

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
HALAMAN PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	ii
HALAMAN MOTTO	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL	xviii
INTISARI	xxvi
ABSTRACT	xxvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	6
1.5 Sistematika Penulisan	6
BAB 2 LANDASAN TEORI	9
2.1 Tinjauan Pustaka	9
2.2 Dasar Teori	16
2.2.1 <i>Monocopter</i>	16
2.2.2 Kinematika dan Dinamika 6-DOF dengan Torsi Reaksi Propeler	23
2.2.3 Representasi <i>State-Space</i> dan Linearisasi	30
2.2.4 <i>Discrete Kalman Filter</i>	41
2.2.5 Kendali PID dan Metode <i>Pole Placement</i>	49
2.2.6 <i>Servo Mixer</i> dan <i>Mixing Matrix</i>	64
2.2.7 <i>Model-Based Design</i>	74

2.2.8	Hipotesis Penelitian	76
BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN	79
3.1	Tahapan Penelitian	79
3.1.1	Studi Literatur dan Pengumpulan Data	80
3.1.2	Perancangan Model Dinamika (<i>Plant Model</i>)	80
3.1.3	Perancangan <i>Discrete Kalman Filter</i>	80
3.1.4	Perancangan Kendali PID	81
3.1.5	Perancangan <i>Servo Mixer</i>	81
3.1.6	Implementasi Arsitektur Sistem Kendali	81
3.1.7	Pengujian dan Validasi Sistem	81
3.2	Alat dan Bahan	82
3.2.1	Alat	82
3.2.2	Bahan	83
3.3	Perancangan Sistem	84
3.3.1	Perancangan Model Dinamika (<i>Plant Model</i>)	88
3.3.2	Perancangan <i>Discrete Kalman Filter</i>	103
3.3.3	Perancangan Kendali PID	107
3.3.4	Perancangan <i>Servo Mixer</i>	113
3.3.5	Implementasi Arsitektur Sistem Kendali	117
3.4	Mekanisme Pengujian	125
3.4.1	Skenario Simulasi dan Metrik Evaluasi	126
3.4.2	Metodologi Validasi <i>Multi-Platform</i>	128
3.4.3	Skema Pengujian Hipotesis	130
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	133
4.1	Verifikasi Parameter Fisis dan Model Keadaan Linier	133
4.1.1	Model Keadaan Ruang Diskret (<i>State-Space ZOH</i>)	134
4.1.2	Verifikasi Keterkendalian dan Keteramatan Numerik	136
4.2	Analisis Kestabilan dan Karakteristik <i>Closed-Loop</i>	138
4.2.1	Hasil Sintesis <i>Gain Quadruple PID</i> dengan <i>Pole Placement</i>	140
4.2.2	Verifikasi Polinomial Karakteristik dan Lokasi Akar-Akar (<i>Poles</i>)	141
4.3	Hasil Karakterisasi dan Penalaan Estimator Sinyal (DKF)	144
4.3.1	Hasil Optimalisasi Matriks Kovariansi <i>Q</i> dan <i>R</i>	145
4.3.2	Karakterisasi Evolusi <i>Kalman Gain</i> dan Kovarians Kesalahan Terkoreksi	148
4.4	Karakterisasi Mekanisme Kompensasi Aktif dan <i>Servo Mixer</i>	151
4.4.1	Kompensasi <i>Feedforward</i> Torsi Reaksi Sumbu <i>Yaw</i>	153

4.4.2	Penjadwalan Penguatan (<i>Gain Scheduling</i>) Efektivitas Sirip Kuadratik	156
4.4.3	Linearisasi Konversi Gaya Dorong ke Sinyal <i>Throttle</i>	158
4.5	Hasil Pengujian Skenario Simulasi dan Evaluasi Metrik Kuantitatif . .	161
4.5.1	Analisis Pelacakan Lintasan dan Respons Transien Sumbu Terbang	162
4.5.2	Evaluasi Metrik Performa Kuantitatif dan Margin Stabilitas . .	167
4.6	Hasil Validasi <i>Multi-Platform</i> Berlapis	171
4.6.1	Tahap 1: Validasi Silang terhadap <i>Script</i> MATLAB Independen	173
4.6.2	Tahap 2: Validasi Silang terhadap <i>Script</i> Python	178
4.6.3	Tahap 3: Verifikasi Kualitatif pada Simulator 3D Berbasis WebGL	184
4.7	Pengujian Komparatif dan Pembuktian Hipotesis (<i>Ablation Study</i>) . . .	189
4.7.1	Hasil Pengujian Hipotesis 1: Efektivitas Kompensasi <i>Feedforward</i> Sumbu <i>Yaw</i> dan Otoritas Sirip	190
4.7.2	Hasil Pengujian Hipotesis 2: Keandalan Estimasi Optimal <i>Discrete Kalman Filter</i> (DKF)	194
4.7.3	Hasil Pengujian Hipotesis 3: Validasi Silang Lintas Platform Berbasis Deteksi Penyimpangan	199
BAB 5	PENUTUP	202
5.1	Kesimpulan	202
5.2	Saran	204
DAFTAR PUSTAKA		206
LAMPIRAN A		L - 1
A	Lembar Perbaikan Proyek Akhir	L - 1
BAB A	Spesifikasi dan Skematik Perangkat <i>Hardware</i>	L - 2
A	Arsitektur Sistem <i>Hardware</i>	L - 2
B	Justifikasi Pemilihan Komponen Utama	L - 3
B.1	ESP32 DevKit V1 sebagai Platform Kontrol	L - 3
B.2	Modul Sensor GY-87 (10-DOF) sebagai Sensor Sikap	L - 4
C	Bill of Materials (BOM)	L - 4
D	Pin Assignment ESP32	L - 6
E	Skematik Wiring dan Distribusi Board	L - 8
BAB B	Desain Mekanik Wahana dan Kalkulasi Aerodinamika	L - 11
A	Dua Konfigurasi Wahana: Fisik Pengujian dan Acuan Kontrol	L - 11
B	Konsep Desain Modular Wahana Acuan Kontrol	L - 12

B.1	Pembagian Fungsi Tiap Seksi	L - 12
B.2	Komponen Cetak 3D Penyusun Wahana	L - 13
C	Spesifikasi Dimensi Tiap Seksi	L - 14
D	Kalkulasi <i>Center of Gravity</i> (CG)	L - 15
E	Kalkulasi Momen Inersia Teoretis	L - 16
E.1	Inersia Sumbu Melintang (<i>Roll</i> dan <i>Pitch</i>)	L - 17
E.2	Inersia Sumbu Putar (<i>Yaw</i>)	L - 17
F	Kalkulasi <i>Center of Pressure</i> (CP) Metode Barrowman	L - 18
F.1	Kontribusi <i>Nose Cone</i>	L - 18
F.2	Kontribusi <i>Body Tube</i>	L - 18
F.3	Kontribusi Sirip Kisi (<i>Grid Fins</i>) Terkalibrasi CFD	L - 18
F.4	Lokasi <i>Center of Pressure</i> (CP) Neto	L - 19
F.5	Kalkulasi <i>Static Margin</i> (SM)	L - 19
F.6	Analisis Hasil dan Interpretasi Fisik	L - 19
BAB C	Arsitektur <i>Firmware</i> dan Antarmuka Web	L - 20
A	Arsitektur <i>Firmware</i> FreeRTOS <i>Dual-Core</i>	L - 20
B	Antarmuka <i>WebSocket</i> dan Format Pesan	L - 22
B.1	Format Pesan <i>RC Input</i> (Telemetri Perintah)	L - 22
B.2	Format Pesan <i>Trim</i> dan Kalibrasi Lapangan	L - 23
C	Prosedur Koneksi Operator ke Sistem	L - 23
D	Dasbor Pemantauan (<i>Flight Monitor</i>)	L - 24
E	Antarmuka Kendali Jarak Jauh (<i>Remote Control</i>)	L - 26
F	Rangkuman Fungsi Antarmuka	L - 26
G	Hasil Pengujian Koneksi <i>WebSocket</i>	L - 27
BAB D	Simulator Web 3D (Alat Bantu Visualisasi)	L - 28
A	Arsitektur Perangkat Lunak Simulator	L - 28
B	Model Dinamika Rotasi Dasar	L - 29
C	Perluasan Model <i>Plant</i> : Fenomena Fisika Tambahan	L - 29
D	Simulator Interaktif <i>Downwash</i> Sirip	L - 31
E	<i>Dashboard Monitoring</i>	L - 32
F	Moda Navigasi <i>Waypoint</i> dan Algoritma Panduan	L - 33
G	Pemantauan Defleksi Servo	L - 35
H	Fasilitas Perekaman dan Ekspor Data	L - 36
BAB E	Data Pendukung Analisis Kelayakan <i>Hardware</i>	L - 37
A	Distribusi Tegangan dan Arus	L - 37

A.1	Konfigurasi Catu Daya	L - 37
A.2	Tabel Distribusi Tegangan dan Arus per Komponen	L - 37
A.3	Alasan Tidak Menggunakan BEC ESC	L - 38
A.4	Kelebihan dan Kekurangan Konfigurasi	L - 38
B	Evaluasi Kelayakan Implementasi <i>Hardware</i>	L - 39
B.1	Analisis Beban Komputasi <i>Real-Time</i>	L - 39
B.2	<i>Scorecard</i> Kelayakan Implementasi	L - 39
B.3	<i>Gap</i> Simulasi vs <i>Hardware</i> Fisik	L - 39
B.4	Rekomendasi Parameter untuk Pengujian <i>Hardware</i>	L - 40
C	Kalkulasi Pemilihan Kombinasi Propulsi Pengganti	L - 40
C.1	Diagnosis Kuantitatif Kegagalan <i>Lift-Off</i>	L - 40
C.2	Syarat Perancangan Propulsi	L - 41
C.3	Dua Jalur Solusi	L - 41
C.4	Kalkulasi Kombinasi Terpilih	L - 42
BAB F	Berkas Parameter dan Kode Sumber	L - 44
A	Repositori Kode Sumber Terbuka (<i>Open-Source Repository</i>)	L - 44
LAMPIRAN B		L - 1
A	<i>Assembly Body</i>	L - 1
B	Matlab	L - 2
C	Dokumentasi	L - 3