai jari-jari Zona Fresnel pertama ($n = 1$) akan melebar hingga mencapai orde meter [34]. Dimensi elipsoid yang masif ini, jika dikomparasikan dengan tinggi antenna USV yang sangat rendah, menjelaskan mengapa permukaan air Danau Maninjau bertindak sebagai faktor pengganggu utama yang merusak *clearance* zona Fresnel pertama. Fenomena perpotongan ruang rambat inilah yang menjadi landasan teoritis mengapa karakteristik redaman sinyal pada USV tidak dapat lagi diprediksi secara akurat menggunakan model ruang bebas (FSPL), melainkan harus divalidasi menggunakan pendekatan model dua jalur (*Two-Ray Ground Reflection*).

2.4 Model Propagasi Gelombang Radio

Model propagasi gelombang radio digunakan sebagai pendekatan matematis deterministik untuk memprediksi nilai redaman daya atau *path loss* di sepanjang saluran transmisi. Dalam teknik telekomunikasi, *path loss* (PL) didefinisikan secara fundamental sebagai selisih logaritmik antara besaran daya yang dipancarkan oleh antenna pemancar (P_t) terhadap daya yang berhasil ditangkap oleh antenna penerima (P_r). Representasi matematis dari definisi umum penyusutan daya tersebut dinyatakan dalam satuan desibel (dB) melalui rumusan pada Persamaan 2.2 berikut [3]:

$$PL(\text{dB}) = P_t(\text{dBm}) - P_r(\text{dBm}) \quad (2.2)$$

Keterangan:

PL	= <i>path loss</i> (dB),
P_t	= pancar pada sisi pemancar (dBm)
P_r	= daya terima pada sisi penerima (dBm).

Melalui Persamaan 2.2, nilai *path loss* empiris hasil pengukuran lapangan dapat dihitung secara langsung. Nilai empiris tersebut selanjutnya dikomparasikan dengan model-model propagasi deterministik teoritis untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian dan keakuratan prediksi model terhadap karakteristik kanal nyata. Pada lingkungan perairan terbuka dengan kondisi *line-of-sight* (LOS) dan konfigurasi tinggi antenna rendah, analisis difokuskan pada dua model perbandingan utama, yaitu *Free Space Path loss* (FSPL) dan model *Two-Ray Ground Reflection*.

2.4.1 Free Space Path Loss (FSPL)

Model *Free Space Path loss* (FSPL) merupakan model propagasi deterministik paling mendasar yang mengasumsikan bahwa gelombang elektromagnetik merambat secara isotropik di dalam ruang bebas ideal. Model ini mengabaikan seluruh faktor redaman lingkungan seperti pantulan, difraksi, ataupun hamburan, sehingga penurunan daya terima murni hanya dipengaruhi oleh jarak pemisahan dan frekuensi operasi perangkat. Hubungan antara daya pancar dan daya terima pada kondisi ruang bebas dapat diturunkan dari persamaan Friis 2.3 sebagai berikut [1], [37]:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.3)$$

Dimana P_t dan P_r merupakan daya pancar dan daya terima dalam satuan Watt, G_t dan G_r adalah penguatan (*gain*) linier dari antenna pemancar dan penerima, λ merepresentasikan panjang gelombang operasi (meter), serta d menyatakan jarak horizontal pemisahan antar-antena (meter). Untuk mempermudah analisis komparatif dalam skala logaritmik desibel (dB), Persamaan 2.3 ditransformasikan menjadi rumusan *path loss* standar ruang bebas sesuai dengan Persamaan 2.4 berikut:

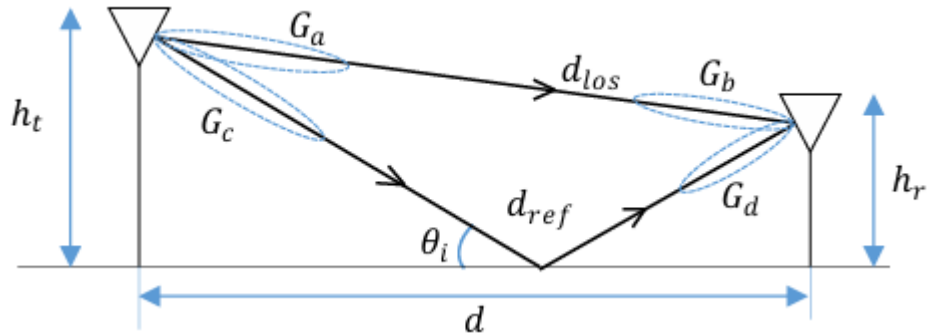
$$PL_{\text{FSPL, dB}} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) - G_{t, \text{dBi}} - G_{r, \text{dBi}} \quad (2.4)$$

Di mana d dinyatakan dalam satuan kilometer (km), f mewakili frekuensi operasi dalam satuan Megahertz (MHz), dan c adalah konstanta kecepatan cahaya ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$). Persamaan 2.4 membuktikan bahwa pada ruang bebas, nilai redaman sinyal akan meningkat secara konstan dan linier seiring bertambahnya jarak dalam skala logaritmik. Meskipun model FSPL banyak digunakan sebagai batas bawah referensi teoritis, karakteristik ideal ini jarang terpenuhi pada komunikasi *surface-to-shore* USV karena ketidakmampuannya dalam mengakomodasi fenomena pantulan kuat dari permukaan air danau [11], [38].

2.4.2 Two Ray Ground Reflection Model

Model *Two ray ground reflection* merupakan salah satu model propagasi gelombang radio yang banyak digunakan untuk merepresentasikan kanal komunikasi pada lingkungan terbuka dengan ketinggian antenna relatif rendah. Model ini secara khusus mempertimbangkan dua jalur propagasi utama antara antenna pemancar dan antenna penerima, yaitu jalur langsung (*direct path*) dan jalur pantulan dari permukaan tanah atau permukaan air (*reflected path*)[39]. Pada lingkungan perairan terbuka, permukaan air yang relatif homogen dan bersifat

reflektif dapat menghasilkan pantulan spekular yang kuat terhadap gelombang radio, sehingga mekanisme propagasi dua jalur ini menjadi dominan.



Gambar 2. 8 *Two Ray Ground Reflection Model* [3].

Ilustrasi mekanisme propagasi pada model *two-ray ground reflection* ditunjukkan pada Gambar 2.12. Pada gambar tersebut, antenna pemancar berada pada ketinggian h_t , sedangkan antenna penerima berada pada ketinggian h_r , dengan jarak horizontal antara keduanya sebesar d . Sinyal yang dipancarkan dari antenna pemancar dapat mencapai antenna penerima melalui dua lintasan utama, yaitu lintasan langsung dengan panjang d_{los} dan lintasan pantulan dari permukaan dengan panjang d_{ref} . Gelombang pantulan tersebut terjadi pada sudut datang θ_i terhadap permukaan reflektif sebelum menuju antenna penerima [3].

Perbedaan panjang lintasan antara jalur langsung dan jalur pantulan menyebabkan adanya perbedaan fase antara kedua gelombang yang diterima. Interaksi antara kedua gelombang tersebut dapat menghasilkan interferensi konstruktif maupun destruktif, tergantung pada hubungan fase yang terjadi. Kondisi ini menyebabkan variasi kekuatan sinyal yang diterima terhadap jarak propagasi, yang merupakan karakteristik utama dari fenomena *multipath* propagation pada sistem komunikasi nirkabel.

Secara geometris, sinyal yang diterima merupakan hasil superposisi dari komponen *Line-of-Sight* (LOS) dan komponen pantulan. Berdasarkan Gambar 2.9, jarak tempuh untuk masing-masing lintasan dapat dihitung menggunakan teorema Pythagoras dimana untuk Jarak lintasan langsung (d_{los}) dan Jarak lintasan pantulan (d_{ref}) diberikan pada persamaan 2.5 dan 2.6 [3]:

$$d_{los} = \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2} \quad (2.5)$$

$$d_{ref} = \sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2} \quad (2.6)$$

Selisih jarak tempuh antara kedua lintasan tersebut akan menghasilkan perbedaan fase (ϕ) pada sinyal yang tiba di antenna penerima. Perbedaan fase ini dirumuskan secara matematis pada persamaan 2.7. Di mana λ merupakan panjang

gelombang dari frekuensi transmisi. Berdasarkan asumsi skala besar (*large-scale assumption*), daya sinyal terima (P_r) dapat diekspresikan sebagai kombinasi dari medan elektrik kedua lintasan tersebut dalam persamaan 2.8 [3]:

$$\phi = \frac{2\pi(d_{ref} - d_{los})}{\lambda} \quad (2.7)$$

$$P_r = P_t \left[\frac{\lambda}{4\pi} \right]^2 \left| \frac{\sqrt{G_{los}}}{d_{los}} + R \frac{\sqrt{G_{ref}} e^{-j\phi}}{d_{ref}} \right|^2 \quad (2.8)$$

Pada pemodelan sistem komunikasi ini, diasumsikan bahwa produk pola medan penguatan antenna searah lintasan langsung ($\sqrt{G_{los}}$) maupun lintasan pantulan ($\sqrt{G_{ref}}$) adalah identik dengan penguatan antenna pemancar (G_t) dan antenna penerima (G_r), sehingga dapat disederhanakan menjadi $\sqrt{G_t G_r}$. Dengan mensubstitusikan persamaan jarak lintasan (d_{los} dan d_{ref}) serta perbedaan fase (ϕ) ke dalam persamaan daya terima di atas, maka diperoleh bentuk perluasan matematis utuh dari daya terima model *two-ray* seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.9 berikut [3]

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{\sqrt{G_t G_r}}{\sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2}} + R \frac{\sqrt{G_t G_r} e^{-j \left(\frac{2\pi(\sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2} - \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2})}{\lambda} \right)}}{\sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2}} \right|^2 \quad (2.9)$$

Di mana P_r merupakan daya yang diterima oleh antenna penerima, P_t adalah daya pancar dari antenna pemancar, G_t dan G_r masing-masing merupakan gain antenna pemancar dan penerima, d adalah jarak horizontal antara kedua antenna, h_t dan h_r adalah ketinggian antenna pemancar dan penerima, λ adalah panjang gelombang, serta R merupakan koefisien refleksi permukaan [3].

Persamaan 2.5 tersebut menunjukkan bahwa daya sinyal yang diterima dipengaruhi oleh interferensi antara komponen gelombang langsung dan gelombang pantulan. Pada lingkungan perairan terbuka, refleksi dari permukaan air dapat menyebabkan pola interferensi yang menghasilkan variasi kekuatan sinyal terhadap perubahan jarak propagasi. Fenomena ini dikenal sebagai *multipath interference*, yang menjadi salah satu karakteristik utama kanal komunikasi pada sistem komunikasi *surface-to-shore* [1].

2.4.4 Jarak Transisi (*Breakpoint Distance*)

Breakpoint distance atau jarak transisi merupakan parameter penting dalam model propagasi *two-ray* yang menunjukkan batas perubahan karakteristik redaman sinyal terhadap jarak propagasi [40]. Parameter ini mendefinisikan titik di mana

pengaruh jalur pantulan mulai menjadi dominan dibandingkan jalur langsung, sehingga pola redaman sinyal berubah dari karakteristik propagasi ruang bebas menjadi karakteristik *two-ray*. Secara matematis, *breakpoint distance* dapat dinyatakan pada persamaan 2.10 yaitu [3]:

$$d_c = \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad (2.10)$$

Di mana d_c adalah *breakpoint distance*, h_t dan h_r masing-masing merupakan ketinggian antenna pemancar dan penerima, serta λ adalah panjang gelombang sinyal radio. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai *breakpoint distance* dipengaruhi oleh konfigurasi ketinggian antenna dan frekuensi operasi sistem komunikasi. Semakin tinggi posisi antenna pemancar dan penerima, maka jarak transisi akan semakin besar. Sebaliknya, pada frekuensi yang lebih tinggi (panjang gelombang lebih pendek), nilai *breakpoint distance* cenderung menjadi lebih kecil.

Dalam penelitian ini, nilai *breakpoint distance* digunakan sebagai acuan untuk memahami kecenderungan karakter propagasi sinyal berdasarkan konfigurasi antenna dan frekuensi operasi sistem komunikasi yang digunakan. Informasi ini membantu dalam menginterpretasikan hasil pengukuran *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) terhadap jarak serta dalam mengevaluasi kesesuaian model propagasi teoritis dengan kondisi kanal komunikasi pada lingkungan perairan terbuka.

2.5 Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Received Signal Strength Indicator (RSSI) merupakan parameter yang menunjukkan tingkat kekuatan sinyal radio yang diterima oleh suatu perangkat penerima [41]. RSSI digunakan secara luas dalam sistem komunikasi nirkabel sebagai indikator kualitas tautan (*link quality*), karena secara langsung merepresentasikan daya sinyal yang diterima setelah mengalami proses propagasi dan redaman lingkungan [42]. Pada sistem WiFi, RSSI umumnya dinyatakan dalam satuan decibel miliwatt (dBm) dan bernilai negatif.

RSSI bukan merupakan besaran fisika fundamental yang diturunkan dari satu persamaan tunggal, melainkan nilai indikator yang dibaca dari penerima pada lapisan fisik (*physical layer*). Oleh karena itu, nilai RSSI dapat dipengaruhi oleh karakteristik perangkat keras, penguatan internal, serta mekanisme *automatic gain control* (AGC) yang diterapkan oleh produsen perangkat [43].

2.5.1 Hubungan RSSI dengan Daya Terima

Secara konseptual, RSSI berkaitan erat dengan daya sinyal terima (P_r) pada sisi penerima. Pada banyak perangkat WiFi komersial, RSSI digunakan sebagai representasi dari daya terima dalam satuan dBm, sehingga hubungan keduanya dapat dinyatakan secara umum pada persamaan 2.11 sebagai berikut [44]:

$$RSSI(dBm) \approx P_r(dBm) \quad (2.11)$$

Meskipun demikian, hubungan ini bersifat aproksimasi karena nilai RSSI tidak selalu terkalibrasi secara absolut. Oleh karena itu, RSSI lebih tepat digunakan sebagai parameter relatif untuk membandingkan kekuatan sinyal terhadap jarak, waktu, atau kondisi lingkungan, dibandingkan sebagai pengukuran daya absolut [43].

2.5.2 Hubungan RSSI dengan *Path Loss*

RSSI memiliki hubungan langsung dengan *path loss* yang telah dibahas pada subbab sebelumnya. Berdasarkan definisi *path loss*, hubungan antara RSSI dan *path loss* dapat dinyatakan pada persamaan 2.12 [45-46]. Pada persamaan 2.12 menunjukkan bahwa penurunan nilai RSSI secara langsung merefleksikan peningkatan *path loss* pada kanal komunikasi. Oleh karena itu, pengukuran RSSI pada berbagai jarak dapat dimanfaatkan untuk mengestimasi karakteristik *path loss* dan parameter kanal lainnya, seperti *Path loss Exponent* [47].

$$PL(dB) = P_t(dBm) - RSSI(dBm) \quad (2.12)$$

Keterangan:

PL	= <i>path loss</i> (dB),
P_t	= daya pancar pemancar (dBm),
$RSSI$	= daya sinyal terima (dBm).

2.6 *Path loss Exponent*

Path loss Exponent merupakan parameter yang digunakan untuk menggambarkan tingkat laju pelemahan sinyal radio terhadap pertambahan jarak propagasi. Parameter ini merepresentasikan karakteristik lingkungan propagasi dan menunjukkan seberapa cepat daya sinyal menurun dibandingkan dengan kondisi ruang bebas [44]. Nilai *Path loss Exponent* sangat bergantung pada kondisi lingkungan, seperti keberadaan refleksi, hamburan (*scattering*), serta konfigurasi geometris antara antena pemancar dan penerima [48-49].

Dalam sistem komunikasi nirkabel, *Path loss Exponent* digunakan sebagai parameter utama dalam model *log-distance path loss*, yang banyak diterapkan pada analisis kanal berbasis pengukuran empiris. Model ini memungkinkan karakterisasi lingkungan propagasi secara kuantitatif menggunakan satu parameter skalar, sehingga sangat sesuai untuk penelitian eksperimental yang melibatkan pengukuran lapangan [48-50].

2.6.1 Model *Log-Distance Path Loss*

Model log-distance path loss menyatakan bahwa *path loss* meningkat secara logaritmik terhadap jarak antara pemancar dan penerima. Model ini dirumuskan

pada persamaan 2.13 [48]. Pada persamaan 2.10 menunjukkan bahwa nilai *Path loss Exponent* menentukan kemiringan (slope) kurva *path loss* terhadap jarak dalam skala logaritmik. Semakin besar nilai n , semakin cepat sinyal mengalami pelemahan seiring bertambahnya jarak.

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.13)$$

keterangan:

$PL(d)$	= <i>path loss</i> pada jarak d (dB)
$PL(d_0)$	= <i>path loss</i> pada jarak referensi d_0 (dB),
n	= <i>Path loss Exponent</i> ,
d	= jarak antara pemancar dan penerima (m),
d_0	= jarak referensi (m), yang umumnya dipilih sebesar 1 m.

2.6.2 Hubungan *Path loss Exponent* dengan RSSI

Berdasarkan definisi *path loss* sebagai selisih antara daya pancar dan daya terima, hubungan antara *Path loss Exponent* dan RSSI dapat diturunkan dari model *log-distance path loss*. Dengan menggunakan definisi *path loss* pada persamaan 2.14 [48]. Kemudian dengan mengasumsikan bahwa daya terima direpresentasikan oleh nilai RSSI, maka model *log-distance path loss* dapat dinyatakan dalam bentuk RSSI pada persamaan 2.15 sebagai berikut [47]:

$$PL(d) = P_t(\text{dBm}) - P_r(\text{dBm}) \quad (2.14)$$

$$RSSI(d) = RSSI(d_0) - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.15)$$

Persamaan 2.12 menunjukkan bahwa nilai RSSI menurun secara linier terhadap $\log_{10}$, dengan kemiringan yang ditentukan oleh *Path loss Exponent* n . Oleh karena itu, parameter n dapat diestimasi secara langsung dari data RSSI hasil pengukuran lapangan.

2.6.3 Penurunan Model *Path loss Exponent* Berbasis RSSI

Model *Path loss Exponent* yang digunakan dalam penelitian ini bersifat empiris dan diturunkan melalui transformasi aljabar dari definisi *path loss* dan model *log-distance path loss*. Penurunan ini bertujuan untuk menunjukkan keterkaitan matematis antara RSSI dan jarak propagasi, tanpa mengasumsikan penurunan dari hukum elektromagnetik dasar. Dimulai dari definisi *path loss* pada persamaan 2.16, kemudian model *log-distance path loss* pada persamaan 2.17. Dengan mensubstitusikan persamaan tersebut, diperoleh pada persamaan 2.18. Sehingga daya terima pada jarak d dapat dinyatakan pada persamaan 2.19.

$$PL(d) = P_t(\text{dBm}) - P_r(\text{dBm}) \quad (2.16)$$

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.17)$$

$$P_t - P_r(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.18)$$

$$P_r(d) = P_t - PL(d_0) - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.19)$$

Karena pada sistem WiFi nilai daya terima direpresentasikan oleh *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), maka hubungan tersebut dapat dituliskan pada persamaan 2.20 sebagai: Persamaan ini menunjukkan bahwa *Path loss Exponent* n dapat diperoleh dari kemiringan hubungan linier antara RSSI dan $\log_{10}(d)$. Dengan demikian, estimasi nilai n dalam penelitian ini dilakukan melalui analisis regresi linier terhadap data RSSI hasil pengukuran lapangan.

$$RSSI(d) = RSSI(d_0) - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.20)$$

2.6.4 Interpretasi Nilai *Path loss Exponent*

Nilai *Path loss Exponent* memberikan informasi penting mengenai karakteristik lingkungan propagasi. Pada kondisi ruang bebas ideal, nilai *Path loss Exponent* mendekati $n = 2$. Pada lingkungan dengan refleksi kuat atau *multipath* dominan, nilai n dapat lebih kecil dari 2 akibat interferensi konstruktif, atau lebih besar dari 2 akibat interferensi destruktif [49-51].

Pada lingkungan perairan terbuka, refleksi kuat dari permukaan air dan konfigurasi ketinggian antenna rendah dapat menyebabkan variasi nilai *Path loss Exponent* yang signifikan terhadap jarak. Oleh karena itu, nilai n yang diperoleh dari pengukuran empiris menjadi parameter penting untuk menggambarkan karakteristik kanal komunikasi *surface-to-shore* secara realistis [11,52].

2.7 Sistem Penentuan Jarak Berbasis GPS

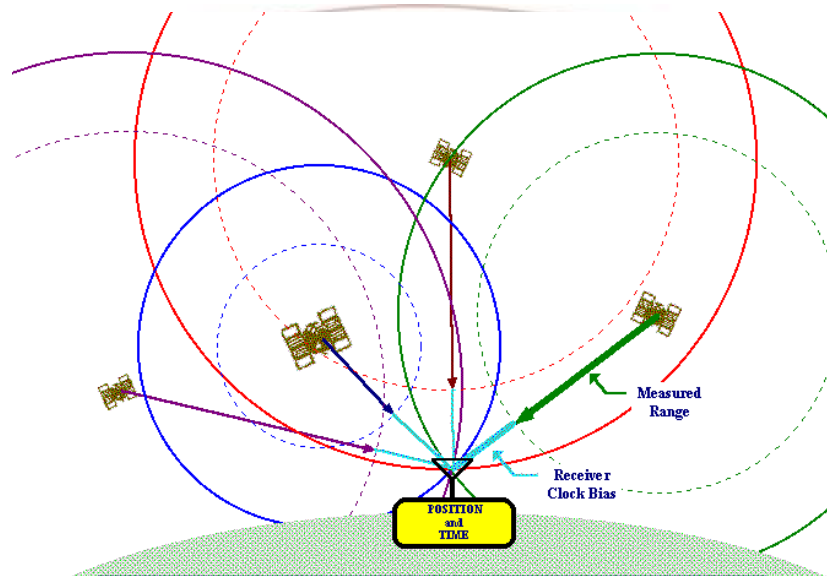
Sistem penentuan jarak berbasis *Global Positioning System* (GPS) digunakan untuk menentukan posisi dan jarak antar objek di permukaan bumi berdasarkan koordinat geografis [53]. GPS merupakan sistem navigasi satelit yang menyediakan informasi posisi dalam bentuk lintang (*latitude*), bujur (*longitude*), dan waktu secara global [54]. Dalam sistem komunikasi bergerak seperti *Unmanned Surface Vehicle* (USV), GPS berperan penting dalam menentukan jarak antara kendaraan dan stasiun darat sebagai parameter utama dalam analisis propagasi sinyal radio [34,36].

Dalam penelitian propagasi gelombang radio berbasis pengukuran lapangan, penentuan jarak yang akurat sangat krusial karena jarak merupakan variabel independen utama dalam model *path loss* dan *Path loss Exponent*. Oleh

karena itu, integrasi sistem GPS dengan sistem komunikasi nirkabel memungkinkan pengukuran jarak dilakukan secara otomatis dan sinkron dengan data RSSI, sehingga meningkatkan akurasi dan konsistensi pengambilan data [11,55].

2.7.1 Sistem Penentuan Posisi Berbasis GPS

GPS bekerja dengan memanfaatkan sinyal radio dari konstelasi satelit yang mengorbit bumi. Penerima GPS menentukan posisinya melalui proses trilateration, yaitu dengan menghitung jarak terhadap minimal empat satelit berdasarkan waktu tempuh sinyal yang terlihat pada gambar 2.14 [54]. Hasil perhitungan posisi umumnya dinyatakan dalam sistem koordinat geografis berupa lintang dan bujur dengan referensi ellipsoid bumi, seperti *World Geodetic System 1984 (WGS-84)* [56].



Gambar 2. 9 Proses Trilateration GPS Berbasis Pseudorange Yang Menunjukkan Kebutuhan Minimal Empat Satelit Untuk Estimasi Posisi dan Sinkronisasi Waktu [56].

Pada aplikasi maritim dan kendaraan tanpa awak, GPS digunakan secara luas karena kemampuannya menyediakan informasi posisi secara *real-time* dengan cakupan global. Meskipun demikian, akurasi GPS dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kesalahan jam satelit, kondisi ionosfer dan troposfer, serta efek *multipath* sinyal, sehingga posisi yang diperoleh memiliki tingkat ketidakpastian tertentu [57].

2.7.2 Representasi Koordinat Geografis

Koordinat geografis dinyatakan dalam pasangan lintang (ϕ) dan bujur (λ), yang masing-masing merepresentasikan sudut posisi terhadap garis khatulistiwa dan meridian utama. Koordinat ini umumnya dinyatakan dalam satuan derajat dan dikonversi ke radian untuk keperluan komputasi matematis [54,58].

Representasi koordinat geografis memungkinkan pemetaan posisi USV dan stasiun darat pada permukaan bumi. Dengan mengetahui koordinat dua titik, jarak

antara kedua titik tersebut dapat dihitung menggunakan model geometris tertentu, baik dengan pendekatan datar (*Euclidean distance*) maupun pendekatan permukaan bumi (*geodesic distance*) [59].

2.7.3 Jarak *Euclidean* dan Keterbatasannya

Jarak *Euclidean* merupakan metode perhitungan jarak paling sederhana yang mengasumsikan dua titik berada pada bidang datar dua dimensi. Metode ini menghitung jarak lurus antara dua titik berdasarkan koordinat Kartesian dan diturunkan dari teorema Pythagoras [60-61]. Secara matematis, jarak *Euclidean* antara dua titik dinyatakan pada persamaan 2.21 sebagai berikut [62]:

$$d_E = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2.21)$$

keterangan:

d_E = jarak *Euclidean*,
 x_1, y_1 = koordinat titik pertama (titik awal)
 x_2, y_2 = koordinat titik kedua (titik tujuan).

Pendekatan ini memberikan estimasi jarak yang akurat pada permukaan datar dan untuk jarak yang sangat pendek. Namun, dalam sistem penentuan jarak berbasis GPS yang menggunakan koordinat geografis pada permukaan bumi, pendekatan *Euclidean* tidak mempertimbangkan kelengkungan bumi. Akibatnya, penggunaan metode ini dapat menghasilkan kesalahan perhitungan jarak yang meningkat seiring bertambahnya jarak antara dua titik [59,63].

2.8 Teorema *Haversine*

Teorema *Haversine* merupakan metode komputasi jarak geodesik yang digunakan untuk menghitung jarak terpendek antara dua titik di permukaan bumi berdasarkan koordinat lintang (*latitude*) dan bujur (*longitude*) [53]. Metode ini banyak digunakan dalam sistem navigasi dan analisis berbasis GPS karena mampu memberikan estimasi jarak yang lebih akurat dibandingkan pendekatan datar ketika koordinat dinyatakan dalam sistem geografis [61].

Dalam penelitian propagasi gelombang radio berbasis pengukuran lapangan, jarak antara pemancar dan penerima merupakan parameter utama dalam analisis *path loss* dan *Path loss Exponent*. Oleh karena itu, metode perhitungan jarak yang mempertimbangkan kelengkungan bumi, seperti teorema *Haversine*, menjadi penting untuk memastikan validitas hasil analisis [11,64,65].

2.8.1 Asumsi Bumi sebagai Bola

Teorema *Haversine* mengasumsikan bumi berbentuk bola sempurna dengan jari-jari rata-rata $R \approx 6371 \text{ km}$. Meskipun secara geodetik bumi lebih tepat

dimodelkan sebagai ellipsoid, asumsi bola memberikan tingkat akurasi yang memadai untuk perhitungan jarak pada skala lokal hingga menengah [66]

Pada jarak ratusan meter hingga beberapa kilometer, perbedaan hasil antara model bola dan model ellipsoid relatif kecil dan sering kali berada di bawah tingkat kesalahan pengukuran GPS itu sendiri, seperti kesalahan posisi dan efek *multipath*. Oleh karena itu, asumsi bumi sebagai bola dianggap cukup representatif dalam konteks penelitian ini [59,67].

2.8.2 Persamaan Teorema *Haversine*

Jarak geodesik antara dua titik di permukaan bumi berdasarkan teorema *Haversine* dinyatakan pada persamaan 2.22 sebagai berikut [60,68]:

$$d = 2R \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{2} \right)} \right) \quad (2.22)$$

Keterangan:

d	= jarak geodesik antara dua titik (m),
R	= jari-jari bumi (m),
ϕ_1, ϕ_2	= lintang titik pertama dan kedua (radian),
λ_1, λ_2	= bujur titik pertama dan kedua (radian)
$\Delta\phi$	= $\phi_2 - \phi_1$,
$\Delta\lambda$	= $\lambda_2 - \lambda_1$.

Persamaan ini menghitung jarak berdasarkan sudut pusat antara dua titik pada permukaan bola, sehingga memberikan estimasi jarak yang lebih akurat dibandingkan pendekatan *Euclidean* ketika menggunakan koordinat geografis.

2.8.3 Dasar Geometris dan Penurunan Singkat Teorema *Haversine*

Teorema *Haversine* diturunkan dari geometri bola yang memodelkan permukaan bumi sebagai bola dengan jari-jari R . Jarak geodesik antara dua titik dapat dinyatakan sebagai hasil perkalian jari-jari bumi dengan sudut pusat θ , yaitu pada persamaan 2.23. Sudut pusat θ antara dua titik dengan koordinat geografis (ϕ_1, λ_1) dan (ϕ_2, λ_2) dapat dinyatakan menggunakan hukum cosinus bola pada persamaan 2.24 sebagai berikut [66,69]:

$$d = R\theta \quad (2.23)$$

$$\cos \theta = \sin \phi_1 \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos(\Delta\lambda) \quad (2.24)$$

Untuk meningkatkan stabilitas numerik pada jarak pendek hingga menengah, persamaan tersebut ditransformasikan menggunakan fungsi *Haversine*, yang didefinisikan pada persamaan 2.25 sebagai. Dengan menerapkan identitas trigonometri dan melakukan substitusi terhadap hukum cosinus bola, diperoleh

hubungan *Haversine* pada persamaan 2.26. Selanjutnya, sudut pusat θ dihitung pada persamaan 2.27 [61].

$$hav(\theta) = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.25)$$

Dengan mensubstitusikan sudut pusat tersebut ke dalam persamaan 2.23, diperoleh bentuk akhir persamaan teorema *Haversine* seperti yang digunakan pada Subbab 2.8.2 yaitu persamaan 2.22. Penurunan singkat ini menunjukkan bahwa persamaan *Haversine* merupakan transformasi geometris dari hukum cosinus bola yang dirancang untuk meningkatkan stabilitas numerik dan akurasi perhitungan jarak.

2.9 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai karakteristik propagasi gelombang radio telah berkembang pesat seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem komunikasi nirkabel yang andal pada berbagai kondisi lingkungan. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menganalisis karakteristik *path loss*, menentukan nilai *Path loss Exponent* (PLE), serta mengevaluasi performa berbagai model propagasi melalui pendekatan pengukuran lapangan maupun pengembangan model secara analitis. Pada lingkungan perairan, fenomena refleksi permukaan air, *multipath*, serta kondisi atmosfer menyebabkan karakteristik propagasi berbeda dibandingkan lingkungan terestrial sehingga diperlukan model propagasi yang sesuai dengan kondisi sebenarnya. Oleh karena itu, penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan propagasi pada lingkungan perairan, model *Two-Ray Ground Reflection*, ekstraksi *Path loss Exponent*, serta evaluasi model propagasi menjadi landasan penting dalam penyusunan penelitian ini. Ringkasan beberapa penelitian terdahulu yang relevan disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu

No	Peneliti	Fokus Penelitian	Hasil Utama	Keterbatasan
1	Yamamoto dkk (2021).	Pengukuran RSSI komunikasi WLAN 2,4 GHz dan 5 GHz untuk robot maritim	Menunjukkan adanya fluktuasi RSSI akibat <i>multipath</i> pada lingkungan pesisir	Belum mengevaluasi <i>Exact Two-Ray</i> dan tidak melakukan ekstraksi PLE Menggunakan kapal besar
2	Lee dkk. (2017)	Analisis kanal komunikasi <i>Land-to-Ship</i> 2,4 GHz	Menunjukkan karakteristik propagasi komunikasi darat–kapal	sehingga karakteristik berbeda dengan USV

No	Peneliti	Fokus Penelitian	Hasil Utama	Keterbatasan
3	Udofia (2022)	Ekstraksi <i>Path loss Exponent</i> berbasis RSSI	Menentukan PLE dari data pengukuran lapangan	Tidak dilakukan pada lingkungan perairan
4	De Piante dkk. (2024)	<i>Path loss</i> komunikasi kapal–buoy	Menghasilkan nilai PLE pada lingkungan laut	Menggunakan sub-GHz dan bukan WiFi 2,4 GHz
5	Eyuboglu dkk. (2024)	<i>Shore-to-Ship Path Loss</i>	Modified REL memberikan akurasi terbaik	Menggunakan 5,6 GHz dan tidak mengevaluasi <i>Exact Two-Ray</i>
6	Yu dkk. (2024)	<i>Improved Two-Ray Model</i>	Memperhitungkan konduktivitas dan kekasaran permukaan laut	Belum menggunakan <i>Exact Two-Ray</i>
7	Triwibowo dkk. (2019)	Komunikasi microwave pada lingkungan danau	Menunjukkan pengaruh refleksi permukaan air	Bukan WiFi dan tidak menghitung PLE
8	Staudinger dkk. (2023)	<i>Two-Ray Ground Reflection dan Breakpoint Distance</i>	Menjelaskan konsep <i>breakpoint distance</i>	Tidak divalidasi menggunakan data lapangan
9	Wang dkk. (2023)	Review model propagasi radio	Membandingkan model deterministik, empiris, dan semi-empiris	Tidak melakukan pengukuran empiris
10	Elmutasim dkk. (2025)	<i>Dual-Slope</i> dengan <i>Multi-Breakpoint</i>	Menjelaskan perubahan eksponen sebelum dan sesudah <i>breakpoint</i>	Belum diuji pada lingkungan perairan
11	Imam Fulani dkk. (2025)	Perbandingan berbagai model <i>path loss</i>	Model CI memberikan RMSE terbaik	Lingkungan urban dan mmWave

Berdasarkan Tabel 2.1 pada penelitian 1 sampai 3 menunjukkan bahwa komunikasi WiFi 2,4 GHz telah banyak digunakan sebagai media komunikasi nirkabel, baik pada sistem robot maritim maupun jaringan komunikasi berbasis RSSI. Penelitian Yamamoto dkk. dan Lee dkk. membuktikan bahwa pita frekuensi 2,4 GHz mampu digunakan pada komunikasi maritim, namun keduanya lebih berfokus pada karakterisasi kanal komunikasi dan kualitas sinyal tanpa mengevaluasi model *Exact Two-Ray Ground Reflection* secara khusus [11-12]. Sementara itu, penelitian Udofia mengenai ekstraksi *Path loss Exponent* berbasis

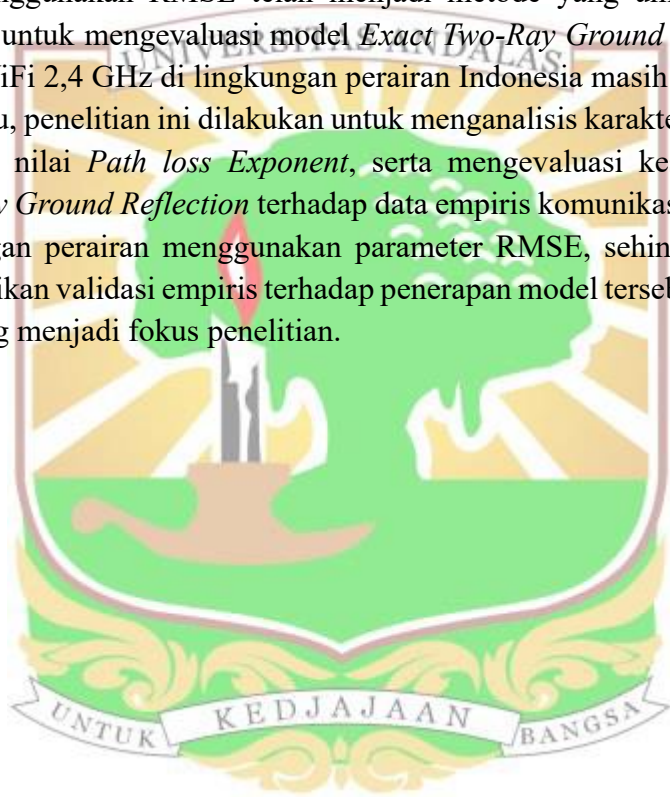
RSSI menunjukkan bahwa metode regresi terhadap data pengukuran lapangan merupakan pendekatan yang umum digunakan untuk memperoleh karakteristik propagasi suatu lingkungan [13]. Hasil penelitian-penelitian tersebut menjadi landasan bahwa penggunaan WiFi 2,4 GHz serta RSSI sebagai parameter analisis telah banyak diterapkan, namun implementasinya pada lingkungan perairan dengan evaluasi model propagasi tertentu masih memerlukan kajian lebih lanjut.

Kemudian pada penelitian ke-4 sampai ke-7 berfokus pada karakteristik propagasi di lingkungan perairan. De Piantedokkel melakukan pengukuran *path loss* pada komunikasi kapal–buoy menggunakan pita sub-GHz dan menunjukkan bahwa nilai *Path loss Exponent* di lingkungan laut berbeda dibandingkan ruang bebas [6]. Eyuboglu dkk. mengevaluasi beberapa model propagasi pada komunikasi *shore-to-ship* menggunakan parameter RMSE dan R^2 , sedangkan Yu dkk. mengembangkan *Improved Two-Ray Model* dengan mempertimbangkan pengaruh konduktivitas serta kekasaran permukaan laut [9-10]. Di tingkat nasional, penelitian Triwibowo dkk. menunjukkan bahwa refleksi permukaan air dan fenomena *multipath* berpengaruh terhadap performa komunikasi gelombang mikro di lingkungan danau [8]. Secara keseluruhan, penelitian-penelitian tersebut menegaskan bahwa karakteristik propagasi di atas permukaan air berbeda dengan lingkungan terestrial sehingga memerlukan model propagasi yang mampu merepresentasikan mekanisme propagasi secara lebih akurat.

Selanjutnya, pada penelitian ke-8 sampai ke-10 berfokus pada pengembangan model propagasi sebagai dasar analisis karakteristik kanal radio. Staudinger dkk. mengkaji model *Two-Ray Ground Reflection* beserta konsep *breakpoint distance* yang menjadi batas perubahan karakteristik propagasi [4]. Elmutasim dkk. mengembangkan model *Dual-Slope Path loss* dengan eksponen adaptif berbasis *multi-breakpoint*, sedangkan penelitian wang dkk. merangkum perkembangan berbagai model propagasi, mulai dari model deterministik, empiris, hingga semi-empiris [70-71]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa model *Two-Ray Ground Reflection* memiliki landasan teoritis yang kuat untuk menganalisis propagasi pada lintasan yang didominasi oleh komponen *Line-of-Sight* (LOS) dan gelombang pantul dari permukaan, sehingga menjadi salah satu model yang relevan untuk diterapkan pada lingkungan perairan.

Selain pengembangan model propagasi, pada penelitian ke-11 juga menekankan pentingnya evaluasi model terhadap data empiris. Penelitian Imam Fulani dkk. menunjukkan bahwa parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) merupakan salah satu indikator yang efektif dalam membandingkan tingkat kesesuaian berbagai model propagasi terhadap hasil pengukuran lapangan. Pendekatan evaluasi tersebut banyak digunakan untuk menentukan model yang memiliki kemampuan prediksi terbaik sehingga menjadi acuan dalam penelitian ini untuk mengevaluasi kesesuaian model *Exact Two-Ray Ground Reflection* terhadap data empiris hasil pengukuran WiFi 2,4 GHz [72].

Berdasarkan keseluruhan penelitian terdahulu tersebut, dapat diidentifikasi beberapa *research gap*. Pertama, penelitian mengenai propagasi pada lingkungan perairan sebagian besar masih dilakukan pada frekuensi sub-GHz, 3,2 GHz, maupun 5,6 GHz, sedangkan kajian menggunakan WiFi 2,4 GHz pada lingkungan perairan masih relatif terbatas. Kedua, sebagian besar penelitian menggunakan model *Log-Distance Path Loss*, *Modified Round Earth Loss (REL)*, *Dual-Slope*, atau *Improved Two-Ray*, sementara validasi empiris terhadap model *Exact Two-Ray Ground Reflection* masih jarang dilakukan. Ketiga, penelitian mengenai ekstraksi *Path loss Exponent* umumnya dilakukan pada lingkungan *indoor*, urban, maupun industri sehingga karakteristik PLE pada komunikasi WiFi 2,4 GHz di atas permukaan air masih belum banyak dilaporkan. Keempat, meskipun evaluasi model propagasi menggunakan RMSE telah menjadi metode yang umum digunakan, penerapannya untuk mengevaluasi model *Exact Two-Ray Ground Reflection* pada komunikasi WiFi 2,4 GHz di lingkungan perairan Indonesia masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis karakteristik *path loss*, mengekstraksi nilai *Path loss Exponent*, serta mengevaluasi kesesuaian model *Exact Two-Ray Ground Reflection* terhadap data empiris komunikasi WiFi 2,4 GHz pada lingkungan perairan menggunakan parameter RMSE, sehingga diharapkan dapat memberikan validasi empiris terhadap penerapan model tersebut pada kondisi propagasi yang menjadi fokus penelitian.



BAB 3 METODOLOGI

3.1 Alir Penelitian

Diagram alir penelitian pada Gambar 3.1 menggambarkan tahapan metodologi penelitian yang digunakan untuk menganalisis karakteristik kanal komunikasi WiFi 2,4 GHz pada *Unmanned Surface Vehicle* (USV). Diagram alir ini disusun secara berurutan untuk menunjukkan alur penelitian dari tahap perencanaan hingga penarikan kesimpulan, serta untuk memastikan bahwa proses pengambilan dan analisis data dilakukan secara sistematis dan terkontrol.

Penelitian diawali dengan tahap studi literatur, yang bertujuan untuk menentukan pendekatan pengukuran dan model propagasi yang digunakan dalam penelitian. Studi literatur mencakup kajian mengenai propagasi gelombang radio, komunikasi nirkabel pada USV, parameter RSSI, *path loss*, *Path loss Exponent*, serta model propagasi yang relevan untuk lingkungan perairan terbuka. Hasil studi literatur ini menjadi dasar dalam penyusunan metodologi penelitian.

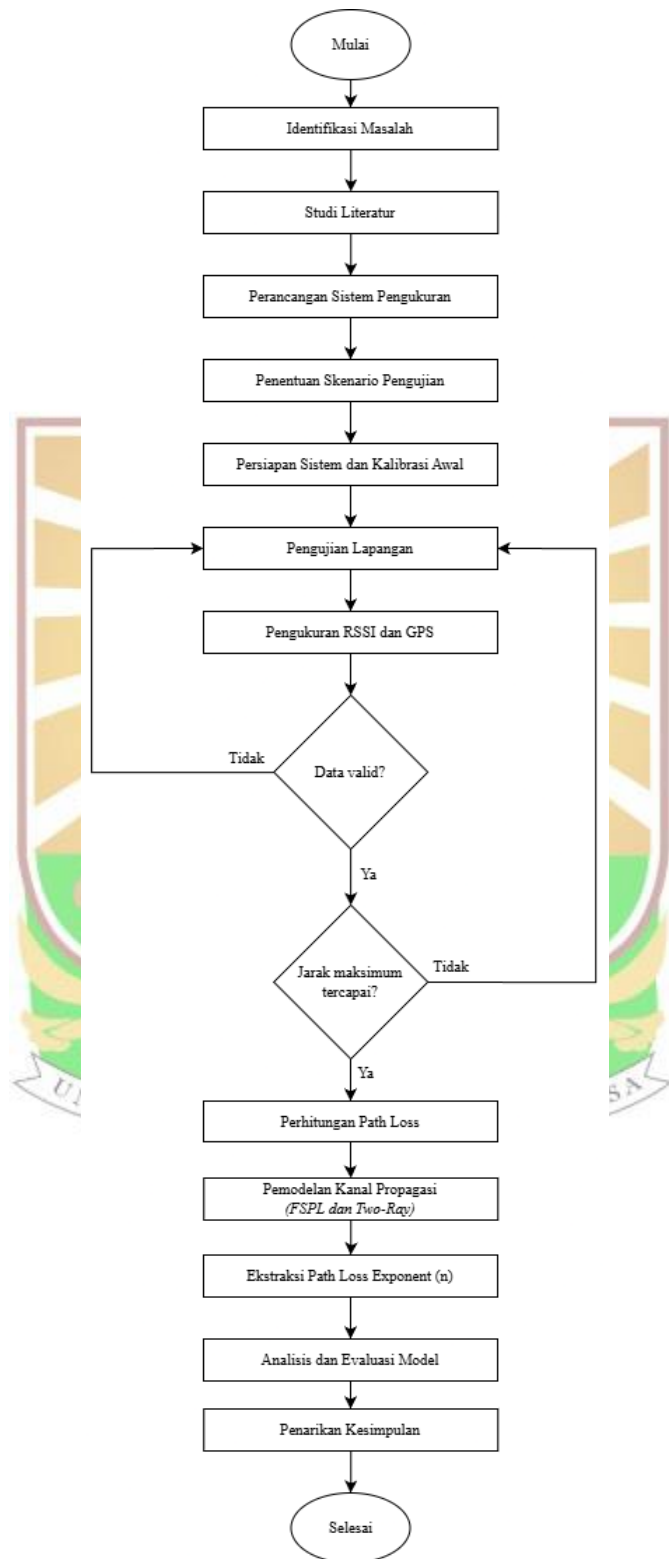
Tahap berikutnya adalah perancangan sistem pengukuran, di mana sistem komunikasi dan akuisisi data dirancang sebagai instrumen ukur kanal komunikasi. Selanjutnya dilakukan penentuan skenario pengujian, yang meliputi pemilihan lintasan pengukuran dan kondisi operasional agar mendukung komunikasi *line-of-sight* (LOS). Setelah itu, sistem melalui tahap persiapan dan kalibrasi awal untuk memastikan seluruh perangkat berfungsi dengan baik sebelum pengujian lapangan dilakukan.

Tahap pengujian lapangan dilakukan dengan mengoperasikan USV di lingkungan perairan terbuka sesuai skenario yang telah ditentukan. Pada tahap ini dilakukan pengukuran RSSI dan GPS secara otomatis untuk memperoleh data kekuatan sinyal dan posisi geografis USV. Data hasil pengukuran kemudian diperiksa validitasnya. Data dinyatakan valid apabila modul GPS telah mencapai status 3D Fix dengan jumlah satelit minimal 6, dan aliran data RSSI tidak mengalami jeda (drop) lebih dari 1 detik. Apabila data dinyatakan tidak valid, maka pengujian lapangan diulangi. Jika data valid, pengujian dilanjutkan hingga jarak maksimum pengukuran tercapai.

Setelah proses pengujian selesai, penelitian dilanjutkan ke tahap analisis data, yang meliputi perhitungan *path loss*, pemodelan kanal propagasi menggunakan model *Free Space Path loss* (FSPL) dan *Two-ray ground reflection*, serta ekstraksi nilai *Path loss Exponent* (n). Tahap selanjutnya adalah analisis dan evaluasi model untuk menilai kesesuaian antara hasil pengukuran lapangan dan model propagasi teoritis.

Tahapan penelitian diakhiri dengan penarikan kesimpulan, yang merangkum hasil analisis dan menjawab tujuan penelitian. Dengan demikian, diagram alir penelitian ini menunjukkan bahwa metodologi yang digunakan bersifat

sekuensial dengan satu pengulangan utama pada tahap pengujian lapangan, guna memastikan validitas data dan kelengkapan hasil pengukuran.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

3.2 Perancangan Sistem dan Instrumen Pengujian

Penelitian ini menggunakan sistem telemetri berbasis *Unmanned Surface Vehicle* (USV) yang dikembangkan untuk berfungsi sebagai instrumen akuisisi data propagasi secara otomatis. Sistem dirancang untuk mencatat parameter kekuatan sinyal *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) dan posisi geografis (GNSS) secara sinkron. Perancangan sistem dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu arsitektur perangkat keras dan topologi komunikasi data.

3.2.1 Arsitektur Perangkat Keras

Arsitektur perangkat keras dalam penelitian ini dirancang untuk memfasilitasi komunikasi data, navigasi, dan akuisisi data propagasi sinyal secara otomatis. Sistem keras ini dibagi menjadi dua subsistem utama, yaitu stasiun darat (*Ground Control Station*) dan unit wahana bergerak (*Mobile Node/USV*).

3.2.1.1 Stasiun Darat (*Ground Control Station*)

Stasiun darat berfungsi sebagai titik pusat pemantauan, pusat kendali cadangan, dan pemancar (*transmitter*) sinyal radio utama yang menjadi objek penelitian. Perangkat keras penyusun stasiun darat meliputi:

1. Router *Gateway* (TP-Link MR100): Berfungsi sebagai gerbang utama koneksi internet 4G LTE dan server DHCP lokal untuk memfasilitasi manajemen alamat IP antara perangkat *Ground Station* dan USV.



Gambar 3. 2 Router Tp-Link Mr100

2. Outdoor Wireless Access Point (TP-Link CPE210): Berperan sebagai pemancar utama (Tx) sinyal WiFi pada frekuensi 2,4 GHz. Perangkat ini didesain khusus untuk penggunaan luar ruangan (*outdoor*) dan dilengkapi dengan antena *directional* berdesain MIMO 2x2. Sinyal dari perangkat ini merupakan objek utama yang akan diukur nilai pelemahannya (*path loss*).



Gambar 3. 3 TP-Link CPE210

3. Laptop Operator (Lenovo IdeaPad 330): Menggunakan prosesor AMD A4 dengan sistem operasi Windows 10. Perangkat ini digunakan untuk menjalankan antarmuka web *Ground Control Station* (GCS) guna memantau telemetri USV, peta pergerakan, dan mengeksekusi proses *logging* data ke format CSV.



Gambar 3. 4 Laptop Operator Lenovo Ideapad 330

4. Remote Control Transmitter (RadioMaster Boxer JP4IN1): Digunakan sebagai sistem kendali utama (*primary control*) wahana USV pada pita frekuensi 2,4 GHz dengan modul *multi-protocol*. Perangkat ini dioperasikan secara manual oleh operator di darat untuk mengarahkan pergerakan kapal lurus menjauhi stasiun darat selama proses pengukuran berlangsung, serta untuk memanggil USV kembali ke titik awal.



Gambar 3. 5 Remote Control Radiomaster Boxer JP4IN1

3.2.1.2 Unit Wahana Bergerak (*Mobile Node - USV*)

Unit ini merupakan perangkat nirawak yang bertugas menyusuri perairan sambil mengumpulkan data kekuatan sinyal (RSSI) dan koordinat spasial secara sinkron. Komponen penyusun unit USV meliputi:

1. Platform Fisik (Lambung Kapal): Menggunakan desain lambung ganda (*Catamaran*) yang memberikan stabilitas hidrodinamika tinggi di atas air, sehingga meminimalisir guncangan ekstrem pada antenna (menjaga kestabilan h_r). Wahana ini memiliki dimensi panjang 1.000 mm dan lebar 390 mm dengan bobot operasional/volume *displacement* sekitar 14,55 kg. Lambung kapal dikonstruksi menggunakan komposit triplek, kayu balsa, dan pelapis *fiberglass* yang diperkuat dengan resin untuk memastikan keandalan *waterproofing*.



Gambar 3. 6 Wahana Kapal USV

2. Single Board Computer (NVIDIA Jetson Super Orin Nano): Bertindak sebagai unit pemroses utama (*otak* dari wahana) yang menjalankan *middleware* ROS 2. Perangkat ini bertugas mengakuisisi data jaringan, memproses data GPS, dan menggabungkannya menjadi *array* data yang tersinkronisasi sebelum dikirim ke darat atau disimpan secara lokal.



Gambar 3. 7 *Single Board Computer (Nvidia Jetson Super Orin Nano)*

3. Wireless Bridge / Receiver (MikroTik Groove A-52HPn): Berfungsi sebagai penerima (Rx) untuk menangkap sinyal transmisi dari TP-Link CPE210. Perangkat ini dilengkapi dengan antenna *Omni-directional* bawaan yang memiliki penguatan sebesar 6 dBi. Penggunaan antenna *omni-directional* bertujuan agar USV dapat menerima sinyal secara optimal dari berbagai arah orientasi pergerakan kapal.



Gambar 3. 8 MikroTik Groove A-52HPn

4. Modul Penentuan Posisi (RadioLink SE100 GPS): Berbasis teknologi *Pixhawk-compatible*, modul ini digunakan untuk mendapatkan koordinat lintang dan bujur secara *real-time*. Modul ini memiliki tingkat sensitivitas yang sangat tinggi (hingga -167 dBm) dan laju pembaruan data (*update rate*) mencapai 10 Hz (10 pembaruan per detik). Spesifikasi ini menjamin resolusi spasial yang sangat rapat untuk perhitungan jarak propagasi menggunakan algoritma *Haversine*.



Gambar 3. 9 *RadioLink SE100 GPS*

5. Receiver Teleoperasi (FlySky FS-R7P): Modul penerima 7-kanal yang terhubung secara langsung ke Pixhawk untuk mengeksekusi perintah kendali manual dari RadioMaster Boxer di darat menuju sistem penggerak motor (ESC).



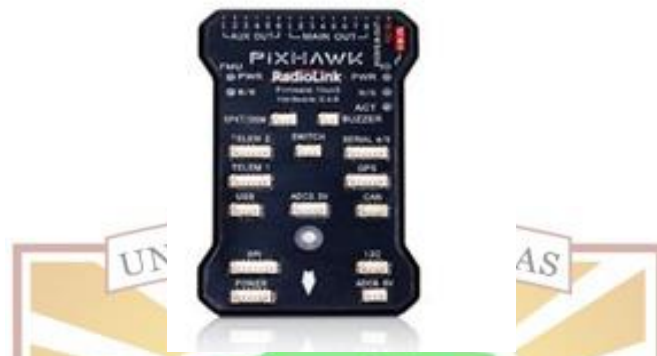
Gambar 3. 10 *Receiver Teleoperasi (FlySky FS-R7P)*

6. Sistem Catu Daya (*Power Supply*): Menggunakan baterai *Lithium Polymer* (LiPo) berkapasitas sangat besar, yaitu 22.000 mAh dengan *discharge rate* 25C. Arus listrik didistribusikan ke komponen elektronik (seperti Jetson Nano dan MikroTik) melalui modul regulator penurun tegangan (*Step-down/Buck Converter*) XL4016 9A untuk memastikan pasokan tegangan tetap stabil (misal 5V atau 12V) meskipun kapasitas baterai utama mulai menurun.



Gambar 3. 11 *Sistem Catu Daya (Power Supply)*

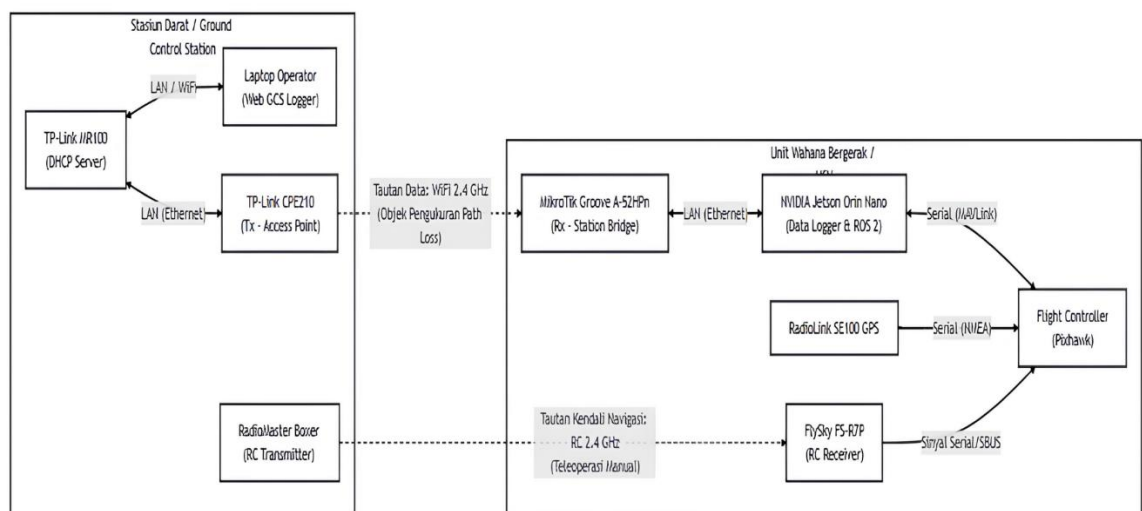
7. Flight Controller (Pixhawk): Berfungsi sebagai otak navigasi tingkat rendah (*low-level control*) pada USV. Perangkat ini bertugas mengolah sinyal mentah dari modul GPS RadioLink SE100 dan perintah kendali manual dari *Receiver* RC FlySky. Data telemetri yang telah diproses oleh Pixhawk kemudian diteruskan ke Jetson Nano melalui komunikasi serial (*Telemetry/USB*) untuk kebutuhan *logging* dan pemrosesan tingkat tinggi.



Gambar 3. 12 Flight Controller (Pixhawk)

3.2.2 Topologi Jaringan dan Komunikasi Data

Arsitektur komunikasi data pada penelitian ini dirancang menggunakan topologi *Point-to-Point* (P2P) berbasis *Local Area Network* (LAN) nirkabel yang independen. Pendekatan jaringan lokal tertutup ini dipilih untuk mengisolasi parameter propagasi gelombang radio yang sedang diteliti, sehingga nilai pelemahan sinyal (*path loss*) yang terekam murni berasal dari karakteristik fisik medium perairan tanpa adanya campur tangan latensi atau gangguan dari *routing* internet publik. Diagram blok topologi jaringan dan komunikasi data antara stasiun darat dan USV diilustrasikan pada gambar 3.13



Gambar 3. 13 Diagram Blok Topologi Jaringan dan Komunikasi Data

Mekanisme komunikasi data dalam sistem ini dibagi menjadi tiga alur fungsional utama, yaitu:

1. Tautan Propagasi Utama (*Main Radio Link*): Perangkat TP-Link CPE210 pada stasiun darat bertindak sebagai *Access Point* (Tx) yang memancarkan sinyal WiFi pada pita frekuensi 2,4 GHz secara *directional* ke arah area pengujian. Di sisi wahana, MikroTik Groove A-52HPn dikonfigurasi sebagai *Station Bridge* (Rx) untuk menangkap sinyal tersebut. Tautan ini merupakan objek utama penelitian, di mana parameter kekuatan sinyal (*RSSI*) yang diterima oleh MikroTik akan dicatat sebagai representasi dari kualitas kanal komunikasi di atas permukaan air.
2. Manajemen Jaringan dan Pengalamatan IP: TP-Link MR100 berfungsi sebagai pusat manajemen jaringan yang menyediakan layanan DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*). Perangkat ini memastikan seluruh instrumen, baik laptop operator maupun komputer robot (Jetson), berada dalam satu segmen jaringan lokal yang sama, sehingga memudahkan proses sinkronisasi dan transfer data melalui antarmuka *Ethernet*.
3. Akuisisi Data Otomatis dan Teleoperasi Manual:
 - a) Perekaman Data: Data koordinat GPS dan nilai RSSI dikelola sepenuhnya oleh NVIDIA Jetson Orin Nano secara pasif menggunakan skrip otomatis berbasis ROS 2. Data yang telah disinkronkan disimpan secara langsung ke dalam media penyimpanan internal Jetson dalam format .CSV untuk menjamin keamanan data saat terjadi pemutusan tautan (*link loss*).
 - b) Teleoperasi Kendaraan: Berbeda dengan sistem akuisisi data yang berjalan otomatis, pergerakan navigasi USV dikendalikan secara manual oleh operator menggunakan tautan radio independen dari RadioMaster Boxer ke *receiver* FlySky. Pemisahan antara tautan kendali (*Radio Control*) dan tautan telemetri (WiFi) ini menjamin bahwa USV tetap dapat bermanuver dan kembali ke titik peluncuran meskipun sinyal WiFi yang sedang diukur telah putus secara total.

3.3 Pengembangan Perangkat Lunak Akuisisi Data

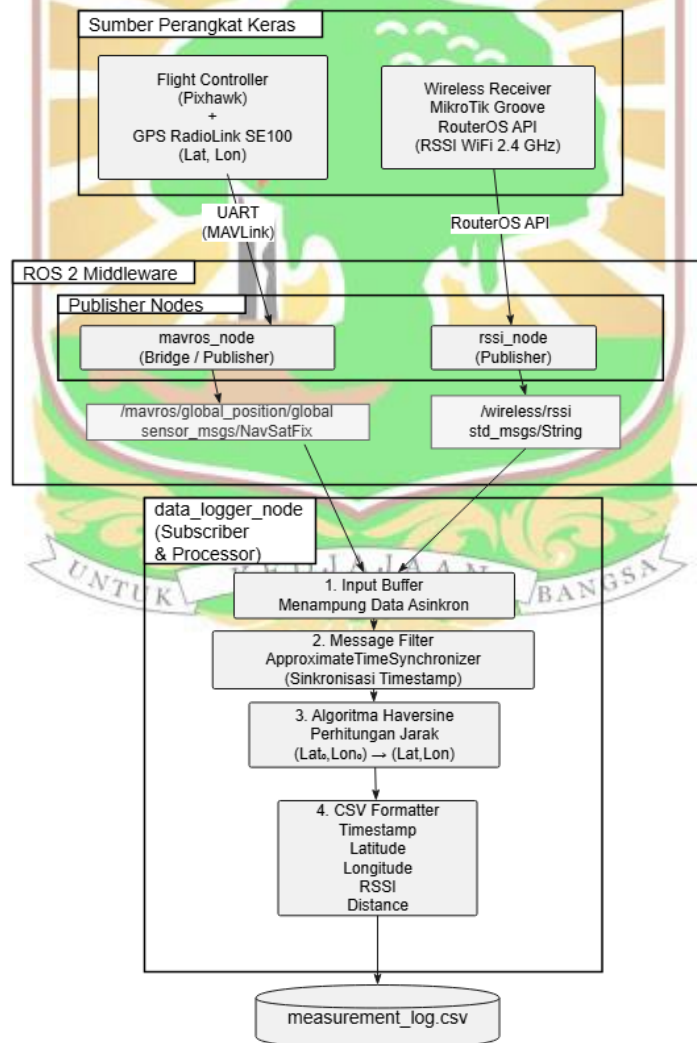
Keandalan analisis propagasi gelombang radio sangat bergantung pada tingkat presisi dan sinkronisasi data lapangan yang dikumpulkan. Berbagai penelitian terdahulu yang melakukan pengukuran di lingkungan maritim menemui kendala metodologis di mana perekaman data posisi geografis (GPS) dan data kekuatan sinyal (RSSI) dilakukan melalui program yang terpisah. Hal tersebut menyebabkan kedua data tersebut tidak tersinkronisasi secara waktu (*time synchronized*), sehingga memerlukan proses interpolasi manual pada pasca-pemrosesan yang berpotensi mengurangi resolusi dan akurasi spasial data.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengembangkan perangkat lunak akuisisi data otomatis berbasis *Robot Operating System 2* (ROS 2) yang berjalan di atas *Single Board Computer* NVIDIA Jetson Orin Nano. Penting untuk digarisbawahi bahwa perangkat lunak yang dikembangkan pada subsistem

ini murni berfungsi sebagai instrumen pencatat data otomatis (*automatic data logger*), sedangkan navigasi pergerakan USV tetap dikendalikan secara manual (teleoperasi) oleh operator di darat guna memastikan lintasan kapal tetap sesuai dengan skenario pengukuran.

3.3.1 Arsitektur Perangkat Lunak (ROS 2)

Sistem perangkat lunak akuisisi data ini dibangun menggunakan pendekatan arsitektur Modular Multi-Node di dalam lingkungan ROS 2 versi *Humble* (sistem operasi Ubuntu 22.04). Arsitektur ini memisahkan setiap fungsi penanganan sensor ke dalam node yang berbeda untuk memungkinkan pemrosesan data secara asinkron (*non-blocking*). Melalui pendekatan ini, proses pembacaan data navigasi dari *Flight Controller* yang memiliki laju pembaruan cepat (10 Hz) tidak akan terhambat oleh proses pembacaan antarmuka jaringan MikroTik yang relatif lebih lambat (2 - 5 Hz). Struktur hierarki dan aliran komunikasi data antar *node* secara mendalam diilustrasikan pada Gambar 3.14.



Gambar 3. 14 arsitektur aliran komunikasi data antar *node*

Berdasarkan diagram arsitektur tersebut, pemrosesan data dibagi menjadi tiga entitas *node* utama yang dieksekusi secara paralel menggunakan bahasa pemrograman Python:

1. *Node* Pembaca Telemetri Navigasi (*mavros_node*): *Node* ini berfungsi sebagai jembatan (*gateway*) antara protokol MAVLink dari Pixhawk dan ekosistem ROS 2. Data navigasi dari GPS RadioLink SE100 diproses terlebih dahulu oleh Pixhawk, kemudian dikirimkan ke Jetson Nano dalam bentuk paket MAVLink melalui komunikasi serial berkecepatan tinggi (921600 bps). *Node* ini mengekstraksi paket *GLOBAL_POSITION_INT* dan mempublikasikannya ke topik `/mavros/global_position/global` dengan tipe pesan `sensor_msgs/NavSatFix`.
2. *Node* Pembaca Kekuatan Sinyal (*rss_node*): *Node* ini mengelola akuisisi data kekuatan sinyal terima dari MikroTik Groove secara aktif menggunakan protokol *RouterOS API* melalui koneksi TCP pada *port* 8728. Penggunaan API memastikan pengambilan data RSSI lebih ringan dan memiliki latensi rendah dibandingkan metode *scraping*. Nilai yang diperoleh kemudian dipublikasikan ke topik `/usv/network/rssi` menggunakan tipe pesan `std_msgs/Int32`.
3. *Node* Pengolah dan Perekam Data (*data_logger_node*): *Node* ini merupakan inti dari sistem yang melakukan sinkronisasi data asinkron. Karena data navigasi (10 Hz) dan data RSSI (2-5 Hz) datang dengan frekuensi yang berbeda, *node* ini memanfaatkan pustaka `message_filters` dengan algoritma *ApproximateTimeSynchronizer*. Algoritma ini mencocokkan paket GPS dan RSSI yang memiliki stempel waktu (*timestamp*) paling berdekatan. Setelah tersinkronisasi, sistem menghitung jarak menggunakan algoritma *Haversine* dan menyimpan hasilnya ke dalam berkas *measurement_log.csv* melalui mekanisme *buffered write*.

3.3.2 Algoritma Pembacaan Parameter (RSSI dan GPS)

Proses akuisisi data lapangan pada USV melibatkan dua jenis sumber data dengan protokol komunikasi yang sepenuhnya berbeda. Oleh karena itu, algoritma pembacaan parameter dibagi menjadi dua subsistem fungsional, yaitu ekstraksi data telemetri navigasi (koordinat GPS) melalui protokol MAVLink dan ekstraksi data telemetri jaringan (nilai RSSI) melalui antarmuka *Application Programming Interface* (API).

3.3.2.1 Ekstraksi Data Navigasi (GPS) Berbasis MAVROS

Pada arsitektur wahana, modul GPS RadioLink SE100 tidak dihubungkan langsung ke *Single Board Computer* (Jetson Nano), melainkan diproses terlebih dahulu oleh *Flight Controller* (Pixhawk). Jetson Nano bertindak sebagai komputer pendamping (*companion computer*) yang terhubung ke Pixhawk melalui antarmuka komunikasi serial (*Telemetry/USB*) dengan kecepatan transmisi data (*baud rate*)

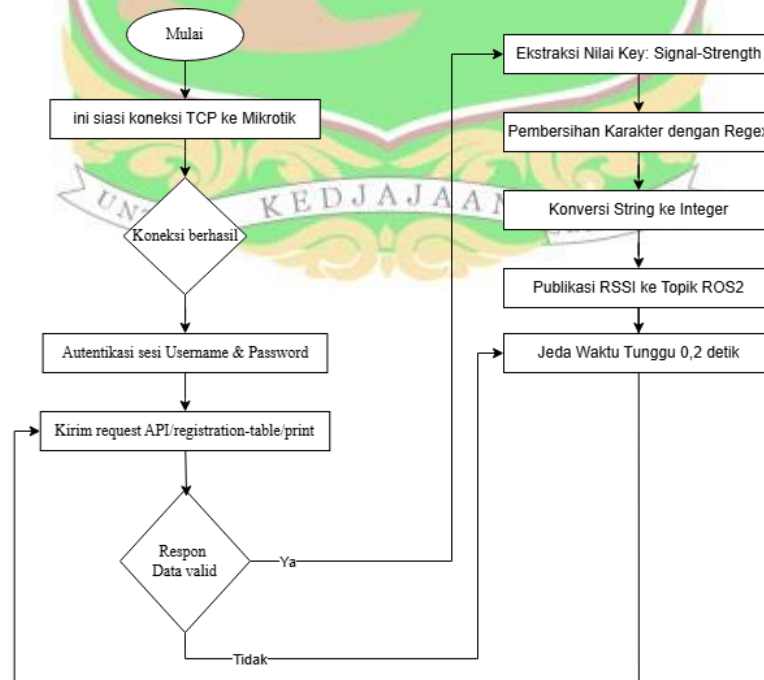
tinggi sebesar 921600 bps untuk mencegah terjadinya latensi atau penumpukan antrean paket data (*bottleneck*).

Untuk menjembatani komunikasi antara protokol MAVLink dari Pixhawk dan ekosistem ROS 2, sistem memanfaatkan pustaka antarmuka standar bernama MAVROS (MAVLink to ROS *Gateway*). Penggunaan pustaka ini mengeliminasi kebutuhan untuk melakukan pemotongan teks (*parsing*) kalimat NMEA 0183 secara manual. Algoritma di dalam *mavros_node* secara otomatis mendengarkan aliran data serial, mengekstraksi paket GLOBAL_POSITION_INT (yang memuat data lintang, bujur, dan ketinggian dari GPS dengan laju 10 Hz), lalu menerjemahkannya ke dalam tipe pesan *sensor_msgs/NavSatFix* untuk dipublikasikan secara konstan ke ekosistem ROS 2.

3.3.2.2 Akuisisi Data Kekuatan Sinyal (RSSI) via RouterOS

API Perekaman parameter Received Signal Strength Indicator (RSSI) dilakukan dengan menarik data metrik langsung dari sistem operasi MikroTik Groove (RouterOS) yang terhubung ke Jetson Nano melalui antarmuka *Ethernet* (LAN). Algoritma pembacaan tidak menggunakan metode penelusuran antarmuka baris perintah (*SSH/Telnet scraping*) karena memiliki beban komputasi dan latensi yang tinggi. Sebagai gantinya, sistem menggunakan protokol RouterOS API melalui antarmuka *Transmission Control Protocol* (TCP).

Algoritma pembacaan RSSI yang tertanam pada skrip Python di dalam *rss_node* beroperasi secara *looping* (berulang) dengan alur logika (*pseudocode*) sebagai berikut:



Gambar 3. 15 Algoritma Pembacaan RSSI

Melalui implementasi algoritma pada gambar 3.15 di atas, nilai kekuatan sinyal yang tercampur dengan karakter teks tambahan (misalnya -65dBm@6Mbps) dapat diekstraksi secara presisi menjadi bilangan bulat murni (-65) yang valid untuk dihitung dalam persamaan *Path Loss*. Kedua subsistem pembacaan ini berjalan secara asinkron di latar belakang, menjamin ketersediaan aliran data mentah yang persisten sebelum memasuki tahap sinkronisasi waktu dan komputasi jarak spasial.

3.3.3 Implementasi Teorema *Haversine* untuk Penentuan Jarak

Jarak antara antenna pemancar di stasiun darat dan antenna penerima di wahana USV merupakan variabel independen yang paling fundamental dalam perhitungan *Path loss Exponent*. Mengingat pergerakan kapal di lingkungan perairan terbuka bersifat dinamis, perhitungan jarak tidak dapat dilakukan menggunakan pengukuran statis, melainkan harus dihitung secara komputasional setiap kali paket data baru diterima.

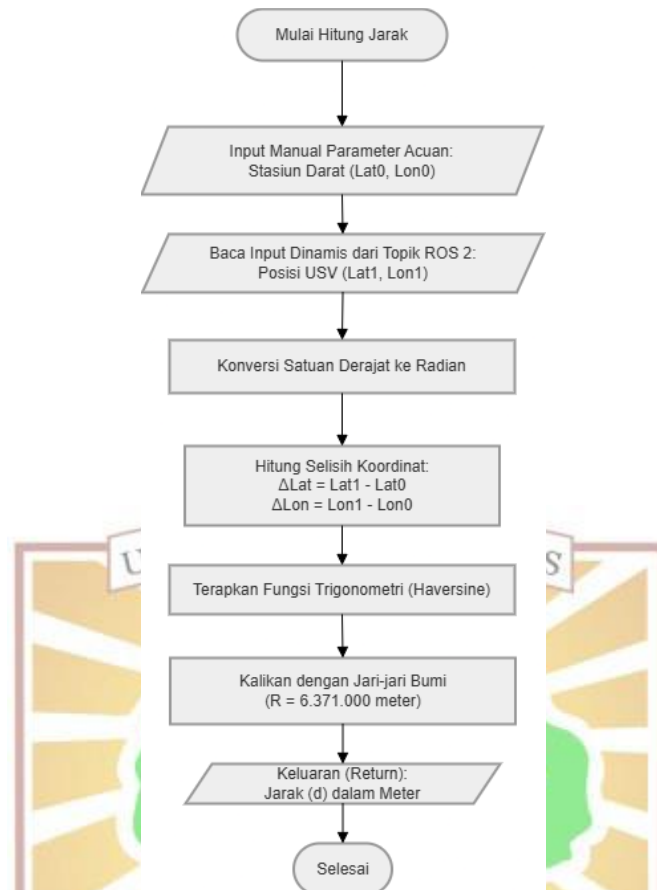
Pada sistem akuisisi data ini, jarak dihitung secara real-time di dalam `data_logger_node` menggunakan Teorema *Haversine*. Teorema ini digunakan untuk memperhitungkan kelengkungan permukaan bumi, sehingga memberikan hasil yang jauh lebih akurat dibandingkan dengan perhitungan jarak *Euclidean* linier ketika menggunakan format koordinat geografis.

3.3.3.1 Mekanisme Penentuan Titik Acuan (*Ground Station*)

Untuk menjamin presisi perhitungan, koordinat stasiun darat tidak diinisiasi secara otomatis, melainkan ditetapkan secara manual (*static configuration*). Sebelum USV diluncurkan, posisi fisik antenna pemancar TP-Link CPE210 yang terpasang pada tripod diukur, dan nilai lintang serta bujurnya dimasukkan secara manual ke dalam parameter konfigurasi perangkat lunak sebagai Titik Nol atau *Home Point* (Lat_0, Lon_0). Pendekatan ini mengeliminasi risiko pergeseran titik acuan yang sering terjadi akibat fluktuasi sinyal satelit pada tahap pemanasan awal (*warm-up*) sensor GPS.

3.3.3.2 Algoritma Komputasi Jarak

Setiap kali algoritma sinkronisasi (*ApproximateTimeSynchronizer*) berhasil memasangkan data RSSI dengan data koordinat USV terkini (Lat_1, Lon_1) dari MAVROS, skrip Python akan mengeksekusi perhitungan jarak dengan alur logika seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 16 Diagram Alir Implementasi Algoritma *Haversine*

Berdasarkan gambar 3.16 tersebut, implementasi komputasi jarak merujuk pada Persamaan 2.9 di Bab 2. Proses ini diterjemahkan ke dalam bahasa pemrograman Python dengan memanfaatkan fungsi pustaka matematika standar (*math*). Langkah pertama dalam algoritma ini adalah mengonversi seluruh parameter derajat geografis menjadi radian. Selanjutnya, program menghitung selisih lintang (ΔLat) dan bujur (ΔLon), lalu menerapkannya ke dalam fungsi trigonometri sinus dan kosinus sesuai dengan rumusan *Haversine*.

3.4 Skenario dan Prosedur Pengujian Lapangan

Tahap pengujian lapangan merupakan fase eksekusi untuk mengumpulkan data empiris berupa kekuatan sinyal (RSSI) dan jarak propagasi secara sinkron. Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi karakteristik kanal komunikasi nirkabel frekuensi 2,4 GHz pada konfigurasi *surface-to-shore* dan mengekstraksi nilai *Path loss Exponent* di lingkungan perairan terbuka.

3.4.1 Lokasi dan Lingkungan Pengujian

Pengukuran lapangan dilaksanakan di perairan Danau Maninjau, Kabupaten Agam, Sumatera Barat. Lokasi ini dipilih karena sangat merepresentasikan karakteristik lingkungan operasional ideal bagi *Unmanned Surface Vehicle* (USV).

Danau Maninjau menawarkan perairan bentang terbuka yang luas tanpa adanya rintangan fisik buatan (seperti gedung atau infrastruktur pelabuhan yang padat) di sepanjang jalur lintasan kapal, sehingga menjamin terpenuhinya kondisi *Line-of-sight* (LOS) secara optimal. Selain itu, kondisi permukaan air tawar yang relatif tenang sangat sesuai dengan asumsi dasar pemodelan refleksi spekular pada model propagasi *Two-ray ground reflection*.



Gambar 3. 17 Lokasi Pengujian Danau Maninjau

3.4.2 Konfigurasi Parameter Fisik (Geometri Antena)

Dalam analisis propagasi gelombang radio, khususnya untuk menentukan jarak batas zona Fresnel dan *breakpoint distance*, parameter ketinggian antena merupakan variabel yang sangat krusial. Pengukuran ketinggian tidak dilakukan dari ujung fisik perangkat, melainkan diukur tepat pada pusat fase (phase center) atau pusat radiasi dari masing-masing antena. Konfigurasi fisik pada pengujian ini ditetapkan sebagai berikut:

1. Tinggi Antena Pemancar (h_t): Perangkat stasiun darat (TP-Link CPE210) dipasang secara statis menghadap ke arah perairan. Ketinggian pusat radiasi antena stasiun darat ditetapkan sebesar 2 meter diukur dari referensi permukaan air danau.
2. Tinggi Antena Penerima (h_r): Perangkat penerima pada USV (MikroTik Groove dengan antena *omni-directional*) dipasang secara vertikal pada lambung kapal. Ketinggian pusat radiasi antena penerima ditetapkan sebesar 0,45 meter diukur dari batas garis air lambung kapal (*Load Waterline* / LWL) saat beban penuh.

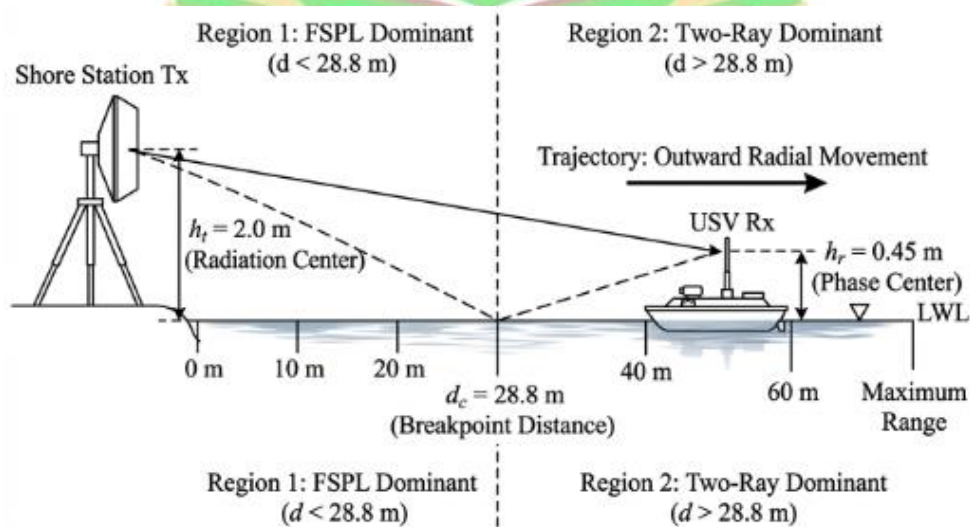
Berdasarkan penetapan ketinggian antenna pemancar dan penerima tersebut, parameter jarak transisi teoritis (*breakpoint distance* atau d_c) dapat dihitung sebelum pengujian dilakukan sebagai parameter desain skenario pergerakan. Mengacu pada rumusan teoritis di Bab 2, dengan frekuensi operasi 2,4 GHz (memiliki panjang gelombang $\lambda \approx 0,125$ meter), jarak transisi untuk skenario pengujian ini yaitu dapat dihitung dengan persamaan 2.7

$$d_c = \frac{4h_t h_r}{\lambda} = \frac{4 \times 2 \times 0,45}{0,125} = 28,8 \text{ meter}$$

Nilai $d_c = 28,8$ meter ini menjadi acuan spasial kritis (*critical distance*) di mana karakteristik pelemahan sinyal diprediksi akan mengalami perubahan tren propagasi dari pendekatan ruang bebas (FSPL) menjadi model interferensi Two-Ray.

3.4.3 Skenario Pergerakan Wahana

Untuk mendapatkan variasi jarak propagasi yang memadai dan mencakup seluruh fase propagasi (sebelum dan sesudah area *breakpoint distance*), USV digerakkan dengan skenario pergerakan lintasan lurus radial menjauhi stasiun darat (*outward radial trajectory*). Berdasarkan ilustrasi skenario pergerakan wahana pada Gambar 3.18, lintasan USV dirancang untuk melaju secara kontinu dari titik awal peluncuran (0 meter) hingga melewati batas jarak transisi teoritis ($d_c = 28,8$ meter). Wahana akan terus bergerak memasuki region *Two-Ray* dominan hingga tautan koneksi WiFi terputus atau batas maksimal jarak aman teleoperasi tercapai. Hal ini bertujuan agar data RSSI yang terekam dapat merepresentasikan secara utuh kedua region propagasi untuk keperluan komparasi nilai *Path loss Exponent* (n).



Gambar 3. 18 Ilustrasi Skenario Pergerakan Radial USV dan Transisi Region Propagasi

Selama pergerakan tersebut, kapal dikemudikan secara manual (teleoperasi) oleh operator di darat menggunakan *remote control* (RadioMaster) dengan kecepatan jelajah yang dijaga konstan. Mengingat propagasi gelombang radio di atas permukaan air sangat rentan terhadap fluktuasi sesaat (*small-scale fading*) akibat dinamika riak air danau dan angin, pengujian tidak hanya dilakukan dalam satu kali jalan. Pengambilan data dilakukan secara berulang (repetisi) pada lintasan yang sama. Data metrik yang terkumpul dari beberapa sesi repetisi tersebut kemudian akan dirata-ratakan (*averaging*) pada fase analisis data pasca-pengujian untuk menghasilkan tren pelemahan sinyal yang representatif dan meminimalkan anomali *multipath*.

3.4.4 Standar Operasional Prosedur (SOP) Pengujian

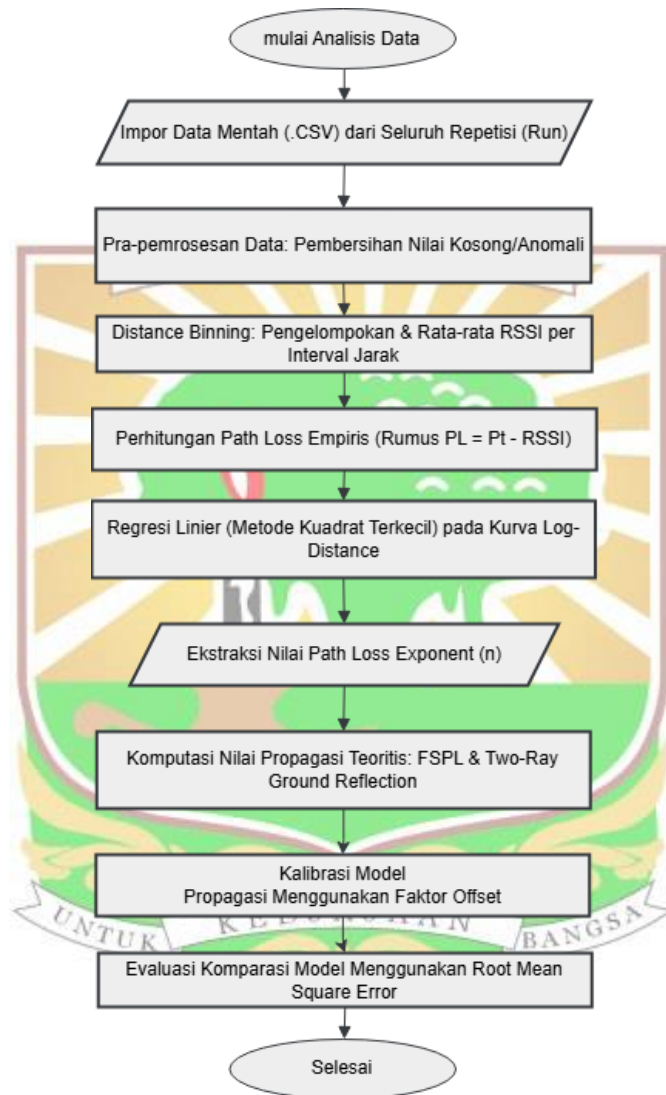
Agar proses akuisisi data berjalan sistematis dan konsisten pada setiap repetisi, pelaksanaan pengujian di lapangan mengikuti Standar Operasional Prosedur (SOP) dengan urutan sebagai berikut:

1. Persiapan dan Penempatan Alat: Menempatkan stasiun darat di bibir perairan, mendirikan tiang antena setinggi 2 meter (h_t), dan menyalakan *router gateway* TP-Link MR100 beserta Laptop *Ground Control Station* (GCS).
2. Inisiasi Wahana: Menurunkan USV ke permukaan air, menyalakan sistem catu daya baterai, dan memastikan *Flight Controller* (Pixhawk) serta Jetson Orin Nano beroperasi dan terkoneksi ke jaringan LAN nirkabel (WiFi).
3. Penetapan Titik Acuan Statis: Melakukan pembacaan koordinat GPS stasiun darat secara manual, kemudian memasukkan nilai lintang dan bujur tersebut (Lat_0, Lon_0) ke dalam berkas konfigurasi parameter *node* ROS 2 di Jetson Nano sebagai titik nol (*Home Point*).
4. Eksekusi Perekaman Data: Mengaktifkan skrip otomatis *data_logger_node* pada sistem ROS 2 Jetson Nano. Program akan mulai merekam data (Waktu, Jarak, RSSI) ke dalam bentuk *buffer CSV*.
5. Pergerakan Menjauh: Operator mengendalikan USV menggunakan *remote control* lurus menjauhi stasiun darat hingga koneksi WiFi putus atau jarak aman teleoperasi tercapai.
6. Terminasi dan Repetisi: Operator memanggil USV kembali ke titik awal peluncuran. Operator jaringan mematikan *node logger*, memverifikasi penyimpanan berkas .CSV, dan mengganti nama berkas sesuai nomor repetisi (misal: *Run_1.csv*).
7. Membuka kembali *node logger* yang baru dan mengulangi langkah 4 hingga 6 sampai jumlah pengulangan yang direncanakan tercapai.

3.5 Metode Analisis Data

Data mentah (*raw data*) yang diperoleh dari hasil pengukuran lapangan tersimpan dalam format berkas .CSV. Berkas ini memuat himpunan data dinamis berupa stempel waktu, koordinat lintang dan bujur, estimasi jarak propagasi

(*Haversine*), serta nilai kekuatan sinyal terima (RSSI). Untuk menjawab tujuan penelitian, data mentah tersebut harus melalui serangkaian tahapan analisis matematis dan statistik untuk mengekstraksi nilai *Path loss Exponent* (n) serta mengevaluasi kesesuaiannya terhadap model propagasi teoritis. Alur pemrosesan dan analisis data secara keseluruhan diilustrasikan pada diagram alir di Gambar 3.19



Gambar 3. 19 Diagram Alir Metode Analisis Data

Tahapan-tahapan analisis data berdasarkan diagram alir di atas diuraikan secara rinci pada subbab berikut:

3.5.1 Pra-pemrosesan Data dan *Distance Binning*

Tahap awal analisis adalah menggabungkan seluruh berkas .CSV dari berbagai repetisi (*Run*) pengujian menjadi satu himpunan data utuh (*dataset*). Mengingat pengukuran dilakukan di atas permukaan air yang sangat rentan

terhadap efek *multipath* dan *small-scale fading*, data RSSI akan mengalami fluktuasi acak yang ekstrem pada interval jarak yang sangat rapat. Selain itu, kecepatan wahana USV yang dikendalikan secara manual tidak sepenuhnya konstan, sehingga sebaran titik jarak antar repetisi tidak akan seragam.

Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini menerapkan metode *Distance Binning* (pengelompokan spasial). Metode ini bekerja dengan membagi keseluruhan rentang jarak propagasi menjadi segmen-segmen interval berukuran tetap sebesar 1 meter. Seluruh sampel data RSSI yang jatuh ke dalam rentang suatu bin akan dijumlahkan dan dicari nilai rata-ratanya ($\overline{RSSI}$). Pendekatan ini berfungsi sebagai *spatial low-pass filter* yang secara efektif meredam fluktuasi fading sesaat, sehingga tren pelemahan sinyal utama (*large-scale path loss*) dapat terlihat dengan jelas dan siap dianalisis.

3.5.2 Perhitungan *Path loss* Empiris

Setelah diperoleh nilai rata-rata RSSI per interval jarak spasial, langkah selanjutnya adalah mengonversi parameter daya terima tersebut menjadi nilai pelemahan propagasi (*Path loss* empiris). Berdasarkan batasan masalah penelitian, daya pancar sistem (P_t) telah ditetapkan secara konstan sebesar 27 dBm. Perhitungan *Path loss* empiris merujuk pada definisi umum hubungan antara daya pancar dan daya terima sesuai dengan Persamaan 2.9 pada Bab 2.

Nilai *Path loss* empiris yang diperoleh dari perhitungan ini kemudian diplot ke dalam grafik dua dimensi sebagai fungsi dari jarak logaritmik, yang akan menjadi dasar bagi perhitungan *Path loss Exponent*.

3.5.3 Ekstraksi *Path loss Exponent* (n)

Untuk mendapatkan laju pelemahan sinyal spesifik di lingkungan perairan Danau Maninjau, nilai *Path loss Exponent* (n) diekstraksi dari data *Path loss* empiris menggunakan pendekatan statistik. Berdasarkan model *Log-Distance Path loss* pada Persamaan 2.17 di Bab 2, hubungan antara RSSI dan jarak bersifat linier dalam skala logaritmik basis 10. Oleh karena itu, ekstraksi nilai n dilakukan menggunakan Metode Regresi Linier Kuadrat Terkecil (*Ordinary Least Squares*). Untuk merepresentasikan karakteristik transisi propagasi secara presisi, analisis regresi linier ini dibagi menjadi dua segmen berdasarkan jarak transisi teoritis ($d_c = 28,8$ meter). Regresi linier pertama diterapkan pada himpunan data di Region 1 ($d < d_c$) untuk mendapatkan nilai n_1 (karakteristik dominan FSPL), dan regresi linier kedua diterapkan pada himpunan data di Region 2 ($d > d_c$) untuk mendapatkan nilai n_2 (karakteristik dominan pantulan *Two-Ray*).

Kemiringan (*slope*) dari masing-masing garis regresi tersebut secara matematis merepresentasikan nilai 10_n . Dengan membagi nilai kemiringan tersebut dengan 10, nilai murni *Path loss Exponent* lingkungan perairan pada kedua region tersebut dapat diidentifikasi secara kuantitatif. Secara matematis, ekstraksi nilai *Path loss Exponent* (n) dengan metode *Ordinary Least Squares* (OLS) dilakukan

dengan memetakan persamaan *Log-Distance Path loss* ke dalam bentuk persamaan garis lurus $y = mx + c$. Berdasarkan Persamaan 2.10, variabel-variabel tersebut didefinisikan sebagai:

$$\begin{aligned} y_i &= PL(d_i) \text{ (Nilai } Path \text{ loss empiris pada jarak ke-}i\text{)} \\ x_i &= 10 \log_{10} \left(\frac{d_i}{d_0} \right) \text{ (Nilai jarak dalam skala logaritmik)} \\ m &= n \text{ (Kemiringan garis yang merepresentasikan } Path \text{ loss Exponent)} \\ c &= PL(d_0) \text{ (Konstanta atau titik potong sumbu } y\text{)} \end{aligned}$$

Untuk mendapatkan garis regresi terbaik yang meminimalkan jumlah kuadrat galat (*error*) antara titik data empiris dan garis tren, nilai kemiringan m (atau n) dihitung menggunakan persamaan OLS 3.1 berikut:

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^N (x_i) \sum_{i=1}^N (y_i)}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N (x_i) \right)^2} \quad (3.1)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} n &= \text{Nilai } Path \text{ loss Exponent} \\ N &= \text{Jumlah total sampel data (bin interval jarak) pada region yang dianalisis} \\ x_i &= 10 \log_{10} \left(\frac{d_i}{d_0} \right) \text{ pada sampel ke-}i \\ y_i &= PL(d_i) \text{ empiris pada sampel ke-}i \text{ (dalam dB)} \end{aligned}$$

Perhitungan menggunakan persamaan OLS ini diaplikasikan dua kali secara terpisah. Komputasi pertama dilakukan menggunakan himpunan data (N) pada Region 1 ($d < 28 \text{ m}$) untuk menghasilkan nilai n_1 . Komputasi kedua dilakukan menggunakan himpunan data (N) pada Region 2 ($d > 28 \text{ m}$) untuk menghasilkan nilai n_2 . Melalui persamaan ini, nilai numerik n yang merepresentasikan laju redaman spesifik di perairan Danau Maninjau dapat diperoleh secara kuantitatif dan terhindar dari bias estimasi visual.

3.5.4 Kalibrasi Model Propagasi Menggunakan Faktor *Offset*

Perhitungan daya terima teoritis menggunakan pendekatan *Free Space Path loss* (Persamaan 2.4) dan *Exact Two-Ray Ground Reflection* (Persamaan 2.5) merupakan model matematis yang diturunkan untuk kondisi medium transmisi ideal, sehingga tidak memperhitungkan karakteristik non ideal dari perangkat keras komersial yang digunakan di lapangan. Sistem antenna pemancar, kabel RF, serta modul penerima memiliki redaman internal atau rugi-rugi sistem (*System Loss*) yang tidak terekam secara eksplisit oleh kedua persamaan tersebut. Akibatnya, terdapat selisih (*gap*) daya absolut antara nilai daya terima hasil prediksi teoritis

murni dengan nilai daya terima aktual (RSSI) yang terekam oleh sensor di lapangan, meskipun pada jarak pengukuran yang sangat dekat.

Agar perbandingan kurva atenuasi antara model teoritis dan data empiris pada tahap evaluasi model dapat dilakukan secara objektif, diperlukan tahap kalibrasi offset yang mengeliminasi bias rugi-rugi perangkat keras tersebut. Kalibrasi dilakukan dengan menetapkan nilai redaman sistem pada satu titik jarak referensi terdekat (d_0), yaitu titik bin pertama hasil pra-pemrosesan *Distance Binning* pada tahap sebelumnya. Nilai offset kalibrasi dihitung sebagai selisih antara daya terima teoritis murni dan RSSI empiris pada jarak referensi tersebut, sesuai dengan Persamaan 3.2 berikut:

$$Offset_{dB} = P_{r,theoritis}(d_0) - RSSI_{empiris}(d_0) \quad (3.2)$$

Keterangan:

$Offset_{dB}$	= selisih rugi-rugi sistem hasil kalibrasi (dB),
$P_{r,theoritis}$	= daya terima teoritis murni pada jarak referensi (dBm),
$RSSI_{empiris}$	= RSSI empiris hasil pengukuran pada jarak referensi (dBm),
d_0	= jarak referensi terdekat hasil <i>distance Binning</i> (m).

Perhitungan offset kalibrasi tersebut dilakukan secara terpisah untuk setiap model propagasi deterministik yang dievaluasi, yaitu *Free Space Path loss* (FSPL) dan *Exact Two-Ray Ground Reflection*, sehingga diperoleh dua nilai offset yang berbeda sesuai dengan karakteristik masing-masing model pada titik referensi d_0 . Nilai offset yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk mengoreksi kurva prediksi daya terima teoritis di sepanjang rentang jarak pengujian, sehingga kurva model dan sebaran data empiris berada pada basis daya yang sama dan dapat dibandingkan secara adil (*fair comparison*). Perlu ditegaskan bahwa kalibrasi ini hanya mengoreksi komponen offset konstan (pergeseran vertikal kurva) dan tidak memengaruhi nilai *Path loss Exponent* (n) yang telah diekstraksi terlebih dahulu pada tahap sebelumnya, karena parameter tersebut merepresentasikan kemiringan (slope) kurva, bukan titik potongnya terhadap sumbu vertikal. Kurva model teoritis yang telah dikalibrasi inilah yang selanjutnya digunakan sebagai pembanding pada tahap evaluasi dan komparasi model berikut.

3.5.5 Evaluasi dan Komparasi Model

Tahap akhir dari analisis data adalah mengevaluasi tingkat kesesuaian antara hasil pengukuran lapangan (model empiris) dengan model propagasi teoritis klasik, yaitu *Free Space Path loss* (FSPL) dan *Two-ray ground reflection*. Untuk membandingkan performa dan tingkat akurasi setiap model secara objektif, penelitian ini menggunakan parameter metrik *Root Mean Square Error* (RMSE). RMSE mengukur besaran rata-rata penyimpangan (galat) antara nilai prediksi teoritis dengan nilai observasi aktual. Rumus perhitungan RMSE didefinisikan pada persamaan 3.3 sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (PL_{empiris,i} - PL_{teoritis,i})^2} \quad (3.3)$$

Keterangan:

- N = Jumlah total sampel data (*bin*)
 $PL_{empiris,i}$ = Nilai *Path loss* empiris pada titik jarak ke- i (dB)
 $PL_{teoritis,i}$ = Nilai *Path loss* Teoritis pada titik jarak ke- i (dB)

Meskipun RMSE absolut memberikan gambaran galat secara matematis, metrik ini sering kali sulit diinterpretasikan probabilitas skalanya jika tidak dikomparasikan terhadap kondisi redaman lingkungan aslinya. Oleh karena itu, nilai galat absolut tersebut dikonversi lebih lanjut ke dalam bentuk persentase kesalahan relatif yang disebut dengan *Normalized Root Mean Square Error* (NRMSE). Normalisasi ini dilakukan dengan membagi nilai RMSE absolut terhadap rata-rata observasi empiris (*Path loss* aktual) pada wilayah tinjauan. Formulasi matematis untuk komputasi persentase galat relatif ini dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\overline{PL}_{empiris}} \times 100\% \quad (3.4)$$

Keterangan:

- $NRMSE$ = Persentase tingkat galat relatif dari model propagasi (%)
 $\overline{PL}_{empiris}$ = Nilai rata-rata daya atenuasi (*Path Loss*) empiris di lapangan pada rentang jarak tertentu (dB)

Melalui penjabaran kedua persamaan di atas, performa akurasi model berbanding terbalik dengan nilai yang dihasilkan. Semakin kecil nilai RMSE dan persentase galat relatif yang diekstraksi, maka kurva model teoritis tersebut dinilai semakin presisi dalam merepresentasikan karakteristik fisis perambatan gelombang yang sebenarnya. Metrik ini pada akhirnya akan menjadi landasan objektif untuk menyimpulkan parameter eksponen mana yang paling layak diimplementasikan dalam arsitektur *Link Budget* sistem telemetri USV.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

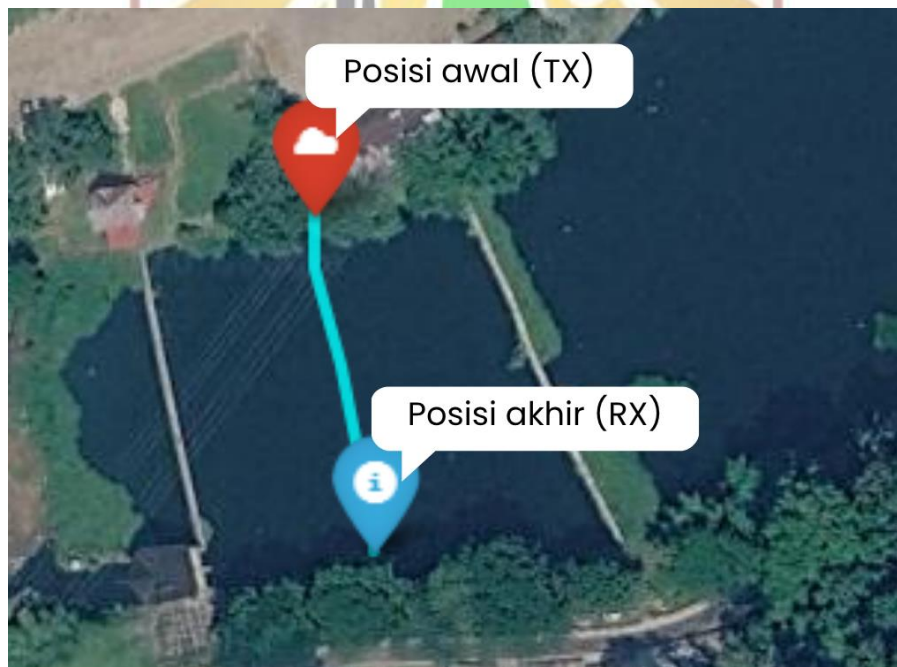
4.1 Hasil Akuisisi Data dan Algoritma *Haversine*

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.



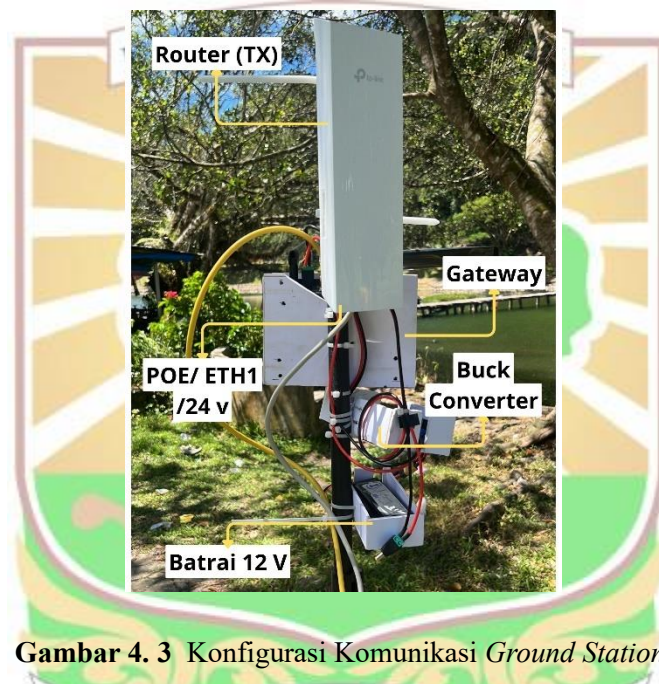
Gambar 4. 1 Proses Akuisisi Data Propagasi Gelombang Radio Menggunakan Wahana USV di Danau Maninjau.



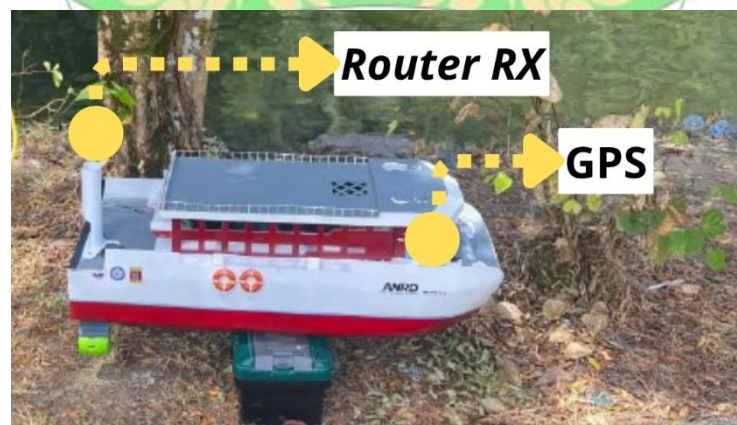
Gambar 4. 2 Lintasan Pengambilan Data Pada Salah Satu Sample Pengujian Berdasarkan Koordinat GPS

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*.

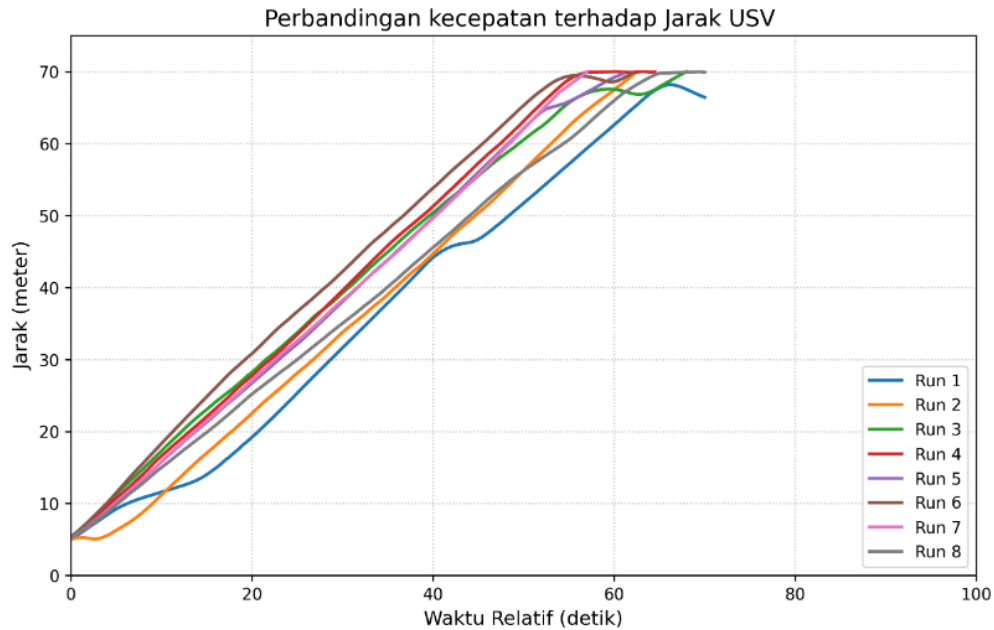
Tabel 4. 4 Hubungan Ketelitian Koordinat Geografis Terhadap Resolusi Jarak

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

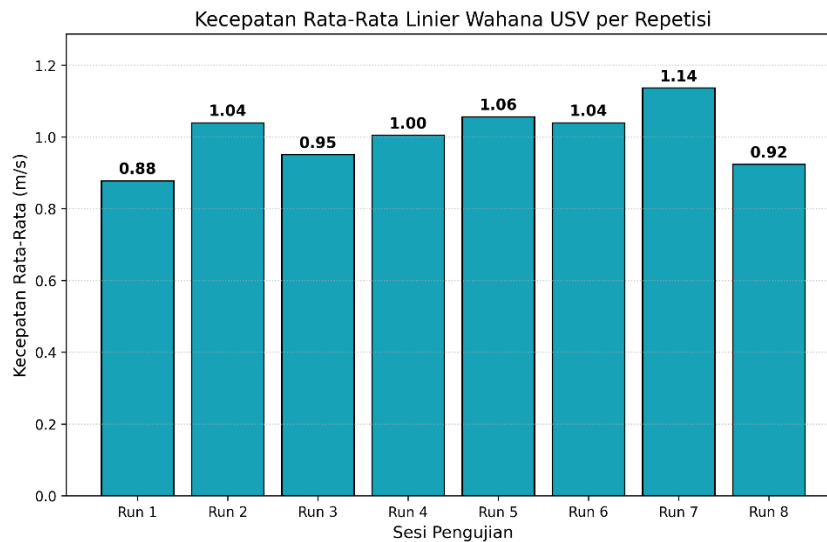
Setelah proses akuisisi data selesai dilakukan, tahap berikutnya adalah menganalisis karakteristik pergerakan wahana selama pengujian. Analisis ini bertujuan untuk menggambarkan profil pergerakan USV terhadap waktu serta mengevaluasi variasi kecepatan pada setiap repetisi pengujian. Hasil analisis tersebut 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*) antena 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 antena, 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* antena pemancar yang dimodelkan berdasarkan karakteristik antena directional TP-Link CPE210 dengan horizontal beamwidth sebesar 65° . *Coverage area* dibentuk sebagai sektor lingkaran dengan titik pusat berada pada posisi antena *Ground Station* dan radius sebesar 82 m, yaitu jarak operasional maksimum selama pengujian. Luas sektor *coverage area* dihitung menggunakan Persaman 4.1.

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

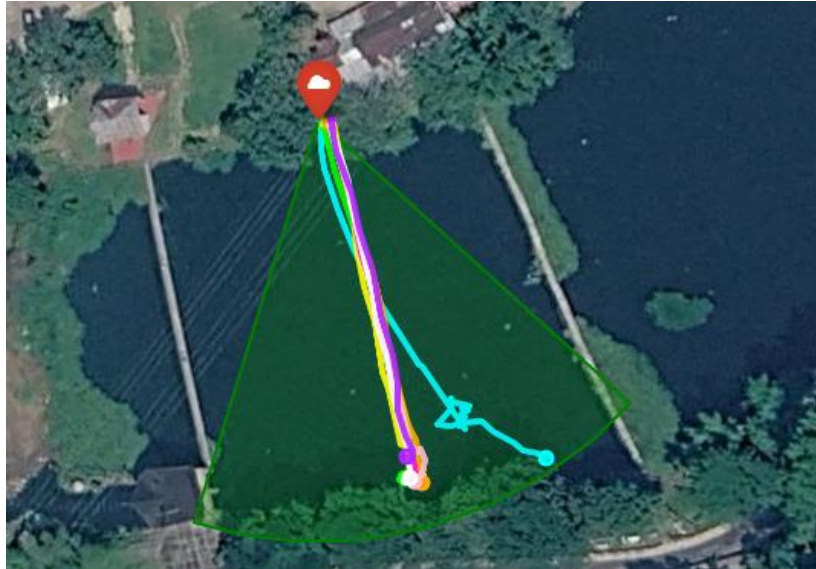
Keterangan:

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

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

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

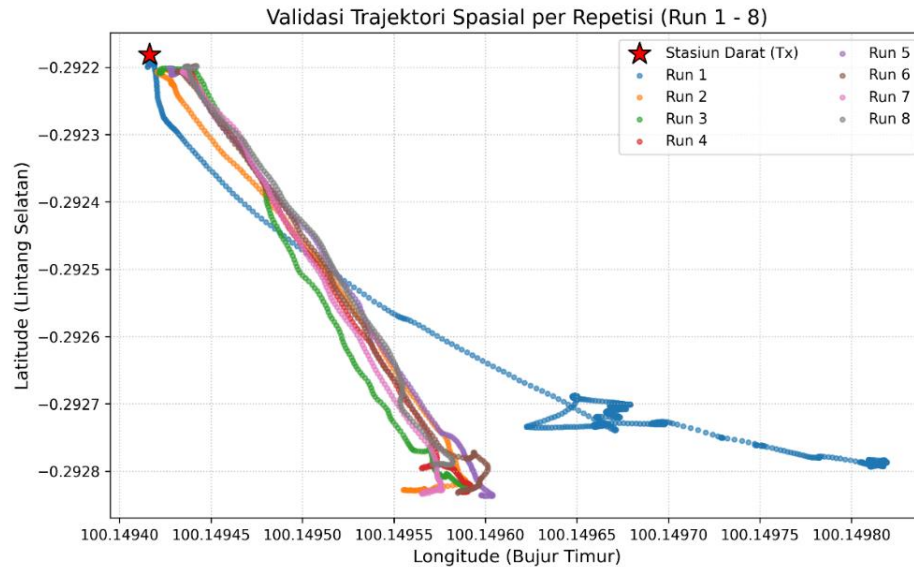
Berdasarkan parameter tersebut diperoleh luas *coverage area* sekitar $3.820 m^2$, yang merepresentasikan wilayah utama pancaran antena selama proses pengujian berlangsung.



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 antenna. *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 antenna sehingga komunikasi antara *Ground Station* dan USV tetap berlangsung pada wilayah layanan antenna 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 antenna 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)

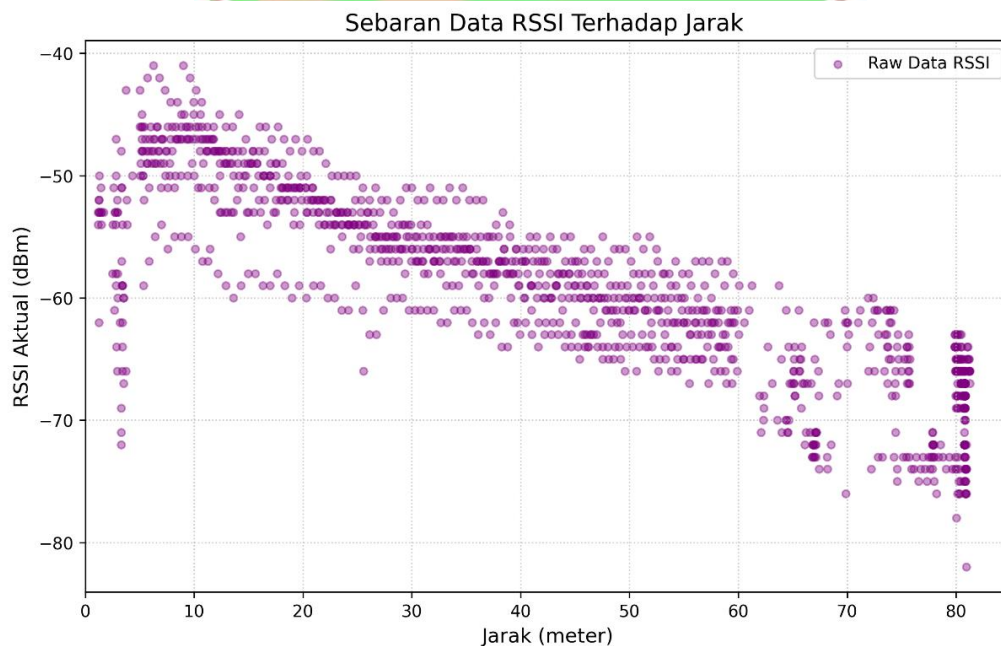
Perhitungan dilakukan menggunakan koordinat akhir *Run 1* sebagai lintasan yang mengalami deviasi dan koordinat akhir *Run 2* sebagai lintasan referensi yang mewakili pola pergerakan dominan selama pengujian. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai pergeseran lateral sebesar 27,85 m. Nilai tersebut 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

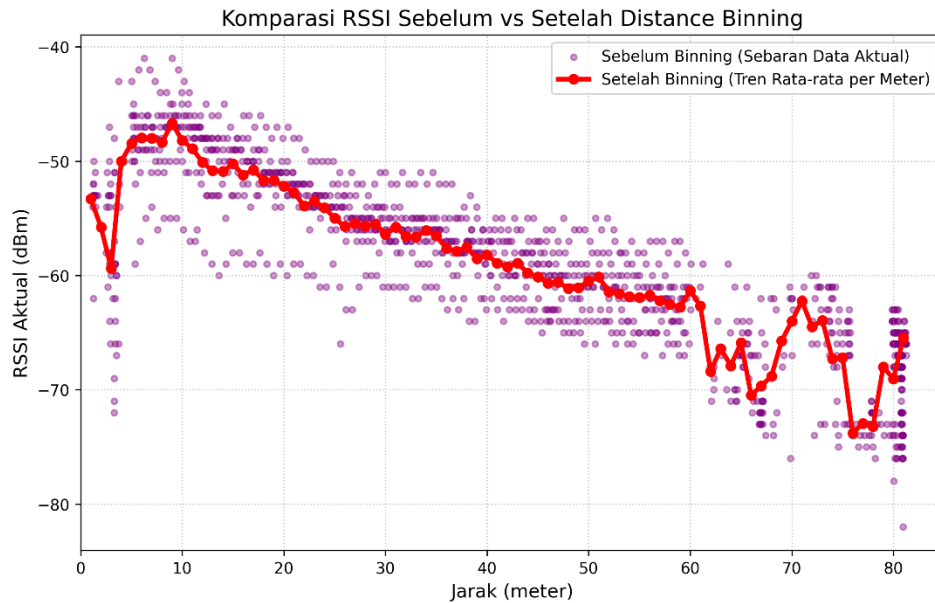
Berdasarkan Gambar 4.9 terlihat bahwa secara umum nilai RSSI menunjukkan kecenderungan menuRun seiring bertambahnya jarak antara *Ground Station* dan USV. Pada jarak dekat sebagian besar data berada pada kisaran sekitar -45 dBm hingga -55 dBm, sedangkan pada jarak sekitar 70–80 meter nilai RSSI umumnya 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

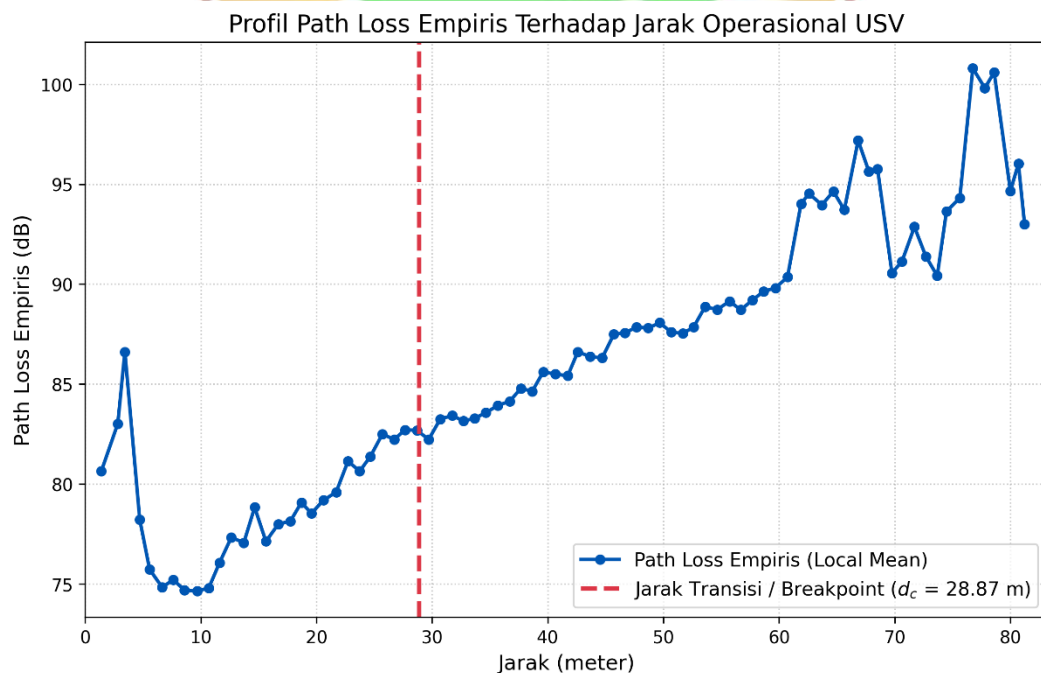
Berdasarkan Tabel 4.6 terlihat bahwa jumlah sampel pada setiap interval jarak tidak selalu sama. Pada interval awal, yaitu bin 1 hingga bin 5, jumlah sampel relatif lebih banyak dibandingkan interval pada bagian akhir pengukuran. Kondisi ini menunjukkan bahwa kepadatan data hasil akuisisi lebih tinggi 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.

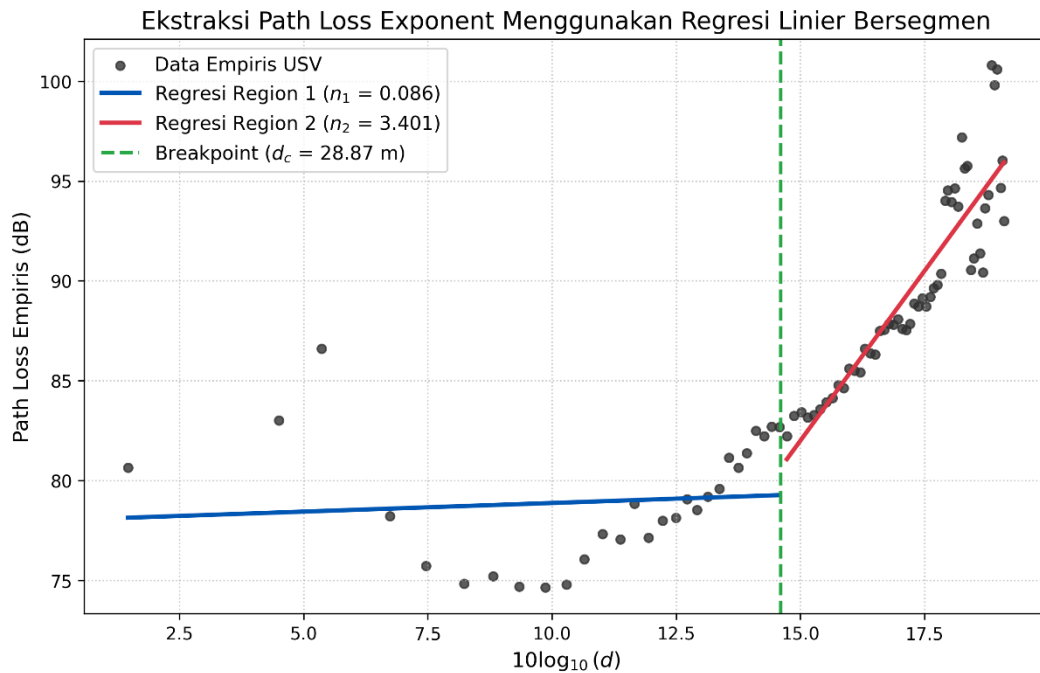
Meskipun demikian, kecenderungan peningkatan *Path loss* terhadap pertambahan jarak masih dapat diamati hingga akhir lintasan pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme pelemahan sinyal akibat propagasi tetap menjadi karakteristik utama pada Region 2, sementara fluktuasi yang muncul pada beberapa 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 d_0 , 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.

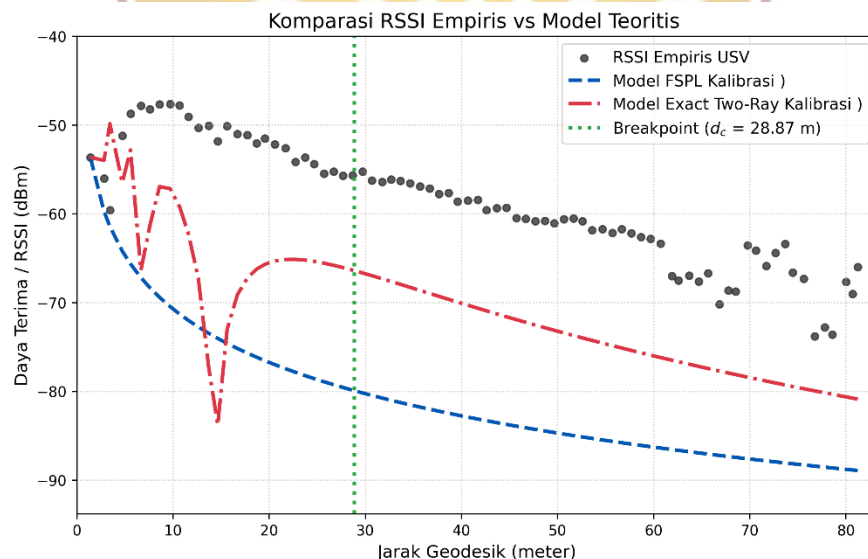
4.7 Komparasi Daya Terima Empiris Terhadap Model Teoritis

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.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil akuisisi data lapangan, proses pengolahan data, serta analisis karakteristik propagasi gelombang radio WiFi 2,4 GHz pada komunikasi *surface-to-shore* antara *Unmanned Surface Vehicle* (USV) dan stasiun darat di Danau Maninjau, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Karakteristik *Path loss* komunikasi WiFi 2,4 GHz pada lingkungan perairan menunjukkan bahwa redaman sinyal cenderung meningkat seiring bertambahnya jarak antara *Ground Station* dan USV. Namun, hubungan tersebut tidak membentuk pola linier tunggal sepanjang lintasan propagasi. Hasil analisis menunjukkan adanya perubahan karakteristik propagasi pada *breakpoint distance* teoritis sebesar 28,87 meter, yang membagi lintasan propagasi menjadi dua wilayah dengan mekanisme propagasi yang berbeda. Pada wilayah sebelum *breakpoint distance*, nilai *Path loss* masih berfluktuasi akibat dominasi interferensi *multipath* sehingga hubungan terhadap pertambahan jarak belum terbentuk secara konsisten. Sebaliknya, setelah melewati *breakpoint distance*, nilai *Path loss* meningkat secara lebih teratur terhadap jarak sehingga karakteristik *large-scale path loss* menjadi lebih jelas. Hasil ini menunjukkan bahwa analisis propagasi pada lingkungan perairan lebih tepat dilakukan menggunakan pendekatan dua wilayah propagasi (*dual-region propagation*).
2. Hasil ekstraksi *Path loss Exponent* (PLE) menggunakan regresi linier bersegmen menghasilkan nilai 0,0863 pada Region 1 dan 3,4014 pada Region 2. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,0087 pada Region 1 menunjukkan bahwa hubungan linier antara *Path loss* dan jarak belum terbentuk dengan baik akibat pengaruh interferensi *multipath* yang masih dominan. Sebaliknya, nilai $R^2 = 0,8204$ pada Region 2 menunjukkan bahwa hubungan linier telah terbentuk dengan baik setelah melewati *breakpoint distance*. Oleh karena itu, nilai *Path loss Exponent* sebesar 3,4014 dapat digunakan sebagai parameter empiris yang merepresentasikan karakteristik pelemahan sinyal komunikasi WiFi 2,4 GHz pada skenario *surface-to-shore* di lingkungan Danau Maninjau.
3. Hasil evaluasi model propagasi menunjukkan bahwa model *Exact Two-Ray Ground Reflection* memiliki tingkat kesesuaian yang lebih baik terhadap data empiris dibandingkan model *Free Space Path loss* (FSPL). Setelah dilakukan kalibrasi menggunakan faktor *offset*, model *Exact Two-Ray Ground Reflection* mampu mengikuti kecenderungan perubahan daya terima hasil pengukuran dengan lebih baik, terutama pada wilayah setelah *breakpoint distance*. Hal tersebut diperkuat oleh hasil evaluasi kuantitatif menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE), di mana model *Exact Two-Ray Ground Reflection*

menghasilkan nilai RMSE sebesar 14,445 dB pada Region 1 dan 11,866 dB pada Region 2, lebih rendah dibandingkan model FSPL yang menghasilkan RMSE sebesar 21,649 dB dan 22,683 dB. Dengan demikian, model *Exact Two-Ray Ground Reflection* lebih sesuai digunakan untuk merepresentasikan karakteristik propagasi komunikasi WiFi 2,4 GHz pada lingkungan perairan dibandingkan model propagasi ruang bebas.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal yang dapat menjadi masukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut.

1. Penelitian ini dilakukan pada satu lokasi pengujian, yaitu perairan Danau Maninjau, dengan kondisi lingkungan yang relatif stabil. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengukuran pada berbagai kondisi lingkungan perairan, seperti sungai, waduk, maupun wilayah pesisir, sehingga karakteristik propagasi yang diperoleh dapat dibandingkan pada lingkungan yang berbeda.
2. Pengujian pada penelitian ini menggunakan satu konfigurasi sistem komunikasi, yaitu frekuensi WiFi 2,4 GHz, daya pancar 27 dBm, antena pemancar *directional* 9 dBi, dan antena penerima *omni-directional* 6 dBi. Penelitian selanjutnya dapat mengevaluasi pengaruh variasi parameter sistem, seperti tinggi antena, jenis antena, frekuensi operasi, maupun daya pancar terhadap karakteristik *Path loss* dan nilai *Path loss Exponent* yang dihasilkan.
3. Model propagasi yang dievaluasi pada penelitian ini terbatas pada *Free Space Path loss* (FSPL) dan *Exact Two-Ray Ground Reflection*. Penelitian selanjutnya dapat memperluas evaluasi dengan membandingkan model propagasi empiris maupun semi-empiris lainnya, sehingga diperoleh model yang memiliki tingkat kesesuaian lebih baik terhadap karakteristik propagasi komunikasi *surface-to-shore* pada berbagai kondisi lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*, 2nd ed. in Prentice Hall communications engineering and emerging technologies series. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall PTR, 2002.
- [2] A. Stateczny, K. Gierlowski, and M. Hoeft, "Wireless Local Area Network Technologies as Communication Solutions for Unmanned Surface Vehicles," *Sensors*, vol. 22, no. 2, p. 655, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22020655.
- [3] M. Viswanathan and V. Mathuranathan, *Wireless Communication Systems in Matlab: (Black & White Edition)*. Independently Published, 2018. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=zry5uwEACAAJ>
- [4] E. Staudinger, R. Pöhlmann, A. Dammann, and S. Zhang, "Limits on Cooperative Positioning for a Robotic Swarm with Time of Flight Ranging over Two-Ray Ground Reflection Channel," *Electronics*, vol. 12, no. 9, p. 2139, May 2023, doi: 10.3390/electronics12092139.
- [5] Z. Liu, Q. Yao, Q. Li, L. Guo, and S. Hu, "Wireless Channel Model Based on Ray Tracing Algorithm in the Sea Environment," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2024, pp. 1–14, Jan. 2024, doi: 10.1155/2024/3080895.
- [6] M. De Piante, M. Midrio, R. Rinaldo, I. Scagnetto, R. Specogna, and F. Trevisan, "Sub-Gigahertz *Path loss* Measurement Campaign in Marine Environment: A Case Study," *Sensors*, vol. 24, no. 8, p. 2582, Apr. 2024, doi: 10.3390/s24082582.
- [7] T. T. Oladimeji, P. Kumar, and N. O. Oyie, "Propagation *path loss* prediction modelling in enclosed environments for 5G networks: A review," *Heliyon*, vol. 8, no. 11, p. e11581, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11581.
- [8] S. H. Triwibowo, E. Wahyudi, and S. Larasati, "Perbandingan Penggunaan Teknik Diversity pada Jaringan Gelombang Mikro di Lingkungan Danau," *J. Nas. Tek. Elektro Dan Teknol. Inf. JNTETI*, vol. 8, no. 3, p. 290, Aug. 2019, doi: 10.22146/jnteti.v8i3.525.
- [9] J. Yu, W. Chen, K. Yang, C. Li, F. Li, and Y. Shui, "*Path loss* Channel Model for Inland River Radio Propagation at 1.4 GHz," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2017, pp. 1–15, 2017, doi: 10.1155/2017/5853724.
- [10] E. Eyuboglu, Z. Hasirci Tugcu, K. Kuzulugil, and I. H. Cavdar, "Modified REL-Based Piecewise *Path loss* Modeling Approach for Shore-to-Ship Communication at 5.6 GHz," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 22, p. 10324, Nov. 2024, doi: 10.3390/app142210324.
- [11] B. Yamamoto *et al.*, "Received Signal Strength Indication (RSSI) of 2.4 GHz and 5 GHz Wireless Local Area Network Systems Projected over Land and Sea for Near-Shore Maritime Robot Operations," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 9, p. 290, Aug. 2019, doi: 10.3390/jmse7090290.

- [12] J.-H. Lee, J. Choi, W.-H. Lee, J.-W. Choi, and S.-C. Kim, "Measurement and Analysis on Land-to-Ship Offshore Wireless Channel in 2.4 GHz," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 222–225, Apr. 2017, doi: 10.1109/LWC.2017.2662380.
- [13] K. Udofia, "Determination Of *Path loss Exponent* And Shadowing For Wireless Network In Outdoor Environment," Aug. 2022.
- [14] S. Yi, "An Improved Two-Ray *Path loss* Model for Maritime Channels with Earth Curvature and Rough-Sea Effects," in *2026 9th International Conference on Advanced Electronic Technology, Computers and Software Engineering (AETCSE)*, Xi'an, China: IEEE, Mar. 2026, pp. 415–420. doi: 10.1109/AETCSE69203.2026.11504422.
- [15] J. Ge, T. Li, and T. Geng, "The Wireless Communications for Unmanned Surface Vehicle: An Overview," in *Intelligent Robotics and Applications*, vol. 10984, Z. Chen, A. Mendes, Y. Yan, and S. Chen, Eds., in Lecture Notes in Computer Science, vol. 10984, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 113–119. doi: 10.1007/978-3-319-97586-3_10.
- [16] D. Sousa, D. Hernandez, F. Oliveira, M. Luís, and S. Sargento, "A Platform of Unmanned Surface Vehicle Swarms for Real Time Monitoring in Aquaculture Environments," *Sensors*, vol. 19, no. 21, p. 4695, Oct. 2019, doi: 10.3390/s19214695.
- [17] V. A. M. Jorge *et al.*, "A Survey on Unmanned Surface Vehicles for Disaster Robotics: Main Challenges and Directions," *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 702, Feb. 2019, doi: 10.3390/s19030702.
- [18] E. Pinto, P. Santana, and J. Barata, "On Collaborative Aerial and Surface Robots for Environmental Monitoring of Water Bodies," in *Technological Innovation for the Internet of Things*, vol. 394, L. M. Camarinha-Matos, S. Tomic, and P. Graça, Eds., in IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 394, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 183–191. doi: 10.1007/978-3-642-37291-9_20.
- [19] J.-B. Wang, C. Zeng, C. Ding, H. Zhang, M. Lin, and J. Wang, "Unmanned Surface Vessel Assisted Maritime Wireless Communication Toward 6G: Opportunities and Challenges," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 29, no. 6, pp. 72–79, Dec. 2022, doi: 10.1109/MWC.008.2100554.
- [20] K. Ma, "Implementation And Evaluation Of Communication System For Autonomous Offshore Vehicles".
- [21] A. Kabanov and V. Kramar, "Marine Internet of Things Platforms for Interoperability of Marine Robotic Agents: An Overview of Concepts and Architectures," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 9, p. 1279, Sep. 2022, doi: 10.3390/jmse10091279.
- [22] H. Dinis, J. Rocha, T. Matos, L. M. Gonçalves, and M. Martins, "The Challenge of Long-Distance Over-the-Air Wireless Links in the Ocean: A

- Survey on Water-to-Water and Water-to-Land MIIOT Communication,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 13, p. 6439, Jun. 2022, doi: 10.3390/app12136439.
- [23] N. Mehrnia and M. K. Ozdemir, “Novel maritime channel models for millimeter radiowaves,” in *2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, Split, Croatia: IEEE, Sep. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/SOFTCOM.2016.7772162.
- [24] Z. M. Kidane and W. Dargie, “Cross-technology interference: detection, avoidance, and coexistence mechanisms in the ISM bands,” *CCF Trans. Pervasive Comput. Interact.*, vol. 7, no. 3, pp. 356–375, Sep. 2025, doi: 10.1007/s42486-025-00185-0.
- [25] A. A. Eltholth, “Improved Spectrum Coexistence in 2.4 GHz ISM Band Using Optimized Chaotic Frequency Hopping for Wi-Fi and Bluetooth Signals,” *Sensors*, vol. 23, no. 11, p. 5183, May 2023, doi: 10.3390/s23115183.
- [26] R. E. C. Yunanta and T. Susyanto, “Analysis of WiFi Reliability at 2.4 GHz and 5 GHz Frequencies in the Environment of STMIK Sinar Nusantara Surakarta,” *MALCOM Indones. J. Mach. Learn. Comput. Sci.*, vol. 4, no. 3, pp. 1130–1138, Jul. 2024, doi: 10.57152/malcom.v4i3.1391.
- [27] J. Wang, X. Zhong, and S. Zhou, “Channel Allocation Algorithm Of Wi-Fi,” in *2023 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Honolulu, HI, USA: IEEE, Feb. 2023, pp. 677–682. doi: 10.1109/ICNC57223.2023.10074461.
- [28] TEKON ELECTRONICS, “Line Of Sight - The Real Range Of Wireless Communications,” Tekon Electronics. Accessed: Aug. 02, 2026. [Online]. Available: <https://www.tekonelectronics.com/en/news/tekon-blog/line-of-sight-real-range-wireless-communications/>
- [29] F. Huang, X. Liao, and Y. Bai, “Multipath Channel Model for Radio Propagation over Sea Surface,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 90, no. 1, pp. 245–257, Sep. 2016, doi: 10.1007/s11277-016-3343-4.
- [30] J. D. Parsons and J. D. Parsons, *The mobile radio propagation channel*, 2. ed., Repr. Chichester Weinheim: Wiley, 2001.
- [31] A. Gutiérrez-Gómez *et al.*, “A Propagation Study of LoRa P2P Links for IoT Applications: The Case of Near-Surface Measurements over Semitropical Rivers,” *Sensors*, vol. 21, no. 20, p. 6872, Oct. 2021, doi: 10.3390/s21206872.
- [32] J. Joo, H.-J. Jeong, and D. S. Han, “Verification of Fresnel Zone Clearance for Line-of-sight Determination in 5.9 GHz Vehicle-to-Vehicle Communications,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 101, no. 1, pp. 239–249, Jul. 2018, doi: 10.1007/s11277-018-5685-6.
- [33] F. Huang, X. Liao, and Y. Bai, “Multipath Channel Model for Radio Propagation over Sea Surface,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 90, no. 1, pp. 245–257, Sep. 2016, doi: 10.1007/s11277-016-3343-4.
- [34] A. Coelho, M. Lopes, B. Ferreira, R. Campos, and M. Ricardo, “Experimental evaluation of shore to unmanned surface vehicle Wi-Fi communications,” in

- 2018 *Wireless Days (WD)*, Dubai: IEEE, Apr. 2018, pp. 86–91. doi: 10.1109/WD.2018.8361699.
- [35] I. Shayea *et al.*, “Rain attenuation and worst month statistics verification and modeling for 5G radio link system at 26 GHz in Malaysia,” *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 30, no. 12, p. e3697, Dec. 2019, doi: 10.1002/ett.3697.
- [36] M. G. Gaitan *et al.*, “Wireless radio link design to improve near-shore communication with surface nodes on tidal waters,” in *OCEANS 2021: San Diego – Porto*, San Diego, CA, USA: IEEE, Sep. 2021, pp. 1–8. doi: 10.23919/OCEANS44145.2021.9706046.
- [37] A. Goldsmith, “WIRELESS COMMUNICATIONS”.
- [38] A. F. Molisch, *Wireless communications*, 2nd ed. Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley : IEEE, 2011.
- [39] N. H. Ranchagoda, K. Sithamparanathan, M. Ding, A. Al-Hourani, and K. M. Gomez, “Elevation-angle based two-ray *path loss* model for Air-to-Ground wireless channels,” *Veh. Commun.*, vol. 32, p. 100393, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.vehcom.2021.100393.
- [40] E. Zochmann, K. Guan, and M. Rupp, “Two-ray models in mmWave communications,” in *2017 IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Sapporo: IEEE, Jul. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/SPAWC.2017.8227681.
- [41] H. Mohsin, K. Abdulameer, and Z. N. Khudhair, “Study and performance analysis of received signal strength indicator (RSSI) in wireless communication systems,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 6, pp. 195–200, Jan. 2017, doi: 10.14419/ijet.v6i4.29558.
- [42] D. E. Houssaini, S. Khriji, K. Besbes, and O. Kanoun, “Performance Analysis of Received Signal Strength and Link Quality in Wireless Sensor Networks,” in *2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, Hammamet: IEEE, Mar. 2018, pp. 173–178. doi: 10.1109/SSD.2018.8570634.
- [43] F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, “A Survey of *Indoor* Localization Systems and Technologies,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 21, no. 3, pp. 2568–2599, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2911558.
- [44] S. Sadowski and P. Spachos, “RSSI-Based *Indoor* Localization With the Internet of Things,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30149–30161, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2843325.
- [45] R. M. Sandoval, A.-J. Garcia-Sanchez, and J. Garcia-Haro, “Improving RSSI-Based Path-Loss Models Accuracy for Critical Infrastructures: A Smart Grid Substation Case-Study,” *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 14, no. 5, pp. 2230–2240, May 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2774838.
- [46] R. Gulia, “*Path loss* Model for 2.4GHZ *Indoor* Wireless Networks with Application to Drones”.

- [47] J. Luomala and I. Hakala, "Analysis and evaluation of adaptive RSSI-based ranging in outdoor wireless sensor networks," *Ad Hoc Netw.*, vol. 87, pp. 100–112, May 2019, doi: 10.1016/j.adhoc.2018.10.004.
- [48] S. Kurt and B. Tavli, "Path-Loss Modeling for Wireless Sensor Networks: A review of models and comparative evaluations," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, no. 1, pp. 18–37, Feb. 2017, doi: 10.1109/MAP.2016.2630035.
- [49] Y. A. Zakaria, E. K. I. Hamad, A. S. Abd Elhamid, and K. M. El-Khatib, "Propagation Measurements and Calculation of *Path loss Exponent* for Outdoor Cellular Communication Systems at 3.5 GHz," *Radioelectron. Commun. Syst.*, vol. 64, no. 5, pp. 247–254, May 2021, doi: 10.3103/S0735272721050034.
- [50] D. P. Grabowsky, J. M. Conrad, and A. F. Browne, "Limited Log-*Distance Path loss Model Path loss Exponent* Estimation using Deep Deterministic Policy Gradient," in *SoutheastCon 2021*, Atlanta, GA, USA: IEEE, Mar. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/SoutheastCon45413.2021.9401929.
- [51] T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, M. K. Samimi, and S. Sun, "Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 9, pp. 3029–3056, Sep. 2015, doi: 10.1109/TCOMM.2015.2434384.
- [52] X. Li, H. Song, and C. Liu, "*Path loss* Modeling for Wireless Network Deployment in Water Surface Environments," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 21, no. 6, pp. 1090–1094, Jun. 2022, doi: 10.1109/LAWP.2022.3157834.
- [53] E. Maria, E. Budiman, Havaluddin, and M. Taruk, "Measure *distance* locating nearest public facilities using *Haversine* and *Euclidean* Methods," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1450, no. 1, p. 012080, Feb. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1450/1/012080.
- [54] O. Montenbruck and P. Teunissen, Eds., *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, 1st ed. 2017. in Springer Handbooks. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-42928-1.
- [55] A. Vazquez-Rodas, F. Astudillo-Salinas, C. Sanchez, B. Arpi, and L. I. Minchala, "Experimental evaluation of RSSI-based positioning system with low-cost LoRa devices," *Ad Hoc Netw.*, vol. 105, p. 102168, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.adhoc.2020.102168.
- [56] İ. Musayev and M. Gojamanov, "Geodetic Errors Arising From The Differences Between Sk-42 And Wgs-84 Coordinate Systems When Implemented In Modern Weapons Systems," *Konya J. Eng. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 306–313, Jun. 2021, doi: 10.36306/konjes.788599.
- [57] A. Makar, "Limitations of Multi-GNSS Positioning of USV in Area with High Harbour Infrastructure," *Electronics*, vol. 12, no. 3, p. 697, Jan. 2023, doi: 10.3390/electronics12030697.

- [58] R. Agramanisti Azdy and F. Darnis, "Use of *Haversine* Formula in Finding *Distance* Between Temporary Shelter and Waste End Processing Sites," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1500, no. 1, p. 012104, Apr. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1500/1/012104.
- [59] P. Ranacher, R. BRunauer, W. Trutschnig, S. C. V. der Spek, and S. Reich, "Why GPS makes *distances* bigger than they are," Jul. 14, 2015, *arXiv*: arXiv:1504.04504. doi: 10.48550/arXiv.1504.04504.
- [60] E. Maria, E. Budiman, Haviluddin, and M. Taruk, "Measure *distance* locating nearest public facilities using *Haversine* and *Euclidean* Methods," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1450, no. 1, p. 012080, Feb. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1450/1/012080.
- [61] J. Van Sickle, *Basic GIS coordinates*, Third edition. Boca Raton London New York: CRC Press, 2017.
- [62] M. M. N. Ríos, L. G. G. Albán, V. Defaz, L. O. J. Alarcón, and P. Samaniego, "Application Of The Equation Of *Distance* Between Two Points Focused On The Closure Of Polygons In Land Navigation, In The Career Of Technology In Military Sciences, Dual Modality," *Int. J. Appl. Math.*, vol. 38, no. 7, 2025.
- [63] K. Krivoruchko and A. Gribov, "*Distance* metrics for data interpolation over large areas on Earth's surface," *Spat. Stat.*, vol. 35, p. 100396, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.spasta.2019.100396.
- [64] N. Faruk *et al.*, "Large-scale radio propagation *path loss* measurements and predictions in the VHF and UHF bands," *Heliyon*, vol. 7, no. 6, p. e07298, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07298.
- [65] T. Jawhly and R. C. Tiwari, "*Path loss* modeling: A GIS-based approach," Mar. 17, 2023. doi: 10.36227/techrxiv.22211029.v1.
- [66] O. G. Esenbuga, "Comparison Of Principal Geodetic *Distance* Calculation Methods For Automated Province Assignment In Turkey," presented at the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2016, Jun. 2016. doi: 10.5593/SGEM2016/B22/S09.019.
- [67] S. Bisnath, "Relative Positioning and Real-Time Kinematic (RTK)," in *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century*, 1st ed., Y. T. J. Morton, F. Diggelen, J. J. Spilker, B. W. Parkinson, S. Lo, and G. Gao, Eds., Wiley, 2020, pp. 481–502. doi: 10.1002/9781119458449.ch19.
- [68] A. Abdelmoaty, G. Dahman, G. Poitau, and F. Gagnon, "Assessing the Range of Radio Maritime Links in Different Waterbodies: Effect of Antenna height and Band Diversities," in *2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall)*, Norman, OK, USA: IEEE, Sep. 2021, pp. 1–7. doi: 10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625350.
- [69] A. A. Olsen, *Introduction to Celestial Navigation*, 1st ed. in Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping Series, no. v. 15. Cham: Springer, 2024.

- [70] I. E. Elmutasim, "Refining the Dual-Slope *Path loss* Model with a *Distance-Adaptive Exponent* and *Multi-Breakpoint Calibration*," *Int. J. Comput. Methods Exp. Meas.*, vol. 13, no. 2, pp. 251–257, Jun. 2025, doi: 10.18280/ijcmem.130204.
- [71] J. Wang, Y. Hao, and C. Yang, "The Current Progress and Future Prospects of *Path loss* Model for Terrestrial Radio Propagation," *Electronics*, vol. 12, no. 24, p. 4959, Dec. 2023, doi: 10.3390/electronics12244959.
- [72] Y. O. Imam-Fulani *et al.*, "A Comparative Study of *Path loss* Models for 5G Networks Across 28, 36, and 48 GHz in Urban Environments," in *Connected Objects, Artificial Intelligence, Telecommunications and Electronics Engineering*, vol. 1584, Y. Mejdoub, A. Elamri, and M. Kardouchi, Eds., in *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 1584. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2026, pp. 916–927. doi:10.1007/978-3-032-01536-5_137.



LAMPIRAN

Lampiran A

Tabel A. 1 Data Hasil *Distance Binning*

Bin	Rentang Jarak (m)	Jumlah Sampel	RSSI Min (dbm)	RSSI Maks (dbm)	Mean RSSI (dbm)	Mean Jarak (m)
1	1.172 - 2.172	69	-62	-50	-53.6522	1.40142
2	2.172 - 3.172	117	-66	-45	-56.0171	2.817667
3	3.172 - 4.172	150	-82	-43	-59.6133	3.4335
4	4.172 - 5.172	28	-65	-43	-51.2143	4.722
5	5.172 - 6.172	22	-59	-42	-48.7273	5.575636
6	6.172 - 7.172	18	-55	-41	-47.8333	6.659222
7	7.172 - 8.172	14	-56	-43	-48.2143	7.6135
8	8.172 - 9.172	16	-55	-41	-47.6875	8.595375
9	9.172 - 10.172	17	-56	-42	-47.6471	9.699235
10	10.172 - 11.172	15	-57	-43	-47.8	10.68653
11	11.172 - 12.172	17	-57	-46	-49.0588	11.61353
12	12.172 - 13.172	18	-59	-45	-50.3333	12.63772
13	13.172 - 14.172	15	-60	-45	-50.0667	13.71733
14	14.172 - 15.172	12	-59	-47	-51.8333	14.655
15	15.172 - 16.172	15	-58	-46	-50.1333	15.6302
16	16.172 - 17.172	15	-59	-46	-51	16.7052
17	17.172 - 18.172	14	-58	-46	-51.1429	17.74193
18	18.172 - 19.172	13	-60	-47	-52.0769	18.69392
19	19.172 - 20.172	13	-59	-47	-51.5385	19.56731
20	20.172 - 21.172	16	-60	-47	-52.1875	20.60481
21	21.172 - 22.172	15	-59	-48	-52.6	21.70487
22	22.172 - 23.172	14	-60	-50	-54.1429	22.7265
23	23.172 - 24.172	14	-61	-50	-53.6429	23.73764
24	24.172 - 25.172	13	-61	-50	-54.3846	24.66715
25	25.172 - 26.172	16	-66	-51	-55.5	25.70106
26	26.172 - 27.172	13	-63	-51	-55.2308	26.72454
27	27.172 - 28.172	14	-61	-52	-55.7143	27.66321
28	28.172 - 29.172	16	-60	-52	-55.6875	28.697
29	29.172 - 30.172	13	-61	-51	-55.2308	29.70292
30	30.172 - 31.172	16	-61	-52	-56.25	30.70319
31	31.172 - 32.172	14	-61	-51	-56.4286	31.75343
32	32.172 - 33.172	13	-62	-52	-56.1538	32.70208
33	33.172 - 34.172	14	-62	-51	-56.2857	33.66064
34	34.172 - 35.172	14	-61	-51	-56.5714	34.65829

35	35.172 - 36.172	15	-63	-52	-56.9333	35.68487
36	36.172 - 37.172	14	-62	-52	-57.1429	36.71543
37	37.172 - 38.172	14	-63	-54	-57.7857	37.67564
38	38.172 - 39.172	14	-64	-53	-57.6429	38.65679
39	39.172 - 40.172	13	-63	-56	-58.6154	39.61469
40	40.172 - 41.172	16	-63	-55	-58.5	40.66294
41	41.172 - 42.172	12	-64	-55	-58.4167	41.72767
42	42.172 - 43.172	13	-63	-55	-59.6154	42.60192
43	43.172 - 44.172	16	-64	-55	-59.375	43.66969
44	44.172 - 45.172	13	-64	-55	-59.3077	44.70223
45	45.172 - 46.172	18	-65	-56	-60.5	45.72083
46	46.172 - 47.172	16	-64	-56	-60.5625	46.68188
47	47.172 - 48.172	14	-65	-55	-60.8571	47.68729
48	48.172 - 49.172	15	-65	-56	-60.8	48.68687
49	49.172 - 50.172	14	-66	-56	-61.0714	49.67307
50	50.172 - 51.172	15	-66	-55	-60.6	50.67787
51	51.172 - 52.172	13	-64	-55	-60.5385	51.68285
52	52.172 - 53.172	13	-66	-56	-60.8462	52.60623
53	53.172 - 54.172	15	-66	-58	-61.8667	53.6006
54	54.172 - 55.172	15	-66	-57	-61.7333	54.65533
55	55.172 - 56.172	14	-67	-57	-62.1429	55.72114
56	56.172 - 57.172	14	-65	-57	-61.7143	56.68943
57	57.172 - 58.172	15	-67	-57	-62.2	57.6956
58	58.172 - 59.172	14	-67	-57	-62.6429	58.67886
59	59.172 - 60.172	16	-67	-58	-62.8125	59.69156
60	60.172 - 61.172	14	-67	-59	-63.3571	60.73286
61	61.172 - 62.172	39	-71	-59	-67.0256	61.90523
62	62.172 - 63.172	34	-72	-60	-67.5294	62.59653
63	63.172 - 64.172	27	-72	-59	-66.963	63.70311
64	64.172 - 65.172	72	-72	-61	-67.6389	64.70024
65	65.172 - 66.172	64	-72	-61	-66.7188	65.64913
66	66.172 - 67.172	122	-75	-60	-70.1885	66.84325
67	67.172 - 68.172	61	-76	-60	-68.6393	67.76946
68	68.172 - 69.172	56	-77	-61	-68.75	68.5242
69	69.172 - 70.172	59	-76	-59	-63.5593	69.7648
70	70.172 - 71.172	30	-75	-59	-64.1333	70.63013
71	71.172 - 72.172	45	-77	-60	-65.8667	71.71011
72	72.172 - 73.172	41	-76	-59	-64.3902	72.69693
73	73.172 - 74.172	96	-75	-59	-63.4167	73.68158
74	74.172 - 75.172	64	-75	-61	-66.6406	74.48013
75	75.172 - 76.172	16	-74	-63	-67.3125	75.6325
76	76.172 - 77.172	5	-75	-73	-73.8	76.7586
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



Lampiran B

Tabel B. 1 Data Hasil Perhitungan *Path loss*

Mean RSSI (dBm)	<i>Mean</i> Jarak (m)	<i>Path loss</i> (dB)
-53.6522	1.40142	80.65217
-56.0171	2.817667	83.01709
-59.6133	3.4335	86.61333
-51.2143	4.722	78.21429
-48.7273	5.575636	75.72727
-47.8333	6.659222	74.83333
-48.2143	7.6135	75.21429
-47.6875	8.595375	74.6875
-47.6471	9.699235	74.64706
-47.8	10.68653	74.8
-49.0588	11.61353	76.05882
-50.3333	12.63772	77.33333
-50.0667	13.71733	77.06667
-51.8333	14.655	78.83333
-50.1333	15.6302	77.13333
-51	16.7052	78
-51.1429	17.74193	78.14286
-52.0769	18.69392	79.07692
-51.5385	19.56731	78.53846
-52.1875	20.60481	79.1875
-52.6	21.70487	79.6
-54.1429	22.7265	81.14286
-53.6429	23.73764	80.64286
-54.3846	24.66715	81.38462
-55.5	25.70106	82.5
-55.2308	26.72454	82.23077
-55.7143	27.66321	82.71429
-55.6875	28.697	82.6875
-55.2308	29.70292	82.23077
-56.25	30.70319	83.25
-56.4286	31.75343	83.42857
-56.1538	32.70208	83.15385
-56.2857	33.66064	83.28571
-56.5714	34.65829	83.57143
-56.9333	35.68487	83.93333
-57.1429	36.71543	84.14286
-57.7857	37.67564	84.78571
-57.6429	38.65679	84.64286

-58.6154	39.61469	85.61538
-58.5	40.66294	85.5
-58.4167	41.72767	85.41667
-59.6154	42.60192	86.61538
-59.375	43.66969	86.375
-59.3077	44.70223	86.30769
-60.5	45.72083	87.5
-60.5625	46.68188	87.5625
-60.8571	47.68729	87.85714
-60.8	48.68687	87.8
-61.0714	49.67307	88.07143
-60.6	50.67787	87.6
-60.5385	51.68285	87.53846
-60.8462	52.60623	87.84615
-61.8667	53.6006	88.86667
-61.7333	54.65533	88.73333
-62.1429	55.72114	89.14286
-61.7143	56.68943	88.71429
-62.2	57.6956	89.2
-62.6429	58.67886	89.64286
-62.8125	59.69156	89.8125
-63.3571	60.73286	90.35714
-67.0256	61.90523	94.02564
-67.5294	62.59653	94.52941
-66.963	63.70311	93.96296
-67.6389	64.70024	94.63889
-66.7188	65.64913	93.71875
-70.1885	66.84325	97.18852
-68.6393	67.76946	95.63934
-68.75	68.5242	95.75
-63.5593	69.7648	90.55932
-64.1333	70.63013	91.13333
-65.8667	71.71011	92.86667
-64.3902	72.69693	91.39024
-63.4167	73.68158	90.41667
-66.6406	74.48013	93.64063
-67.3125	75.6325	94.3125
-73.8	76.7586	100.8
-72.8125	77.79913	99.8125
-73.6	78.604	100.6
-67.6571	80.01034	94.65714
-69.0283	80.70084	96.0283
-66	81.236	93

Lampiran C

Tabel C. 1 Data Hasil Perhitungan Teoritis Model Propagasi

Jarak (m)	FSPL Murni	<i>Exact Two-Ray</i> Murni
1.40142	-1.02069	-8.54409
2.817667	-7.08711	-8.87615
3.4335	-8.80406	-4.74836
4.722	-11.5718	-11.3974
5.575636	-13.0152	-7.7083
6.659222	-14.5578	-21.2704
7.6135	-15.721	-16.1301
8.595375	-16.7746	-11.834
9.699235	-17.8241	-12.0613
10.68653	-18.6661	-14.1038
11.61353	-19.3886	-17.1802
12.63772	-20.1227	-22.2105
13.71733	-20.8347	-32.231
14.655	-21.409	-38.6722
15.6302	-21.9686	-27.9026
16.7052	-22.5464	-23.9992
17.74193	-23.0693	-22.1225
18.69392	-23.5233	-21.1323
19.56731	-23.9199	-20.5807
20.60481	-24.3687	-20.2101
21.70487	-24.8205	-20.0432
22.7265	-25.22	-20.0307
23.73764	-25.5981	-20.1138
24.66715	-25.9317	-20.252
25.70106	-26.2883	-20.4574
26.72454	-26.6275	-20.7009
27.66321	-26.9274	-20.9508
28.697	-27.246	-21.2479
29.70292	-27.5453	-21.5536
30.70319	-27.833	-21.8695
31.75343	-28.1251	-22.2104
32.70208	-28.3808	-22.5239
33.66064	-28.6318	-22.8442
34.65829	-28.8855	-23.1799
35.68487	-29.139	-23.5264
36.71543	-29.3863	-23.8742
37.67564	-29.6105	-24.1974
38.65679	-29.8338	-24.5262
39.61469	-30.0464	-24.8453

40.66294	-30.2733	-25.1919
41.72767	-30.4978	-25.5408
42.60192	-30.6779	-25.8246
43.66969	-30.8929	-26.1678
44.70223	-31.0959	-26.496
45.72083	-31.2916	-26.816
46.68188	-31.4723	-27.1144
47.68729	-31.6574	-27.4229
48.68687	-31.8376	-27.7259
49.67307	-32.0117	-28.0211
50.67787	-32.1857	-28.3182
51.68285	-32.3562	-28.6115
52.60623	-32.5101	-28.8777
53.6006	-32.6727	-29.1608
54.65533	-32.842	-29.4571
55.72114	-33.0097	-29.7525
56.68943	-33.1594	-30.0173
57.6956	-33.3122	-30.289
58.67886	-33.459	-30.5511
59.69156	-33.6076	-30.8176
60.73286	-33.7578	-31.088
61.90523	-33.9239	-31.3883
62.59653	-34.0203	-31.5632
63.70311	-34.1725	-31.8401
64.70024	-34.3074	-32.0863
65.64913	-34.4339	-32.3178
66.84325	-34.5905	-32.6053
67.76946	-34.71	-32.8255
68.5242	-34.8062	-33.003
69.7648	-34.962	-33.2913
70.63013	-35.0691	-33.4899
71.71011	-35.2009	-33.7349
72.69693	-35.3196	-33.956
73.68158	-35.4365	-34.1742
74.48013	-35.5301	-34.3492
75.6325	-35.6635	-34.599
76.7586	-35.7919	-34.84
77.79913	-35.9088	-35.06
78.604	-35.9982	-35.2283
80.01034	-36.1522	-35.519
80.70084	-36.2269	-35.66
81.236	-36.2843	-35.7686

Tabel C. 2 Data Hasil Perhitungan Kalibrasi Dan Eror Model Propagasi

Jarak (m)	RSSI Empiris	FSPL Kalibrasi	<i>Exact</i> <i>Two-Ray</i> Kalibrasi	Error FSPL	Error Two-Ray
1.40142	-53.6522	-53.6522	-53.6522	0	0
2.817667	-56.0171	-59.7186	-53.9842	3.7015	-2.0329
3.4335	-59.6133	-61.4355	-49.8564	1.8222	-9.7569
4.722	-51.2143	-64.2033	-56.5055	12.989	5.2912
5.575636	-48.7273	-65.6467	-52.8164	16.9194	4.0891
6.659222	-47.8333	-67.1893	-66.3785	19.3559	18.5452
7.6135	-48.2143	-68.3525	-61.2382	20.1382	13.0239
8.595375	-47.6875	-69.4061	-56.9421	21.7186	9.2546
9.699235	-47.6471	-70.4556	-57.1694	22.8085	9.5223
10.68653	-47.8	-71.2975	-59.2119	23.4975	11.4119
11.61353	-49.0588	-72.0201	-62.2883	22.9613	13.2295
12.63772	-50.3333	-72.7542	-67.3186	22.4208	16.9853
13.71733	-50.0667	-73.4662	-77.3391	23.3995	27.2725
14.655	-51.8333	-74.0405	-83.7802	22.2072	31.9469
15.6302	-50.1333	-74.6001	-73.0107	24.4668	22.8774
16.7052	-51	-75.1778	-69.1073	24.1778	18.1073
17.74193	-51.1429	-75.7008	-67.2306	24.558	16.0877
18.69392	-52.0769	-76.1548	-66.2404	24.0779	14.1635
19.56731	-51.5385	-76.5514	-65.6888	25.013	14.1503
20.60481	-52.1875	-77.0002	-65.3182	24.8127	13.1307
21.70487	-52.6	-77.4519	-65.1513	24.8519	12.5513
22.7265	-54.1429	-77.8515	-65.1388	23.7086	10.9959
23.73764	-53.6429	-78.2296	-65.2219	24.5867	11.5791
24.66715	-54.3846	-78.5632	-65.3601	24.1786	10.9755
25.70106	-55.5	-78.9198	-65.5655	23.4198	10.0655
26.72454	-55.2308	-79.259	-65.809	24.0282	10.5782
27.66321	-55.7143	-79.5589	-66.0589	23.8446	10.3446
28.697	-55.6875	-79.8775	-66.356	24.19	10.6685
29.70292	-55.2308	-80.1768	-66.6617	24.946	11.431
30.70319	-56.25	-80.4645	-66.9776	24.2145	10.7276
31.75343	-56.4286	-80.7566	-67.3185	24.328	10.8899
32.70208	-56.1538	-81.0123	-67.632	24.8585	11.4781
33.66064	-56.2857	-81.2633	-67.9523	24.9775	11.6666
34.65829	-56.5714	-81.5169	-68.288	24.9455	11.7166
35.68487	-56.9333	-81.7705	-68.6345	24.8372	11.7012
36.71543	-57.1429	-82.0178	-68.9823	24.8749	11.8394
37.67564	-57.7857	-82.242	-69.3055	24.4563	11.5198
38.65679	-57.6429	-82.4653	-69.6343	24.8225	11.9915
39.61469	-58.6154	-82.6779	-69.9534	24.0625	11.338
40.66294	-58.5	-82.9048	-70.3	24.4048	11.8

41.72767	-58.4167	-83.1293	-70.6489	24.7126	12.2322
42.60192	-59.6154	-83.3094	-70.9327	23.694	11.3173
43.66969	-59.375	-83.5244	-71.2759	24.1494	11.9009
44.70223	-59.3077	-83.7274	-71.6041	24.4197	12.2964
45.72083	-60.5	-83.9231	-71.924	23.4231	11.424
46.68188	-60.5625	-84.1038	-72.2225	23.5413	11.66
47.68729	-60.8571	-84.2889	-72.531	23.4317	11.6739
48.68687	-60.8	-84.469	-72.834	23.669	12.034
49.67307	-61.0714	-84.6432	-73.1292	23.5718	12.0578
50.67787	-60.6	-84.8172	-73.4263	24.2172	12.8263
51.68285	-60.5385	-84.9877	-73.7196	24.4493	13.1811
52.60623	-60.8462	-85.1415	-73.9857	24.2954	13.1396
53.6006	-61.8667	-85.3042	-74.2689	23.4375	12.4022
54.65533	-61.7333	-85.4735	-74.5652	23.7401	12.8319
55.72114	-62.1429	-85.6412	-74.8605	23.4983	12.7177
56.68943	-61.7143	-85.7908	-75.1254	24.0766	13.4111
57.6956	-62.2	-85.9437	-75.397	23.7437	13.197
58.67886	-62.6429	-86.0904	-75.6591	23.4476	13.0163
59.69156	-62.8125	-86.2391	-75.9257	23.4266	13.1132
60.73286	-63.3571	-86.3893	-76.1961	23.0321	12.839
61.90523	-67.0256	-86.5554	-76.4963	19.5297	9.4707
62.59653	-67.5294	-86.6518	-76.6713	19.1224	9.1419
63.70311	-66.963	-86.804	-76.9482	19.8411	9.9852
64.70024	-67.6389	-86.9389	-77.1944	19.3	9.5555
65.64913	-66.7188	-87.0654	-77.4259	20.3466	10.7072
66.84325	-70.1885	-87.222	-77.7134	17.0334	7.5249
67.76946	-68.6393	-87.3415	-77.9335	18.7021	9.2942
68.5242	-68.75	-87.4377	-78.1111	18.6877	9.3611
69.7648	-63.5593	-87.5935	-78.3994	24.0342	14.8401
70.63013	-64.1333	-87.7006	-78.598	23.5673	14.4647
71.71011	-65.8667	-87.8324	-78.843	21.9657	12.9763
72.69693	-64.3902	-87.9511	-79.0641	23.5609	14.6739
73.68158	-63.4167	-88.068	-79.2822	24.6513	15.8656
74.48013	-66.6406	-88.1616	-79.4573	21.521	12.8167
75.6325	-67.3125	-88.295	-79.7071	20.9825	12.3946
76.7586	-73.8	-88.4233	-79.9481	14.6233	6.1481
77.79913	-72.8125	-88.5403	-80.168	15.7278	7.3555
78.604	-73.6	-88.6297	-80.3364	15.0297	6.7364
80.01034	-67.6571	-88.7837	-80.627	21.1266	12.9699
80.70084	-69.0283	-88.8584	-80.7681	19.8301	11.7398
81.236	-66	-88.9158	-80.8767	22.9158	14.8767

Lampiran D

Kode Pembacaan RSSI

```
import rclpy
from rclpy.node import Node
from std_msgs.msg import Int32
import routeros_api
import re

class RssiNode(Node):
    def __init__(self):
        super().__init__('rssi_node')

        # 1. Deklarasi Publisher sesuai proposal (Topik: /usv/network/rssi)
        self.publisher_ = self.create_publisher(Int32, '/usv/network/rssi', 10)

        # 2. Timer untuk eksekusi looping setiap 0.2 detik (5 Hz)
        timer_period = 0.2
        self.timer = self.create_timer(timer_period, self.timer_callback)

        # Kredensial MikroTik Groove Rx di USV
        self.router_ip = '192.168.1.103' # Sesuaikan dengan IP MikroTik Anda
        self.username = 'admin'
        self.password = " " # Sesuaikan password

        # Inisiasi koneksi API
        self.api_connection = None
        self.connect_to_mikrotik()

    def connect_to_mikrotik(self):
        try:
            self.get_logger().info('Mencoba terhubung ke MikroTik...')
            connection = routeros_api.RouterOsApiPool(
                self.router_ip,
                username=self.username,
                password=self.password,
                plaintext_login=True
            )
            self.api_connection = connection.get_api()
            self.get_logger().info('Koneksi TCP RouterOS API Berhasil!')
        except Exception as e:
            self.get_logger().error(f'Koneksi gagal: {e}')
            self.api_connection = None
```

```

def timer_callback(self):
    if not self.api_connection:
        self.connect_to_mikrotik()
        return

    try:
        # 3. Kirim Request API ke /interface/wireless/registration-table
        reg_table =
self.api_connection.get_resource('/interface/wireless/registration-table')
        client_data = reg_table.get()

        if client_data:
            # Ambil data client pertama (asumsi hanya terhubung ke TP-Link Tx)
            raw_signal = client_data[0].get('signal-strength', "")

            # 4. Pembersihan Karakter dengan Regex (Ekstraksi angka murni)
            # Contoh raw_signal: "-65dBm@6Mbps" -> match akan mengambil
"-65"
            match = re.search(r'[-+]?[0-9]+', raw_signal)

            if match:
                # 5. Konversi String ke Integer
                rssi_value = int(match.group())

                # 6. Publikasi RSSI ke Topik ROS 2
                msg = Int32()
                msg.data = rssi_value
                self.publisher_.publish(msg)

                self.get_logger().debug(f'Publish RSSI: {rssi_value} dBm')
            else:
                self.get_logger().warning('Format signal-strength tidak dikenali.')
        else:
            self.get_logger().warning('Tidak ada perangkat terhubung di
registration-table.')

    except Exception as e:
        self.get_logger().error(f'Terjadi kesalahan saat membaca API: {e}')
        self.api_connection = None # Putuskan koneksi agar mencoba re-
connect di siklus berikutnya

```

```

def main(args=None):
    rclpy.init(args=args)
    rssi_node = RssiNode()

    try:
        rclpy.spin(rssi_node)
    except KeyboardInterrupt:
        pass
    finally:
        if rssi_node.api_connection:
            rssi_node.api_connection.close()
        rssi_node.destroy_node()
        rclpy.shutdown()

if __name__ == '__main__':
    main()

```

Kode Pembacaan Jarak

```

from rclpy.qos import qos_profile_sensor_data
import rclpy
from rclpy.node import Node
from sensor_msgs.msg import NavSatFix
from std_msgs.msg import Float64
import math

class DistanceNode(Node):
    def __init__(self):
        super().__init__('distance_node')

        # 1. Deklarasi Parameter Koordinat Stasiun Darat (Titik Nol Tx)
        self.declare_parameter('tx_lat', -0.2921816)
        self.declare_parameter('tx_lon', 100.1494163)

        # 2. Deklarasi Parameter Nilai Koreksi (Kalibrasi Error dalam meter)
        # Nilai default 0.0 (tanpa koreksi). Bisa diisi nilai minus atau plus nanti.
        self.declare_parameter('distance_offset', 0.0)

        self.subscription = self.create_subscription(
            NavSatFix,
            '/mavros/global_position/global',
            self.gps_callback,
            qos_profile_sensor_data

```

```

    )
    self.publisher_ = self.create_publisher(Float64, '/usv/network/distance',
10)
    self.R = 6371000.0 # Jari-jari Bumi

    self.get_logger().info('Node Jarak Haversine Aktif. Menunggu fiksasi
GPS...')

def gps_callback(self, msg):
    if msg.status.status < 0:
        self.get_logger().warning('Menunggu fiksasi satelit GPS (3D Fix)...')
        return

    lat1 = self.get_parameter('tx_lat').get_parameter_value().double_value
    lon1 = self.get_parameter('tx_lon').get_parameter_value().double_value

    # Ambil nilai koreksi dari parameter
    offset =
self.get_parameter('distance_offset').get_parameter_value().double_value

    lat2 = msg.latitude
    lon2 = msg.longitude

    # Eksekusi perhitungan Haversine murni
    raw_distance = self.calculate_Haversine(lat1, lon1, lat2, lon2)

    # Terapkan Nilai Koreksi/Kalibrasi
    calibrated_distance = raw_distance + offset

    # Cegah nilai jarak menjadi minus jika terjadi anomali GPS di titik nol
    if calibrated_distance < 0:
        calibrated_distance = 0.0

    dist_msg = Float64()
    dist_msg.data = calibrated_distance
    self.publisher_.publish(dist_msg)

    self.get_logger().debug(f'Jarak Kalibrasi: {calibrated_distance:.2f} m
(Raw: {raw_distance:.2f} m, Offset: {offset} m)')

def calculate_Haversine(self, lat1, lon1, lat2, lon2):
    phi1 = math.radians(lat1)

```

```

phi2 = math.radians(lat2)
delta_phi = math.radians(lat2 - lat1)
delta_lambda = math.radians(lon2 - lon1)

a = math.sin(delta_phi / 2.0) ** 2 + \
    math.cos(phi1) * math.cos(phi2) * \
    math.sin(delta_lambda / 2.0) ** 2
c = 2 * math.atan2(math.sqrt(a), math.sqrt(1 - a))
return self.R * c

def main(args=None):
    rclpy.init(args=args)
    distance_node = DistanceNode()
    try:
        rclpy.spin(distance_node)
    except KeyboardInterrupt:
        pass
    finally:
        distance_node.destroy_node()
        rclpy.shutdown()

if __name__ == '__main__':
    main()

```

Kode Logger Sinkronisasi Data

```

import rclpy
from rclpy.node import Node
from sensor_msgs.msg import NavSatFix
from std_msgs.msg import Int32, Float64
from rclpy.qos import qos_profile_sensor_data
import csv
import os
from datetime import datetime

class DataLoggerNode(Node):
    def __init__(self):
        super().__init__('data_logger_node')

        # 1. Deklarasi Parameter Nama File
        self.declare_parameter('filename', "")
        filename_param =
        self.get_parameter('filename').get_parameter_value().string_value

```

```

# Jika nama file tidak diinput, gunakan timestamp otomatis
if not filename_param:
    now = datetime.now().strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
    filename_param = f"data_maninjau_{now}.csv"

self.file_path =
os.path.expanduser(f'~/usv_ws/data_log/{filename_param}')

# Variabel Penampung Data Sementara (Pengganti message_filters)
self.latest_dist = None
self.latest_rssi = None

# 2. Inisialisasi File CSV dan Header
self.init_csv()

# 3. Setup Subscriber Reguler (Bukan message_filters)
# WAJIB gunakan qos_profile_sensor_data untuk GPS agar tidak diblokir
MAVROS
self.gps_sub = self.create_subscription(NavSatFix,
'/mavros/global_position/global', self.gps_callback, qos_profile_sensor_data)
self.dist_sub = self.create_subscription(Float64, '/usv/network/distance',
self.dist_callback, 10)
self.rssi_sub = self.create_subscription(Int32, '/usv/network/rssi',
self.rssi_callback, 10)

self.get_logger().info(f'Data Logger Aktif. Menyimpan ke:
{self.file_path}')

def init_csv(self):
    # Membuat header file sesuai kebutuhan skripsi Fadhel
    header = [
        'Timestamp',
        'Latitude',
        'Longitude',
        'Distance_m',
        'RSSI_dBm',

    ]

    # Pastikan direktori ada
    os.makedirs(os.path.dirname(self.file_path), exist_ok=True)

```

```

file_exists = os.path.isfile(self.file_path)

with open(self.file_path, mode='a', newline='') as f:
    writer = csv.writer(f)
    if not file_exists:
        # Tambahkan identitas di baris pertama file untuk validasi penguji
        writer.writerow(['# Peneliti: Fadhel (NIM: 2210951028)'])
        writer.writerow(['# Lokasi: Danau Maninjau - Karakteristik Two-Ray
Path Loss'])
        writer.writerow(header)

def dist_callback(self, msg):
    self.latest_dist = msg.data

def rssi_callback(self, msg):
    self.latest_rssi = msg.data

def gps_callback(self, gps_msg):
    # 4. Proses Sinkronisasi & Perekaman
    # Hanya rekam jika Jarak dan RSSI sudah pernah masuk minimal 1 kali
    if self.latest_dist is not None and self.latest_rssi is not None:

        ts_now = datetime.now().strftime("%H:%M:%S.%f")[:-3]

        data_row = [
            ts_now,
            gps_msg.latitude,
            gps_msg.longitude,
            round(self.latest_dist, 3),
            self.latest_rssi,
            gps_msg.status.status
        ]

    # 5. Automatis Simpan ke CSV
    try:
        with open(self.file_path, mode='a', newline='') as f:
            writer = csv.writer(f)
            writer.writerow(data_row)

        # Tampilkan log setiap data berhasil masuk
        self.get_logger().info(f'Terekam: Dist={self.latest_dist:.2f}m,
RSSI={self.latest_rssi}dBm, Sat={gps_msg.status.status}')

```

```

except Exception as e:
    self.get_logger().error(f'Gagal menyimpan data: {e}')

def main(args=None):
    rclpy.init(args=args)
    node = DataLoggerNode()
    try:
        rclpy.spin(node)
    except KeyboardInterrupt:
        node.get_logger().info("\nPerekaman dihentikan oleh operator. File CSV aman.")
    finally:
        node.destroy_node()
        rclpy.shutdown()

if __name__ == '__main__':
    main()

```

