



## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR GAMBAR .....	iv
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR SIMBOL.....	viii
INTISARI.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
BAB I      PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	5
1.3. Batasan Masalah .....	5
1.4. Tujuan .....	7
1.5. Manfaat Penelitian .....	7
1.6. Kontribusi Penelitian .....	7
1.7. Keaslian Penelitian.....	8
1.8. Sistematika Penulisan .....	8
BAB II      TINJAUAN PUSTAKA .....	10
BAB III      LANDASAN TEORI.....	26
3.1. UAV ( <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> ) dan <i>Quadrotor</i> .....	26
3.2. Pemodelan <i>Quadrotor</i> .....	29
3.2.1. Kinematika <i>quadrotor</i> .....	29
3.2.2. Dinamika <i>quadrotor</i> .....	32
3.3. <i>Inertial Measurement Unit</i> (IMU) .....	35
3.3.1. Akselerometer .....	36
3.3.2. Giroskop.....	38
3.4. <i>Kalman filter</i> .....	39
3.5. Pemodelan dengan <i>State Space</i> .....	40



3.6.	<i>Linear Quadratic Regulator (LQR)</i> .....	44
3.7.	Kendali Integral .....	48
BAB IV	METODE PENELITIAN .....	50
4.1.	Bahan dan Peralatan.....	50
4.2.	Tahapan Penelitian.....	51
4.3.	Analisis Sistem.....	54
4.4.	Pemodelan <i>Quadtilrotor</i> .....	58
4.4.1.	Kinematika <i>quadtilrotor</i> .....	58
4.4.2.	Dinamika <i>quadtilrotor</i> .....	60
4.5.	Sistem Kendali <i>Quadtilrotor</i> .....	71
4.5.1.	Sistem kendali <i>quadtilrotor</i> dengan <i>state space</i> .....	75
4.5.2.	Sistem kendali <i>quadtilrotor</i> dengan LQR.....	86
4.5.3.	Sistem kendali <i>quadtilrotor</i> dengan LQG .....	97
4.6.	Penentuan Parameter Kendali .....	104
4.6.1.	Penentuan parameter kendali LQR saat terbang <i>hovering</i> .....	104
4.6.2.	Penentuan parameter kendali LQR saat gerak translasi.....	104
4.7.	Rancangan pengujian sistem.....	105
4.7.1.	Pengujian tanpa gangguan proses dan <i>sensing</i> .....	107
4.7.2.	Pengujian dengan gangguan proses dan tanpa gangguan <i>sensing</i> .	107
4.7.3.	Pengujian gangguan proses dan gangguan <i>sensing</i> .....	107
BAB V	PENENTUAN PARAMETER KENDALI .....	109
5.1.	Hasil Penentuan Nilai Parameter Pemodelan dan Simulasi.....	109
5.2.	Hasil Penentuan Parameter Kendali LQR pada Saat <i>Hovering</i> .....	111
5.2.1.	Hasil penentuan parameter <b>Q</b> untuk sudut <i>roll</i> .....	113
5.2.2.	Hasil penentuan parameter <b>Q</b> untuk sudut <i>pitch</i> .....	115
5.2.3.	Hasil penentuan parameter <b>Q</b> untuk sudut <i>yaw</i> .....	116
5.3.	Hasil Penentuan Parameter Kendali LQR Saat Gerak Translasi .....	118
BAB VI	HASIL DAN PEMBAHASAN .....	121
6.1.	Hasil Pengujian Gerak Translasi Tanpa Gangguan Proses dan <i>Sensing</i> .....	121
6.2.	Hasil Pengujian Gerak Translasi dengan Gangguan Proses dan Tanpa Gangguan <i>Sensing</i> .....	122
6.2.1.	Hasil pengujian tanpa Integrator.....	122



6.2.2.	Hasil pengujian dengan Integrator .....	126
6.3.	Hasil Pengujian Gerak Translasi dengan Gangguan Proses dan Gangguan <i>Sensing</i> .....	128
6.3.1.	Hasil pengujian tanpa Integrator .....	128
6.3.2.	Hasil pengujian dengan Integrator .....	130
6.4.	Hasil Pengujian Kendali LQG dan Perbandingan dengan Metode Lainnya .....	137
BAB VII	KESIMPULAN DAN SARAN .....	146
7.1.	Kesimpulan .....	146
7.2.	Saran .....	147
DAFTAR PUSTAKA	.....	148



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Dinamika gerak penerbangan <i>quadrotor</i> (Azfar dan Hazry, 2011) ..	10
Gambar 2.2 Arsitektur <i>quadrotor</i> (Soumelidis et al., 2008) .....	12
Gambar 2.3 Blok diagram dari kendali PID pada <i>quadrotor</i> secara umum (Dharmawan et al., 2016b) .....	13
Gambar 2.4 Skema <i>Quadtiltrotor</i> (Ryll et al., 2012) .....	16
Gambar 2.5 Lengan pengayun ke- <i>i</i> memvisualisasikan kerangka bodi <i>frame FPi</i> , <i>propeller</i> terkait gaya dorong <i>Ti</i> , torsi <i>texti</i> , dan sudut <i>propeller</i> terayun <i>ai</i> (Ryll et al., 2015) .....	16
Gambar 3.1 <i>Quadrotor</i> (Carrillo et al., 2013) .....	26
Gambar 3.2 Ilustrasi gerak <i>quadrotor</i> (Domingues, 2009) .....	28
Gambar 3.3 Konfigurasi dari kerangka inersia bumi dan bodi <i>quadrotor</i> .....	30
Gambar 3.4 Sistem terbang <i>quadrotor</i> (4 DOF) .....	31
Gambar 3.5 Gambaran 6-DOF (Starlino, 2009) .....	35
Gambar 3.6 Akselerometer saat kondisi normal (Starlino, 2009) .....	36
Gambar 3.7 Akselerometer saat kondisi +X (Starlino, 2009) .....	36
Gambar 3.8 Akselerometer saat kondisi -Z atau jatuh bebas (Starlino, 2009) .....	37
Gambar 3.9 Akselerometer saat kondisi berotasi di sumbu Y (Starlino, 2009) .....	37
Gambar 3.10 Ruang vektor representasi akselerometer (Starlino, 2009) .....	38
Gambar 3.11 Ruang vektor representasi giroskop (Starlino, 2009) .....	38
Gambar 3.12 Operasi <i>Kalman filter</i> (Welch dan Bishop, 2006) .....	40
Gambar 3.13 Blok diagram sistem kendali dengan <i>state space</i> (Ogata, 2010) .....	44
Gambar 3.14 Blok diagram sistem kendali dengan <i>state space</i> dan <i>fullstate</i> <i>feedback</i> (Ogata, 2010) .....	45
Gambar 3.15 (a) Plot kurva <i>e(t)</i> dan <i>u(t)</i> yang menunjukkan sinyal kendali bukan nol saat sinyal <i>actuating-error</i> bernilai nol (kendali integral); (b) plot kurva <i>e(t)</i> dan <i>u(t)</i> yang menunjukkan sinyal kendali nol ketika sinyal <i>actuating-error</i> bernilai nol (kendali proporsional) (Ogata, 2010) .....	49
Gambar 4.1 Tahapan penelitian .....	52
Gambar 4.2 Konfigurasi dari kerangka inersia bumi dan bodi quadtiltrotor .....	58
Gambar 4.3 Visualisasi perputaran kelompok baling-baling ke- <i>i</i> pada kerangka bodi <i>Pi</i> , dengan <i>propeller</i> yang terkait dengan gaya dorong <i>Fi</i> , dan sudut putar <i>propeller ai</i> .....	59
Gambar 4.4 Desain <i>quadtiltrotor</i> tampak atas .....	68
Gambar 4.5 Desain <i>quadtiltrotor</i> tampak atas .....	69
Gambar 4.6 Pengaturan kerangka koordinat untuk manipulator umum (Kucuk dan Bingul, 2007) .....	70
Gambar 4.7 Sistem kendali secara umum .....	71
Gambar 4.8 Rancangan sistem kendali <i>Quadtiltrotor</i> .....	73
Gambar 4.9 Fungsi blok Horizontal Wind Model 07 pada Simulink (Mathworks, 2014) .....	81



Gambar 4.10 Rancangan simulasi model <i>quadtiltrotor</i> .....	82
Gambar 4.11 Bagan alir dari fungsi <i>Mapping to Motor</i> .....	84
Gambar 4.12 Bagan alir awal program simulasi.....	90
Gambar 4.13 Rancangan sistem kendali <i>quadtiltrotor</i> dengan <i>fullstate feedback controller</i> dan integrator .....	93
Gambar 4.14 Bagan alir fungsi <i>Xref</i> .....	94
Gambar 4.15 Rancangan simulasi model <i>full state feedback</i> menggunakan LQR dan Integrator dengan referensi <i>state</i> .....	95
Gambar 4.16 Bagan alir fungsi LQR .....	96
Gambar 4.17 Diagram alur kerja <i>Kalman Filter</i> .....	98
Gambar 4.18 Diagram kendali LQG .....	99
Gambar 4.19 Diagram kendali LQG dan Integrator .....	100
Gambar 4.20 Rancangan simulasi model <i>full state feedback</i> menggunakan LQG dengan referensi <i>state</i> .....	102
Gambar 4.21 Bagan alir fungsi penentuan <b>Kf</b> .....	103
Gambar 4.22 Bagan alir rancangan pengujian .....	106
Gambar 5.1 Respons sistem dengan parameter <b><math>Q\phi</math></b> sebesar 2.100 dan <b><math>Q\omega\phi</math></b> sebesar 120.....	115
Gambar 5.2 Respons sistem dengan parameter <b><math>Q\theta</math></b> sebesar 2.000 dan <b><math>Q\omega\theta</math></b> sebesar 120.....	116
Gambar 5.3 Respons penentuan <b><math>Q\psi</math></b> sebesar 1.200 dan <b><math>Q\omega\psi</math></b> sebesar 100 .....	118
Gambar 6.1 Hasil pengujian gerak translasi menggunakan LQR tanpa gangguan proses dan <i>sensing</i> .....	121
Gambar 6.2 Hasil pengujian gerak translasi menggunakan LQR dengan gangguan proses dan tanpa gangguan <i>sensing</i> .....	123
Gambar 6.3 Respons rotasi wahana hasil penalaan ulang dengan gangguan proses dan tanpa gangguan <i>sensing</i> .....	124
Gambar 6.4 Respons rotasi pada penalaan ulang dengan gangguan proses dan tanpa gangguan <i>sensing</i> .....	125
Gambar 6.5 Hasil pengujian gerak translasi menggunakan LQR dan Integrator dengan gangguan proses dan tanpa gangguan <i>sensing</i> .....	126
Gambar 6.6 Hasil pengujian gerak translasi menggunakan LQR dan Integrator dengan gangguan proses dan tanpa gangguan <i>sensing</i> .....	128
Gambar 6.7 Hasil pengujian gerak translasi menggunakan LQR dengan gangguan proses dan gangguan <i>sensing</i> .....	129
Gambar 6.8 Hasil pengujian gerak translasi menggunakan LQR dan Integrator dengan gangguan proses dan gangguan <i>sensing</i> .....	130
Gambar 6.9 Gaya yang dihasilkan oleh kendali untuk melakukan gerak translasi .....	132
Gambar 6.10 Perubahan sudut <i>tilt</i> masing-masing rotor ketika melakukan gerak translasi .....	134
Gambar 6.11 Kecepatan putar masing-masing rotor saat bergerak translasi .....	135
Gambar 6.12 Respons gerak rotasi akibat adanya gangguan proses dan <i>sensing</i> pada gerak translasi.....	136



Gambar 6.13 Estimator <i>state</i> posisi translasi sebagai luaran dari LQE .....	138
Gambar 6.14 Hasil pengujian gerak translasi menggunakan LQG.....	138
Gambar 6.15 Perbandingan respons kestabilan sikap terhadap gerak rotasi menggunakan (a) metode LQG dengan Integrator dan (b) metode PID serta <i>Attitude Recovery Control</i> (Abiko dan Tashiro, 2016)..	139
Gambar 6.16 Respons kestabilan sikap terhadap gerak rotasi menggunakan metode LQG dan Integrator .....	140
Gambar 6.17 Hasil pengujian gerak translasi menggunakan (a) metode LQR tanpa gangguan (b) metode LQR dengan gangguan proses dan tanpa gangguan sensing (c) metode LQR dengan gangguan proses dan sensing (d) metode LQR dan Integrator dengan gangguan proses dan sensing (e) metode LQG dan integrator dengan gangguan proses dan sensing .....	141



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>State of the art</i> sistem kendali <i>quadrotor</i> .....	18
Tabel 4.1 Bahan-bahan yang digunakan untuk melakukan simulasi .....	50
Tabel 4.2 Peralatan yang digunakan .....	51
Tabel 4.3 Daftar gangguan pengukuran yang diterapkan .....	83
Tabel 4.4 Daftar kecepatan maksimum motor <i>servo</i> dan <i>brushless</i> .....	85
Tabel 4.5 Rencana pengujian .....	108
Tabel 5.1 Momen inersia.....	109
Tabel 5.2 Parameter konstanta <b><i>b</i></b> dan <b><i>k</i></b> .....	111
Tabel 5.3 Konversi nilai <b><math>Q\phi</math></b> dan <b><math>Q\omega\phi</math></b> ke <b><i>K</i></b> .....	114
Tabel 5.4 Konversi nilai <b><math>Q\theta</math></b> dan <b><math>Q\omega\theta</math></b> ke <b><i>K</i></b> .....	115
Tabel 5.5 Konversi nilai <b><math>Q\psi</math></b> dan <b><math>Q\omega\psi</math></b> ke <b><i>K</i></b> .....	117
Tabel 5.6 Konversi nilai <b><math>Qz</math></b> dan <b><math>Qvz</math></b> ke <b><i>K</i></b> .....	119
Tabel 5.7 Konversi nilai <b><math>Qx</math></b> dan <b><math>Qvx</math></b> ke <b><i>K</i></b> .....	119
Tabel 5.8 Konversi nilai <b><math>Qy</math></b> dan <b><math>Qvy</math></b> ke <b><i>K</i></b> .....	120
Tabel 6.1 Parameter modul Wind Horizontal 07 .....	123
Tabel 6.2 Perbandingan indeks kinerja sistem kendali menggunakan IAE .....	143
Tabel 6.3 Perbandingan indeks kinerja sistem kendali berdasarkan <i>Cost Function</i> LQR ( <b><i>J</i></b> ) .....	145