



## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN.....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
INTISARI.....	xii
<i>ABSTRACT</i> .....	xiii
PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	2
1.5 Batasan Masalah.....	2
1.6 Metodologi Penelitian .....	3
1.7 Sistematika Penulisan.....	4
TINJAUAN PUSTAKA .....	6
LANDASAN TEORI.....	10
3.1 <i>Quadrotor</i> .....	10
3.2 <i>Inertial Measurement Unit (IMU)</i> .....	12
3.2.1 <i>Accelerometer</i> .....	12
3.2.2 <i>Giroskop</i> .....	13
3.3 Pengendali PID.....	13
3.4 <i>Linear Quadratic Regulator (LQR)</i> .....	15
3.5 <i>Earth inertial frame (E-frame)</i> dan <i>body fixed frame (B-frame)</i> .....	16
ANALISIS DAN PERANCANGAN SISTEM .....	18
4.1 Analisis Sietem.....	18
4.2 Proses penelitian.....	27
4.3 Fungsi transfer <i>quadrotor</i> .....	28
4.4 Rancang Kendali PID dengan pendekatan penalaan LQR .....	32



4.5	Arsitektur Sistem .....	36
4.6	Rancangan Elektronik .....	37
4.7	Rancangan Mekanik .....	39
4.8	Rancangan Perangkat lunak .....	40
4.8.1	Fungsi Setup .....	41
4.8.2	Fungsi Kendali LQR .....	42
4.8.3	Fungsi Kendali PID .....	43
4.9	Rencana pengujian .....	45
4.9.1	Rencana Pengujian motor brushless .....	46
4.9.2	Rencana pengujian quadrotor dengan kendali LQR .....	46
4.9.3	Rencana pengujian quadrotor dengan kendali PID menggunakan pendekatan penalaan LQR .....	46
IMPLEMENTASI .....		47
5.1	Implementasi Mekanik .....	47
5.2	Implementasi Elektronik .....	48
5.3	Penentuan Parameter Pemodelan .....	49
5.4	Pengujian motor <i>brushless</i> pada <i>quadrotor</i> .....	51
5.5	Pengujian sistem kendali LQR .....	51
5.6	Pengujian sistem kendali PID .....	52
HASIL DAN PEMBAHASAN .....		55
6.1	Hasil Pengujian Motor <i>Brushless</i> .....	55
6.2	Hasil pengujian statis kendali LQR dengan variasi pembobotan Q dan R .....	59
6.2.1	Hasil kendali sikap pada sudut <i>pitch</i> .....	59
6.2.2	Hasil kendali sikap pada sudut <i>roll</i> .....	61
6.2.3	Hasil kendali sikap pada sudut <i>yaw</i> .....	63
6.2.4	Hasil kendali sikap pada keadaan vertikal .....	65
6.3	Hasil terbang dengan kendali LQR .....	67
6.4	Hasil terbang kendali PID dengan pendekatan penalaan LQR .....	69
6.5	Hasil Respon kendali PID terhadap sikap <i>roll pitch</i> dan <i>yaw</i> pada kendali PID dengan pendekatan penalaan LQR .....	73
KESIMPULAN DAN SARAN .....		76
7.1	Kesimpulan .....	76
7.2	Saran .....	76



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Salah satu jenis <i>quadrotor</i> (Bouabdallah, 2007).....	11
Gambar 3.2 Pergerakan <i>Quadrotor</i> Konfigurasi+ (Miguel,2009).....	11
Gambar 3.3 Gambaran 6-DOF ( <i>Degree Of Freedom</i> ) (Starlino,2009) .....	12
Gambar 3.4 (a) <i>Accelerometer</i> saat kondisi normal , (b) <i>Accelerometer</i> saat kondisi + X, (c) <i>Accelerometer</i> saat kondisi -Z atau jatuh bebas, (d) <i>Accelerometer</i> saat berotasi sumbu Y (Starlino, 2009) .....	12
Gambar 3.5 Ruang vektor representasi <i>accelerometer</i> (Starlino, 2009).....	13
Gambar 3.6 Ruang vektor representasi <i>gyroscope</i> (Starlino, 2009).....	13
Gambar 3.7 Blok Diagram kendali PID (Ogata ,2010).....	14
Gambar 3.8 <i>Quadrotor</i> dengan <i>earth frame</i> dan <i>body frame</i> (Bolandi,2013).....	16
Gambar 4.1 Tipe <i>quadrotor</i> dan arah gerak <i>quadrotor</i> .....	18
Gambar 4.2 Gambar komponen untuk menghitung inersia <i>quadrotor</i> .....	27
Gambar 4.3 Tahapan penelitian.....	27
Gambar 4.4 Diagram sistem kendali LQR .....	33
Gambar 4.5 Diagram kendali PID.....	34
Gambar 4.6 Blok Sate untuk kendali PID dengan pendekatan LQR.....	36
Gambar 4.7 Arsitektur Sistem.....	37
Gambar 4.8 Schematic rancangan <i>shield</i> .....	39
Gambar 4.9 Peletakan komponen <i>quadrotor</i> .....	40
Gambar 4.10 Flowchart kendali LQR.....	40
Gambar 4.11 Flowchart kendali PID.....	40
Gambar 4.11 Flowchart fungsi setup .....	42
Gambar 4.12 Flowchart fungsi kendali LQR.....	42
Gambar 4.13 Flowchart fungsi kendali PID .....	44
Gambar 5.1(a) <i>Quadrotor</i> tampak bawah (b) <i>Quadrotor</i> tampak atas (c) <i>Quadrotor</i> tampak samping.....	47
Gambar 5.2 (a) Gambar schematic shield (b) Gambar shield <i>quadrotor</i> .....	48
Gambar 5.3 Mencari nilai K dengan persamaan riccati .....	50
Gambar 5.4 Pengiriman pulsa PWM pada setiap motor .....	51
Gambar 5.5 Pendeklarasian matrik K dan A inverse dari kendali LQR .....	52
Gambar 5.6 Algoritma kendali LQR .....	52
Gambar 5.7 Pengendalian terhadap sudut dan kecepatan sudut <i>yaw</i> .....	52
Gambar 5.8 Pengendalian terhadap sudut dan kecepatan sudut <i>pitch</i> .....	53
Gambar 5.9 Pengendalian terhadap sudut dan kecepatan sudut <i>roll</i> .....	54
Gambar 5.10 Pengendalian PID terhadap <i>altitude</i> .....	54
Gambar 6.1 Kecepatan sudut (rad/s) vs pulsa PWM motor depan.....	57
Gambar 6.2 Kecepatan sudut (rad/s) vs pulsa PWM motor kanan.....	57
Gambar 6.3 Kecepatan sudut (rad/s) vs pulsa PWM motor belakang.....	58
Gambar 6.4 Kecepatan sudut (rad/s) vs pulsa PWM motor kiri .....	58
Gambar 6.5 Variasi $Q = 0.000001$ dan $R = 1$ pada sudut <i>pitch</i> .....	60
Gambar 6.6 Variasi $Q = 0.0000007$ dan $R = 1$ pada sudut <i>roll</i> .....	62
Gambar 6.7 Variasi $Q = 0.000003$ dan $R = 1$ pada sudut <i>yaw</i> .....	64
Gambar 6.8 Grafik variasi $Q = 4$ dan $R = 1$ pada sikap vertical.....	66
Gambar 6.9 Grafik data terbang pada sudut <i>yaw</i> dengan kendali LQR .....	67



Gambar 6.10 Grafik data terbang pada sudut <i>roll</i> dengan kendali LQR.....	67
Gambar 6.11 Grafik data terbang pada sudut <i>pitch</i> dengan kendali LQR.....	68
Gambar 6.12 Grafik data keadaan vertikal dengan kendali LQR.....	68
Gambar 6.13 Grafik data terbang pada sudut <i>roll</i> .....	70
Gambar 6.14 Grafik data terbang pada sudut <i>pitch</i> .....	70
Gambar 6.15 Grafik data terbang pada sudut <i>yaw</i> .....	71
Gambar 6.16 Grafik data terbang pada altitude.....	71
Gambar 6.17 Grafik data respon pada sudut <i>yaw</i> .....	73
Gambar 6.18 Grafik data respon pada sudut <i>roll</i> .....	73
Gambar 6.19 Grafik data respon pada sudut <i>pitch</i> .....	74



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Korelasi Penelitian.....	8
Tabel 4.1 Daftar pin <i>Arduino nano</i> yang digunakan dalam penelitian.....	39
Tabel 4.1 Rencana Pengujian .....	45
Tabel 5.1 Komponen untuk menghitung inersia <i>quadrotor</i> .....	49
Tabel 5.2 komponen untuk menghitung nilai b dan k .....	50
Tabel 6.1 Hasil pengukuran Lebar pulsa deadzone .....	56
Tabel 6.2 Hasil pengujian tiap motor dengan variasi masukan PWM. ....	56
Tabel 6.3 Variasi nilai matriks bobot Q dan R pada sudut <i>pitch</i> .....	60
Tabel 6.4 Tabel rata rata sudut <i>pitch</i> .....	61
Tabel 6.5 Variasi nilai matriks bobot Q dan R pada sudut <i>roll</i> .....	62
Tabel 6.6 Tabel rata rata sudut <i>roll</i> .....	63
Tabel 6.7 Variasi nilai matriks bobot Q dan R pada sudut <i>yaw</i> .....	64
Tabel 6.8 Tabel rata rata sudut <i>yaw</i> .....	65
Tabel 6.9 Variasi nilai matriks bobot Q dan R pada sikap vertical .....	65
Tabel 6.10 Tabel rata rata data terbang quadrotor dengan kendali LQR .....	69
Tabel 6.11 Konstanta PID pada sudut dan keadaan vertical .....	69
Tabel 6.12 Tabel rata rata data terbang quadrotor dengan PID LQR .....	72