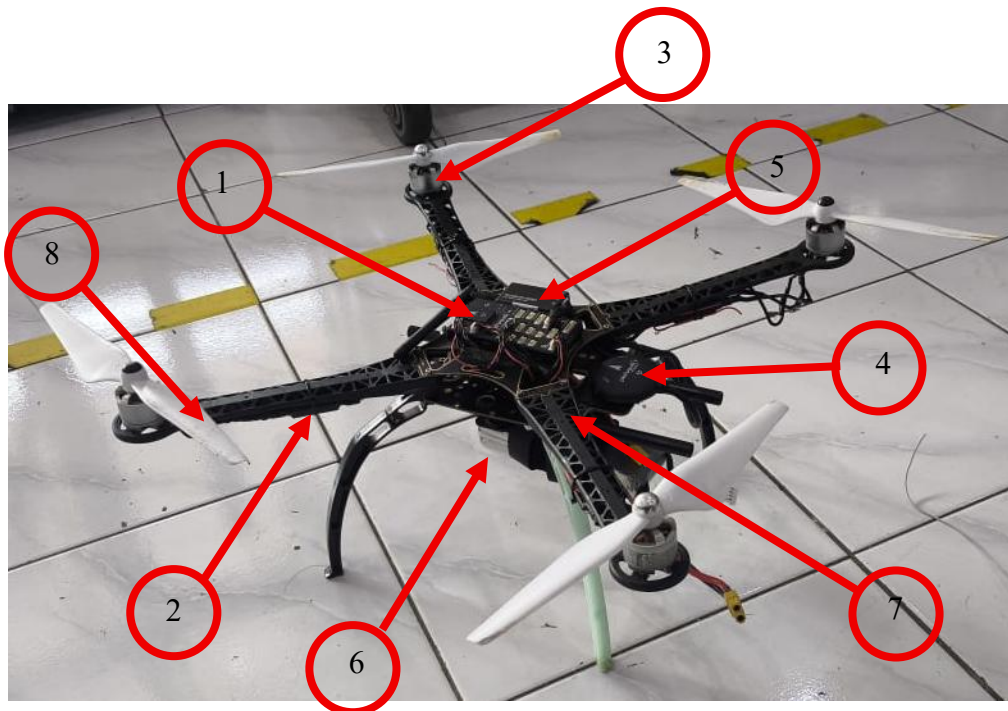


## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### IV.1 Hasil Implementasi

#### 1. Hasil Rancangan Alat

Rancangan alat yang sebelumnya berupa desain dan *wiring diagram* diimplementasikan seperti pada Gambar IV.1.



Gambar IV. 1 Unit *Drone*

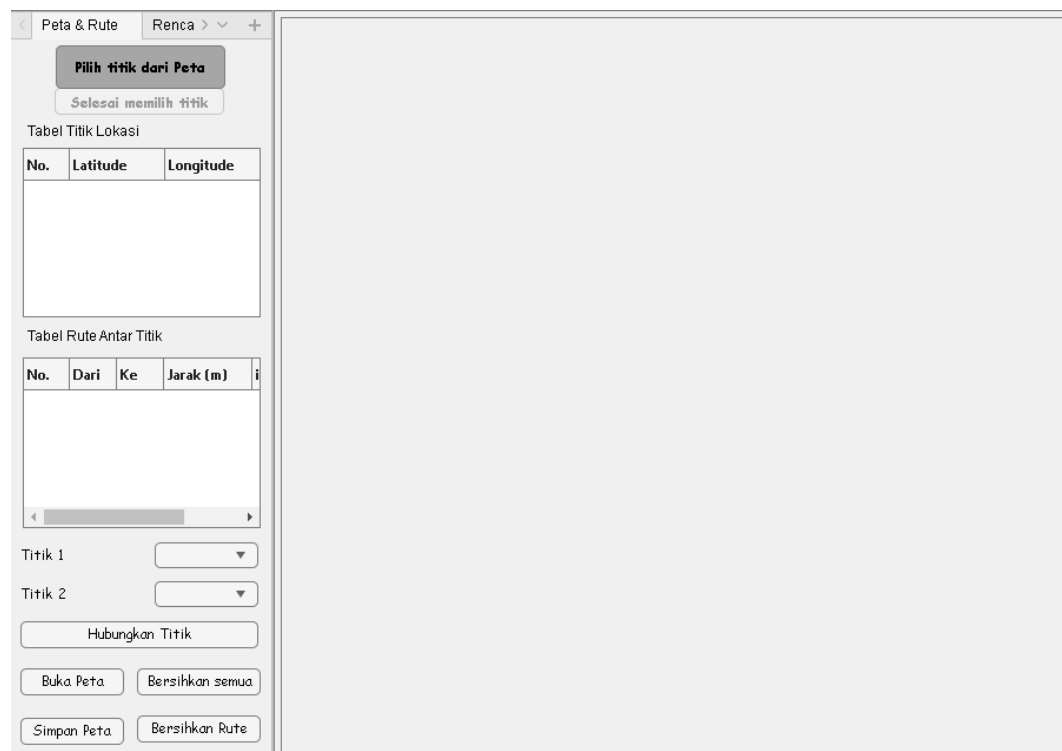
Tabel IV. 2 Daftar komponen yang digunakan

No.	Nama Komponen	Spesifikasi
1	Pengendali	Pixhawk 4
2	<i>Electric Speed Control</i>	SIMONK 30A
3	<i>Brushless Motor</i>	Pa059 Sunshine
4	GPS	Pixhawk 4 GPS Module
5	<i>Telemetry Radio</i>	SiK Holybro Telemetry Radio V3
6	<i>Li-Po Battery</i>	Gold Racing 3S 4000 mAh
7	<i>Frame</i>	S500 <i>Generic Drone Frame</i>

8	Propeller	DJI Phantom 3 Propeller
---	-----------	-------------------------

Rancangan alat secara keseluruhan telah berhasil diimplementasikan menjadi satu unit *quadcopter* fungsional yang siap uji Gambar IV.1, dibangun menggunakan rangka S500 *Generic Drone Frame*. Sistem pendorongnya terdiri dari empat motor *Brushless Motor* Pa059 Sunshine yang diatur oleh ESC SIMONK 30A dan memutar DJI Phantom 3 Propeller. Inti dari sistem kendali elektronik adalah *flight controller* Pixhawk 4 yang dilengkapi modul GPS Pixhawk 4 untuk penentuan posisi, sementara komunikasi nirkabel menggunakan SiK Holybro Telemetry Radio V3. Seluruh sistem ini ditenagai oleh baterai Li-Po Gold Racing 3S 4000 mAh, dengan rincian spesifikasi lengkap komponen yang dirangkum pada Tabel IV.1.

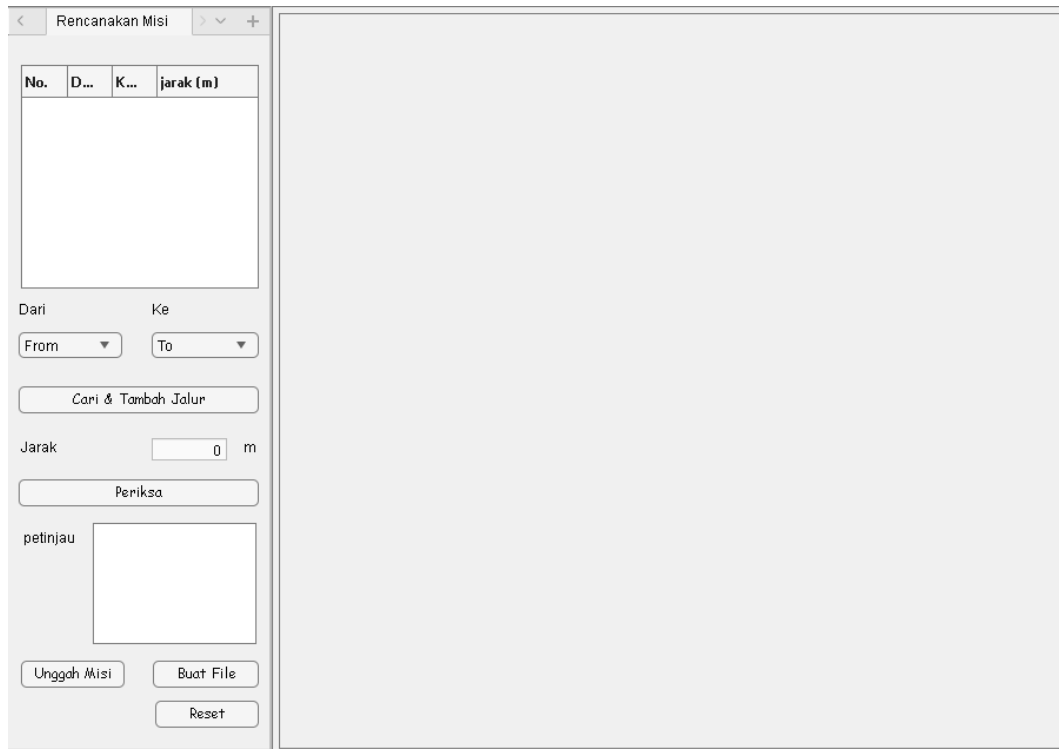
## 2. Hasil Rancangan Informatik



Gambar IV. 2 Aplikasi *Generate Map* Halaman 1

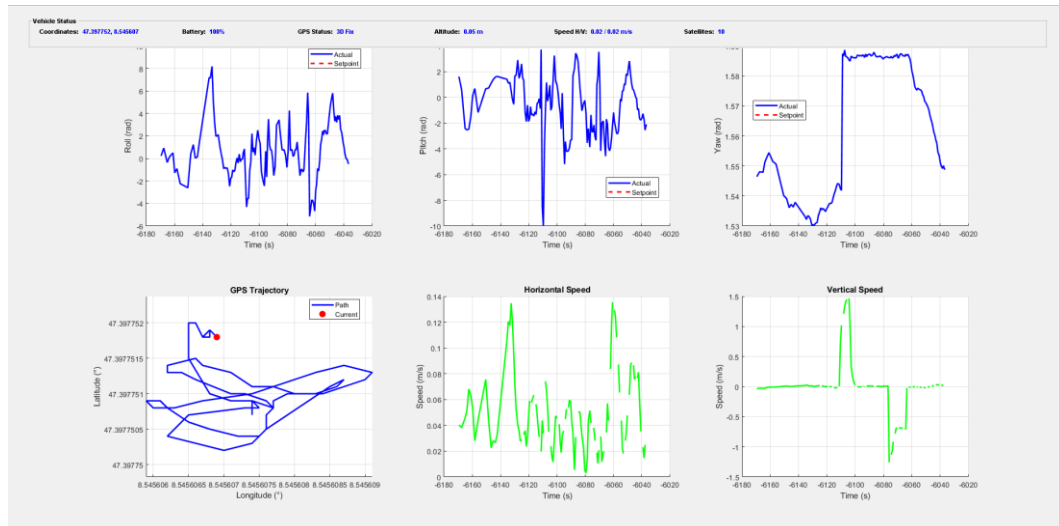
Halaman Pertama Gambar IV.2 Berfungsi sebagai area kerja untuk mendefinisikan peta dan jaringan rute. Pada halaman ini, pengguna dapat menandai titik-titik lokasi (*waypoints*) di atas peta satelit. Rute antar *waypoint* kemudian dapat dibuat, di mana jaraknya akan dihitung dan ditampilkan secara otomatis, baik pada peta maupun

pada "*Route Table*". Ini secara efektif membentuk sebuah struktur graf yang menjadi dasar perhitungan algoritma



Gambar IV. 3 Aplikasi *Generate Map* Halaman 2

Halaman Kedua Gambar IV.3 Berfungsi sebagai panel optimasi untuk menghasilkan rencana misi final. Pengguna memilih titik awal dan tujuan dari *dropdown menu*, kemudian sistem akan menjalankan Algoritma *Dijkstra* untuk menghitung dan memvisualisasikan jalur terpendek, yang ditandai dengan garis biru di peta. Rincian jalur yang dipilih ditampilkan pada tabel di bagian atas, beserta total jaraknya, sebelum pengguna membuat file *.plan* akhir melalui tombol "*Generate*".



Gambar IV. 4 Antarmuka *Monitor*

Antarmuka pada Gambar IV.4 berfungsi sebagai *Dashboard* Pemantauan Penerbangan yang dirancang untuk memvisualisasikan data telemetri dari wahana secara *real-time*. *Dashboard* ini terbagi menjadi dua area utama. Bagian atas menampilkan Panel Status Kendaraan yang menyajikan data-data krusial seperti koordinat GPS, sisa baterai, status koneksi GPS, ketinggian, kecepatan, dan jumlah satelit yang terhubung. Di bawahnya, terdapat enam buah grafik yang menampilkan data deret waktu: tiga grafik di baris atas digunakan untuk menganalisis performa kendali PID dengan membandingkan orientasi (*Roll*, *Pitch*, dan *Yaw*) aktual (garis biru) terhadap titik targetnya (garis merah), sementara tiga grafik di baris bawah menunjukkan dinamika penerbangan, yang meliputi jejak Trajektori GPS, Kecepatan Horizontal, dan Kecepatan Vertikal. Secara keseluruhan, *dashboard* ini berfungsi sebagai alat validasi dan analisis yang kuat untuk memverifikasi eksekusi misi dan mengevaluasi performa sistem kendali *drone*.

## IV.2 Hasil *Blackbox Testing*

Pengujian fungsi dan tombol yang ada pada antar muka untuk memastikan fitur didalamnya dapat berfungsi dengan baik. Hasil pengujian akan tercantum pada tabel dibawah ini.

Tabel IV. 3 Hasil Pengujian Fungsionalitas Antarmuka

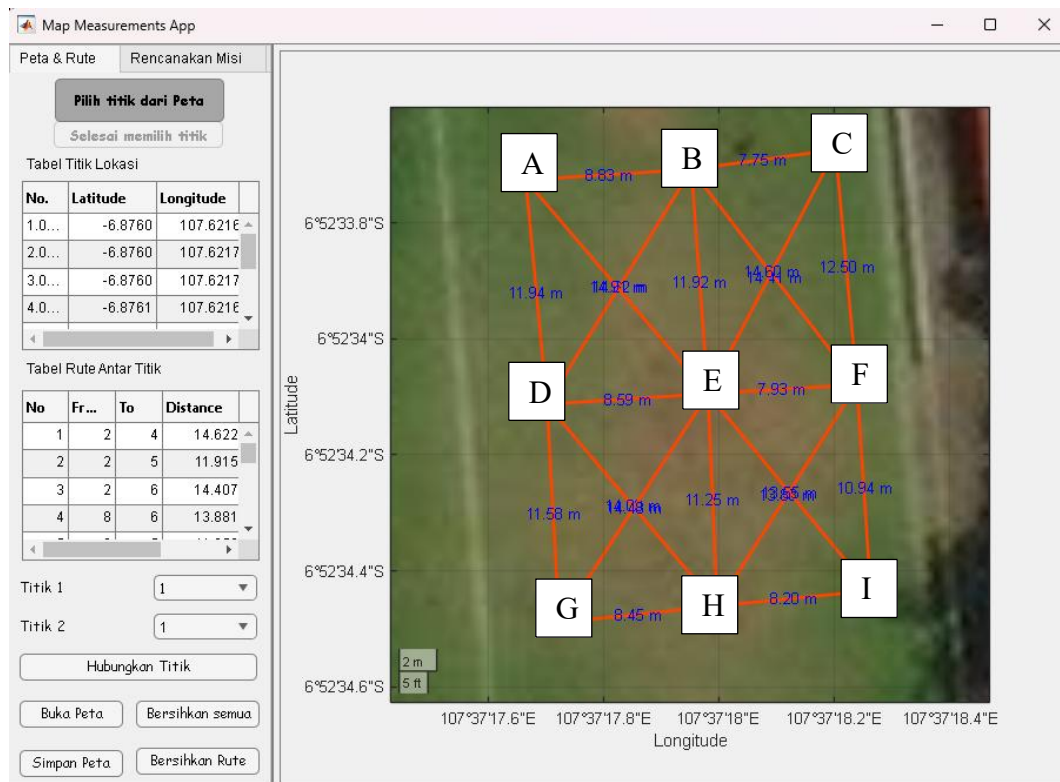
No.	Nama Fungsi	Berfungsi dengan Baik?
1	Pilih Titik dari Peta	Berfungsi
2	Selesai Memilih Titik	Berfungsi
3	Tabel Titik Lokasi	Berfungsi
4	Tabel Rute Antar titik	Berfungsi
5	Membuat Jalur	Berfungsi
6	Buka Peta	Berfungsi
7	Simpan Peta	Berfungsi
8	Bersihkan Semua	Berfungsi
9	Bersihkan Rute	Berfungsi
10	Mencari Jalur terpendek	Berfungsi
11	Tambah Jalur	Berfungsi
12	Petinjau	Berfungsi
13	Buat File	Berfungsi
14	<i>Reset</i>	Berfungsi

Berdasarkan hasil pengujian yang dirangkum pada Tabel IV. 2 dapat disimpulkan bahwa seluruh 14 fungsi utama yang diuji telah berjalan dengan baik dan sesuai dengan yang diharapkan. Fitur-fitur inti, mulai dari manajemen peta seperti "Pilih Titik dari Peta", "Buka Peta", dan "Simpan Peta", hingga fungsi optimasi seperti "Membuat Jalur" dan "Mencari Jalur Terpendek", semuanya dapat dieksekusi tanpa menemui *error*. Selain itu, fungsi pendukung seperti "Bersihkan Semua" dan "*Reset*" juga bekerja dengan benar, memastikan pengalaman pengguna yang lancar dari awal hingga akhir proses perancangan misi. Dengan demikian, secara fungsional, antarmuka yang dirancang telah memenuhi semua kebutuhan yang ditetapkan dalam perancangan sistem.

### IV.3 Performa Algoritma dan Perancangan Misi

Pengujian ini akan membuktikan apakah dalam pembuatan misi penerbangan *drone*, sistem dapat mencari jalur terpendek dalam berbagai skenario. Pengujian akan dilakukan pada peta dengan 9 titik, dengan jalur yang sudah dibuat. Namun

bobot dari setiap jalur dibuat mirip untuk melihat performa terbaiknya seperti pada Gambar IV.5.



Gambar IV. 5 Peta pengujian algoritma *Dijkstra*

Gambar IV.5 Merupakan tinjauan dari sistem perencanaan rute. Dari dalam sistem pengguna dapat menentukan titik-titik dan jalur yang akan digunakan. Dari Pengujian tersebut terdapat beberapa titik *waypoint* yang ada disekitar Lembah POLMAN.

Tabel IV. 4 Titik *Waypoint* Pengujian

<i>Waypoint</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
A	-6.8760350714061493	107.62157377135259
B	-6.8761374349924722	107.62166152044273
C	-6.8760299895254029	107.62165347677612
D	-6.8761425168720693	107.62158400874642
E	-6.8762390725740952	107.62166590789722
F	-6.8762318127475579	107.62173976338143
G	-6.8762470583831581	107.62158985868578

H	-6.8762390725740952	107.62166590789722
I	-6.8762318127475579	107.62173976338143

Tabel IV.3 menunjukkan titik-titik yang akan digunakan dalam pengujian. Ada 9 titik yang dibuat sejajar yang tersebar di sekitar Lembah POLMAN. Pembuatan titik dan jalur seperti itu digunakan agar setiap jalur memiliki bobot yang mirip. Disamping itu ada juga jalur-jalur yang dapat dilewati dalam pembuatan misi.

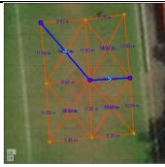
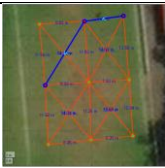
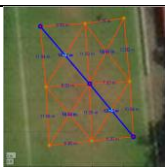
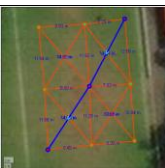
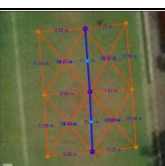
Tabel IV. 5 Tabel Jalur

No.	Waypoint 1	Waypoint 2	Jarak (m)
1	B	D	14.6224
2	B	E	11.9156
3	B	F	14.4077
4	H	F	13.8812
5	H	E	11.2506
6	H	D	13.9985
7	A	B	8.8273
8	C	B	7.7485
9	A	D	11.9362
10	C	F	12.4958
11	D	E	8.5853
12	F	E	7.9350
13	I	F	10.9432
14	D	G	11.5793
15	H	G	8.4515
16	H	I	8.2022
17	A	E	14.9067
18	C	E	14.6005
19	G	E	14.4812
20	I	E	13.5543

Tabel IV.4 Merupakan daftar jalur yang dihasilkan oleh sistem. Terdapat 20 jalur yang memiliki bobot yang berbeda-beda. Bobot tersebut diambil dengan menggunakan rumus (1.1) yang sudah terintegrasi dengan sistem.

Setelah itu akan sistem akan mencari jalur terpendek dengan algoritma dan divalidasi dengan perhitungan manual. Seperti pada Tabel IV.

Tabel IV. 6 Tabel Pengujian Algoritma

Skenario	Hasil Algoritma	Validasi	Valid
A-F	 A-E-F	A-E-F (22.84) A-B-F (23.23) A-B-C-F (29.07) A-D-E-F (28.46)	Valid
C-D	 C-B-D	C-B-D (22.37) C-E-D (23.19) C-B-A-D (28.51) C-F-E-D (29.02)	Valid
A-I	 A-E-I	A-E-I (28.46) A-B-F-I (34.18) A-D-H-I (34.14) A-B-C-H-I (40.01)	Valid
C-G	 C-E-I	C-E-I (29.08) C-B-D-G (33.95) C-F-H-G (34.83) C-F-I-H-G (40.09)	Valid
B-H	 B-E-H	B-E-H (23.17) B-D-H (28.62) B-F-H (28.29) B-C-F-I-H (39.39)	Valid

Tabel IV.3 di atas menyajikan hasil dari lima skenario pengujian yang berbeda (A-F, C-D, A-I, C-G, dan B-H). Untuk setiap skenario, kolom "Hasil Algoritma" menampilkan satu rute terpendek yang dipilih oleh sistem, sedangkan kolom "Validasi" mendaftar beberapa kemungkinan rute lain beserta total bobot jaraknya. Kolom "Valid" yang secara konsisten menunjukkan hasil yang benar untuk semua

skenario membuktikan bahwa implementasi algoritma *Dijkstra* dalam sistem ini telah berhasil dan bekerja sesuai dalam melakukan pencarian jalur terpendek.

#### IV.4 Hasil Validasi Teknis

Pada bagian ini akan diuji bagaimana perencanaan yang dilakukan di MATLAB diterapkan ke berbagai kondisi *drone*. Respon ketika wahana diberikan perintah akan menentukan implementasi berhasil sepenuhnya berhasil.

##### 1. *Takeoff*

Pada bagian ini, dilakukan pengujian untuk mengevaluasi performa dan keandalan wahana. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh stabilitas permukaan awal terhadap keberhasilan *drone* untuk terbang.

Tabel IV. 7 Pengujian *takeoff* di landasan yang tidak landai

No.	Kondisi	Keberhasilan
1	Tidak Landai	Gagal
2		Berhasil
3		Berhasil
4		Gagal
5		Gagal
6		Gagal
7		Berhasil
8		Gagal
9		Berhasil
10		Berhasil
Tingkat Keberhasilan		50%

Tabel IV. 8 Pengujian *takeoff* di landasan landai

No.	Kondisi	Keberhasilan
1	Landai	Berhasil
2		Berhasil
3		Berhasil
4		Berhasil
5		Berhasil

6		Berhasil
7		Berhasil
8		Berhasil
9		Berhasil
10		Berhasil

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel IV.3 dan Tabel IV.4, terlihat perbedaan performa yang sangat signifikan antara kedua kondisi. Pada kondisi landasan yang datar, wahana berhasil melakukan *takeoff* secara sempurna dalam 10 dari 10 percobaan.

Namun, performa menurun secara drastis pada kondisi landasan yang tidak rata, di mana tingkat keberhasilan hanya mencapai 50%, dengan 5 dari 10 percobaan mengalami kegagalan. Analisis menunjukkan bahwa kegagalan ini sangat mungkin disebabkan oleh desain fisik dari kaki pendaratan (*landing gear*) standar *frame* S500. Kaki pendaratan jenis ini memiliki tapak yang relatif sempit dan kurang stabil di permukaan yang tidak rata. Saat wahana diinisialisasi pada permukaan miring, ada kemungkinan salah satu lengan *drone* berada pada posisi lebih rendah, yang menyebabkan baling-baling dapat menyentuh tanah saat mulai berputar. Hal ini menimbulkan getaran hebat dan membuat wahana gagal lepas landas atau bahkan terbalik.

## 2. *Hold Position*

Pengujian "*Hold Position*" dilakukan untuk mengevaluasi akurasi dan konsistensi sistem dalam mengeksekusi misi dengan durasi yang ditentukan. Misi yang diuji adalah lepas landas ke ketinggian 10 meter, bertahan di posisi selama 30 detik, lalu mendarat. Pengujian ini dilakukan sebanyak 20 kali dalam lingkungan simulasi, dan hasilnya dibandingkan dengan satu data acuan dari penerbangan di dunia nyata yang mencatatkan waktu 00:01:12, atau 72 detik. Untuk perhitungan *error* pada bagian ini menggunakan *error* relatif atau selisih seperti pada rumus (1.2).

$$\text{Selisih (Detik)} = \left( \frac{\text{Nilai Referensi} - \text{Nilai Aktual}}{\text{Nilai referensi}} \right) \quad (1.2)$$

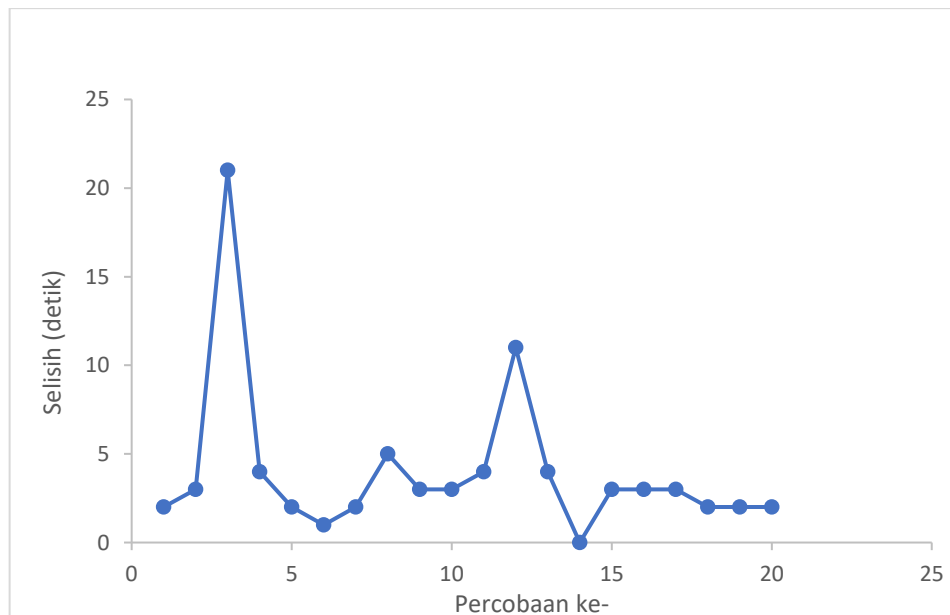
Nilai referensi = 72 Detik (00:01:12)

Nilai Aktual = Nilai yang didapat saat melakukan Pengujian

Tabel IV. 9 Tabel Pengujian *Hold Position*

No.	Waktu	Selisih (Detik)	No.	Waktu	Selisih (Detik)
1	00:01:10	2	11	00:01:16	4
2	00:01:09	3	12	00:01:23	11
3	00:01:33	21	13	00:01:16	4
4	00:01:16	4	14	00:01:12	0
5	00:01:10	2	15	00:01:09	3
6	00:01:11	1	16	00:01:15	3
7	00:01:10	2	17	00:01:15	3
8	00:01:17	5	18	00:01:10	2
9	00:01:09	3	19	00:01:10	2
10	00:01:09	3	20	00:01:10	2
Rata-rata selisih					4.7

Berdasarkan hasil pada Tabel IV.5, diperoleh waktu eksekusi rata-rata dalam simulasi sebesar 73.0 detik, sangat mendekati waktu acuan dunia nyata. Rata-rata *error* absolut yang tercatat hanya sebesar 4.7 detik.

Gambar IV. 6 Grafik pengujian *Hold Position*

Grafik pada Gambar IV.6 menunjukkan bahwa meskipun terdapat beberapa fluktuasi, sebagian besar hasil pengujian berada sangat dekat dengan garis acuan. Tingkat konsistensi sistem juga terbilang baik, ditunjukkan dengan nilai standar deviasi sebesar 6.16 detik.

### 3. *Hold Altitude*

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem autopilot dalam mempertahankan ketinggian terbang yang stabil (*altitude hold*). Pengujian dilakukan pada lima ketinggian target yang berbeda, yaitu 1, 2, 3, 4, dan 5 meter. Pada setiap ketinggian target, dilakukan 10 kali percobaan di mana *drone* diperintahkan untuk terbang dan bertahan pada ketinggian tersebut, dan data deviasi dihitung dengan rumus (1.3)

$$Galat (\%) = \left( \frac{\text{Nilai Referensi} - \text{Nilai Aktual}}{\text{Nilai Referensi}} \right) \quad (1.3)$$

Nilai Referensi = Ketinggian yang di inginkan

Nilai Aktual = Ketinggian yang didapat saat pengujian

Tabel IV. 10 Pengujian di ketinggian 1m

No.	Ketinggian (m)	Ketinggian	Galat(%)
1	1	0.2	80
2		0.2	80
3		-4.6	560
4		-3.7	470
5		-2.0	300
6		-3.8	480
7		-5.1	610
8		-5.0	600
9		-5.0	600
10		0.1	90
Rata-rata Galat			387

Hasil pengujian, di ketinggian 1 meter mendapatkan hasil yang tidak maksimal. *Drone* cenderung naik turun tidak stabil dan tidak mencapai ketinggian yang diinginkan.

Tabel IV. 11 Pengujian di ketinggian 2m

No.	Ketinggian (m)	Ketinggian	Galat(%)
1	2	1.2	40
2		1.2	40
3		1.2	40
4		-4.9	345
5		1.2	40
6		1.2	40
7		1.2	40
8		-7.4	470
9		1.2	40
10		1.2	40
Rata-rata Galat			118.5

Tabel IV. 12 Pengujian di ketinggian 3m

No.	Ketinggian (m)	Ketinggian	Galat(%)
1	3	2.2	26.6667
2		-3.1	203.333
3		2.4	20
4		2.3	23.3333
5		2.2	26.6667
6		2.2	26.6667
7		-4.7	256.667
8		-3.7	223.333
9		2.2	26.6667
10		-5.2	273.333
Rata-rata Galat			110.6667

Pada ketinggian 3 meter, performa *drone* menunjukkan peningkatan stabilitas yang signifikan. Rata-rata error menurun menjadi hanya 1.11 cm. Pada ketinggian ini,

pengaruh *ground effect* sudah jauh berkurang, memungkinkan sistem *autopilot* untuk mempertahankan posisi dengan lebih presisi.

Tabel IV. 13 Pengujian di ketinggian 4m

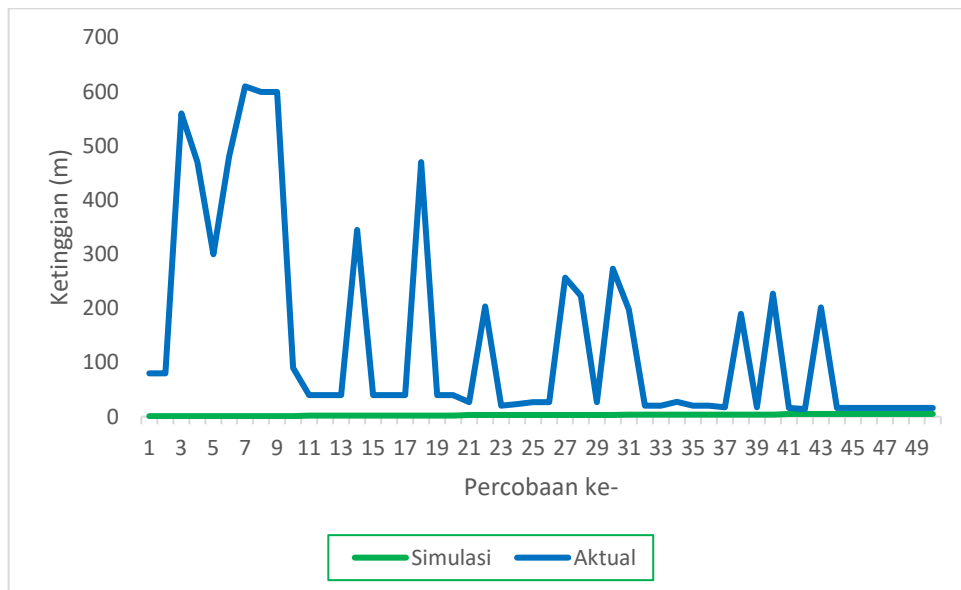
No.	Ketinggian (m)	Ketinggian	Galat(%)
1	4	-3.9	197.5
2		3.2	20
3		3.2	20
4		2.9	27.5
5		3.2	20
6		3.2	20
7		3.3	17.5
8		-3.6	190
9		3.3	17.5
10		-5.1	227.5
Rata-rata Galat			75.75

Tabel IV. 14 Pengujian di ketinggian 5m

No.	Ketinggian (m)	Ketinggian	Galat (%)
1	5	4.2	16
2		4.3	14
3		-5.1	202
4		4.2	16
5		4.2	16
6		4.2	16
7		4.2	16
8		4.2	16
9		4.2	16
10		4.2	16
Rata-rata Galat			34.4

Hasil pengujian, menunjukkan sebuah pola yang menarik. Performa *drone* dalam mempertahankan ketinggian ternyata semakin baik (error semakin kecil) seiring bertambahnya ketinggian target. Pada ketinggian 1 meter, tercatat rata-rata error

sebesar 3.87 cm. Namun, nilai *error* ini menurun secara signifikan menjadi hanya 0.34 cm pada ketinggian target 5 meter seperti pada Gambar IV.7.



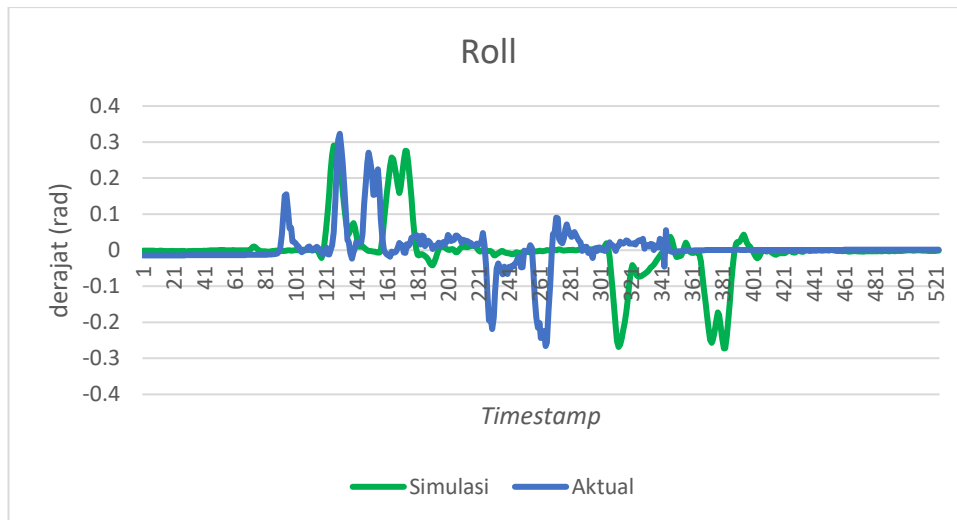
Gambar IV. 7 Pengujian *Hold Altitude*

Fenomena ini kemungkinan besar disebabkan oleh *ground effect*, yaitu sebuah efek aerodinamika yang terjadi saat *drone* terbang sangat dekat dengan permukaan tanah. Aliran udara ke bawah dari baling-baling memantul dari permukaan tanah dan menciptakan turbulensi di sekitar wahana. Turbulensi ini memaksa *flight controller* untuk bekerja ekstra keras dan melakukan koreksi berlebih, yang menyebabkan osilasi atau deviasi ketinggian yang lebih besar. Ketika *drone* terbang lebih tinggi (seperti pada 5 meter), ia berada di udara yang lebih "bersih" dan bebas dari *ground effect*, sehingga mampu mempertahankan posisinya dengan jauh lebih stabil dan presisi. Pengujian ini membuktikan bahwa sistem kendali ketinggian pada wahana bekerja dengan sangat baik, terutama saat beroperasi di luar pengaruh *ground effect*.

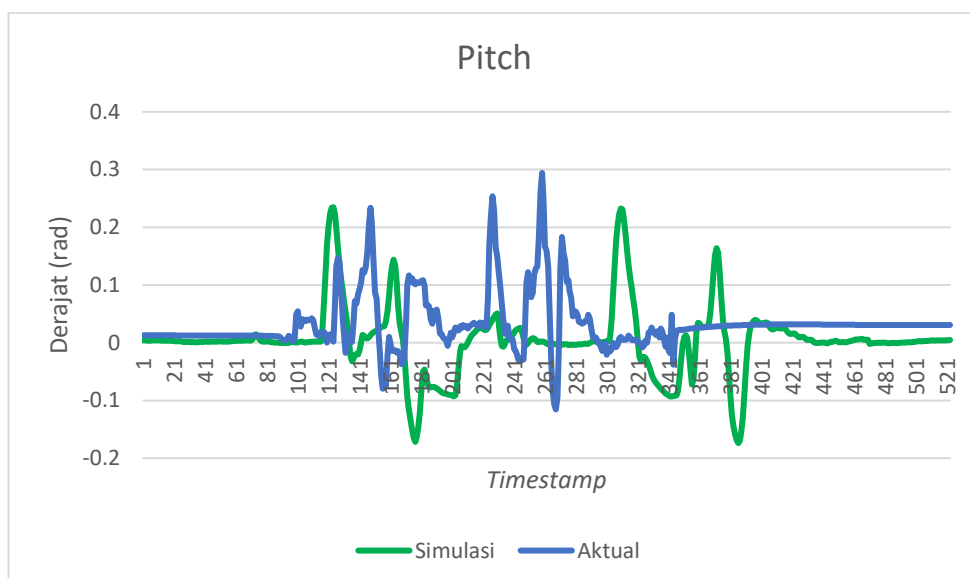
#### 4. Implementasi Misi

Pengujian ini akan memvalidasi bahwa wahana dapat terbang dengan berkas yang berisi *input* dari berkas misi (.plan) yang sebelumnya dibuat di MATLAB. Parameter yang akan uji adalah orientasi (*roll*, *pitch*, *Yaw*). Kecepatan (Vertikal, dan Horizontal), dan akurasi trajektori. Karena berdasarkan pengujian ketinggian pada bagian sebelumnya, ketinggian yang dihasilkan memiliki galat yang sangat tinggi.

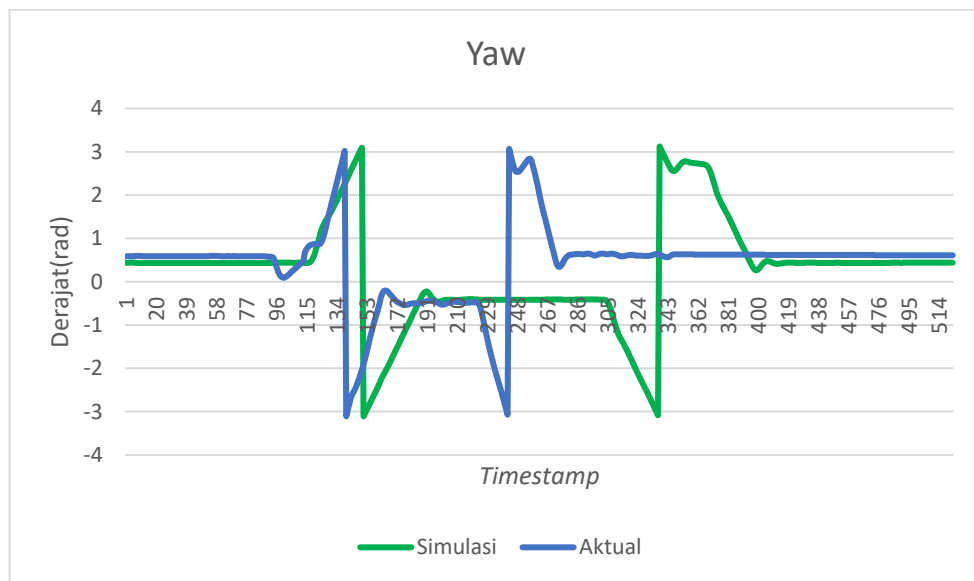
## 1. Orientasi

Gambar IV. 8 Data *Roll*

Berdasarkan Gambar IV.8, parameter *Roll* menunjukkan perbedaan karakteristik antara data aktual dan simulasi. Nilai puncak positif aktual 0.3231 rad tercatat lebih tinggi 11.26% dibandingkan nilai simulasi 0.2904 rad. Sebaliknya, pada puncak negatif, nilai simulasi  $-0.2725$  rad menunjukkan magnitudo yang sedikit lebih besar daripada nilai aktual  $-0.2659$  rad. Hal ini mengindikasikan bahwa model simulasi memiliki kecenderungan untuk menghasilkan atenuasi (peredaman) pada gerakan guling positif, namun sedikit melebihkan estimasi pada gulingan ke arah negatif.

Gambar IV. 9 Data *Pitch*

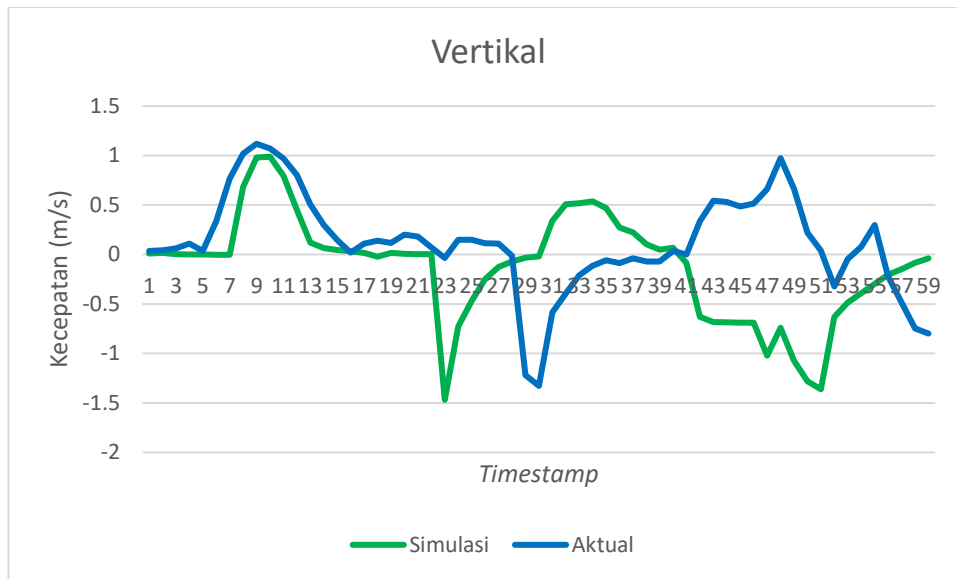
Untuk parameter *Pitch*, data aktual menunjukkan nilai puncak positif 0.2940 rad yang secara signifikan lebih tinggi daripada puncak positif hasil simulasi 0.2347 rad. Sementara itu, puncak negatif aktual  $-0.1156$  rad menunjukkan magnitudo yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan puncak negatif simulasi  $-0.1740$  rad. Perbedaan ini menyiratkan bahwa model simulasi memprediksi rentang pergerakan *pitch* yang lebih sempit dan lebih teredam dibandingkan dengan perilaku dinamis yang terjadi pada sistem aktual.



Gambar IV. 10 Data *Yaw*

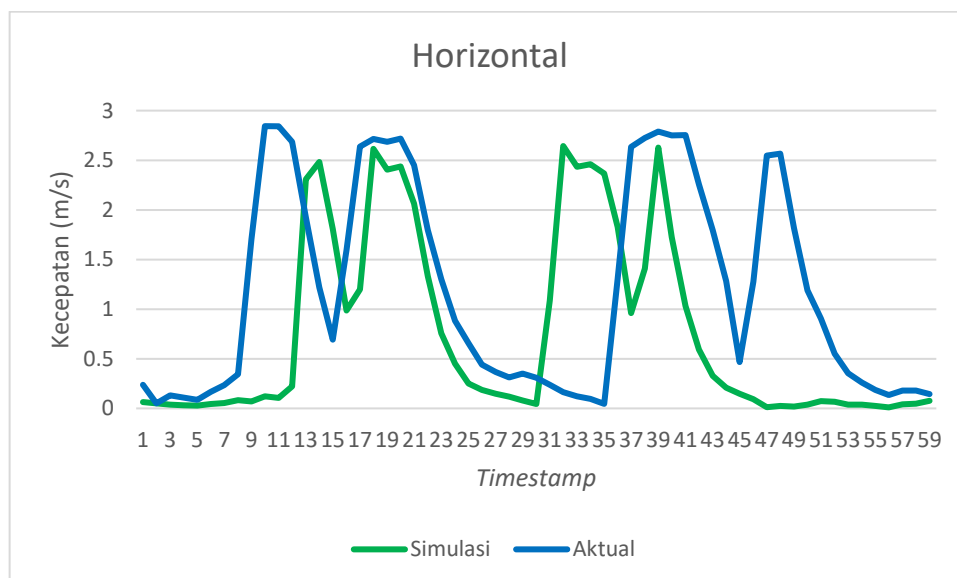
Parameter *Yaw* menunjukkan tingkat korelasi yang sangat tinggi antara data simulasi dan data aktual. Nilai puncak di kedua arah, baik positif maupun negatif, menunjukkan selisih yang minimal. Puncak positif simulasi 3.1244 rad hanya 1.76% lebih tinggi dari aktual 3.0703 rad, dan puncak negatif simulasi  $-3.1101$  rad hanya 0.045% lebih besar dari aktual  $-3.1087$  rad. Kesesuaian yang baik ini memvalidasi bahwa model simulasi mampu mereplikasi pergerakan *Yaw* dari wahana dengan akurasi yang tinggi.

## 2. Kecepatan



Gambar IV. 11 Kecepatan Vertikal

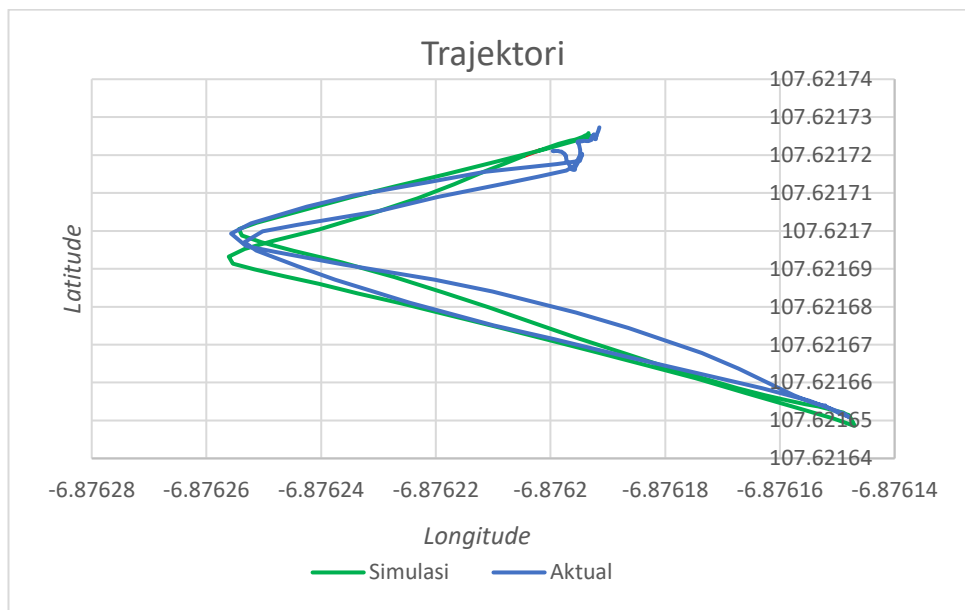
Saat menanjak, *drone* simulasi mencapai kecepatan puncak yang lebih tinggi, yaitu 1.121 m/s, dibandingkan dengan *drone* aktual yang puncaknya pada 0.988 m/s. ketika menurun, di mana wahana mencatat kecepatan minimum hingga -1.498 m/s, sementara *drone* aktual hanya mencapai -1.365 m/s. Perbedaan antara kedua grafik terjadi saat menurunkan ketinggian sementara. selisih terbesar tercatat sebesar -1.460 m/s, yang terjadi ketika simulasi menunjukkan penurunan sangat drastis yang tidak diikuti oleh *drone* aktual.



Gambar IV. 12 Kecepatan Horizontal

Dalam hal kecepatan puncak, wahana aktual mampu mencapai nilai tertinggi 2,84 m/s, sedikit melampaui batas maksimum simulasi pada 2,64 m/s. Akan tetapi, kecepatan rata-rata keduanya menunjukkan nilai yang relatif setara 0,12 m/s untuk simulasi dan 0,13 m/s untuk aktual.

### 3. Akurasi Trajektori



Gambar IV. 13 Akurasi Trajektori

Analisis komparatif antara lintasan hasil simulasi dan jalur penerbangan aktual menunjukkan tingkat kesesuaian spasial yang sangat tinggi. Secara kuantitatif, validasi data menghasilkan selisih jarak rata-rata sebesar 13,629 cm di seluruh titik lintasan. Visualisasi data pada grafik, di mana jalur simulasi diwakili warna biru dan jalur aktual oleh warna merah, mengonfirmasi bahwa kedua lintasan hampir berimpit. Meskipun demikian, dapat diamati adanya fluktuasi minor pada jalur aktual yang tidak terdapat pada jalur simulasi yang lebih ideal. Deviasi ini dapat diatribusikan pada faktor-faktor eksternal di lingkungan nyata, seperti latensi dan noise pada sinyal GPS serta dinamika fisik wahana yang tidak sepenuhnya terwakili dalam model simulasi.