

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN MENYERAHKAN HAK MILIK ATAS TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	vi
ABSTRAK .....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	I-1
1.1 Latar Belakang .....	I-1
1.2 Rumusan Masalah .....	I-3
1.3 Tujuan Penelitian.....	I-3
1.4 Manfaat Penelitian.....	I-3
1.5 Batasan Penelitian .....	I-4
1.6 Sistematika Pelaporan .....	I-4
BAB II LANDASAN TEORI.....	II-1
2.1 Motor BLDC .....	II-1
2.1.1 Prinsip Dasar Motor BLDC.....	II-1
2.1.2 Prinsip <i>Driving</i> Motor BLDC .....	II-2
2.1.3 <i>Jumlah Electrical Cycle dalam satu Mechanical rotation</i> .....	II-6
2.1.4 Motor BLDC A2212 1000KV.....	II-7
2.2 Inverter Tiga Fasa.....	II-8
2.3 Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) .....	II-8
2.4 Rangkaian Penyangga Transistor .....	II-9
2.5 Arduino.....	II-10
2.6 Rotary encoder .....	II-12
2.6.1 <i>Absolute Rotary Encoder</i> .....	II-12

2.6.2	<i>Incremental Rotary Encoder</i> .....	II-13
2.7	Konverter Buck .....	II-13
2.8	Baterai .....	II-18
2.9	Proportional Integral Derivative (PI) .....	II-18
2.9.1	Pengertian dan Implementasi .....	II-18
2.9.2	Pehitungan Parameter Kp dan Ki.....	II-20
2.9.3	Spesifikasi Respons Transien.....	II-23
2.10	Penelitian Terkait .....	II-24
BAB III METODE PENELITIAN.....		III-1
3.1	Tahapan Penelitian .....	III-1
3.2	Tahapan Perancangan Sistem .....	III-3
3.3	Tahapan Perancangan Unit.....	III-4
3.3.1	Tahapan Perancangan <i>Absolute dan Incremental Rotary Encoder</i> . III-4	
3.3.2	Tahapan Perancangan Program Arduino Kendali Inverter Tiga Fasa III-5	
3.3.3	Tahapan Perancangan Program Arduino Kendali Konverter Buck III-5	
3.3.4	Tahapan Perancangan Inverter Tiga Fasa .....	III-6
3.3.5	Tahapan Perancangan konverter buck.....	III-7
3.4	Tahapan Pengujian Unit .....	III-7
3.4.1	Tahapan Pengujian <i>Absolute dan Incremental Rotary Encoder</i> .... III-8	
3.4.2	Tahapan Pengujian Program Arduino Kendali Inverter Tiga Fasa. III-9	
3.4.3	Tahapan Pengujian Program Arduino Kendali Konverter Buck... III-10	
3.4.4	Tahapan Pengujian Inverter Tiga Fasa.....	III-11
3.4.5	Tahapan Pengujian Konverter Buck .....	III-12
3.5	Tahapan Pembuatan Sistem.....	III-12
3.6	Tahapan Pengujian Sistem .....	III-13
3.7	Tahapan Perhitungan Parameter PI .....	III-14
3.8	Tahapan Pengujian Parameter PI .....	III-14
3.9	Waktu dan Tempat Pelaksanaan Penelitian.....	III-15
BAB IV PERANCANGAN DAN PEMBAHASAN.....		IV-1
4.1	Perancangan Sistem.....	IV-1
4.2	Perancangan Unit .....	IV-13

4.2.1	Perancangan <i>Absolute dan Incremental Rotary Encoder</i> .....	IV-13
4.2.2	Perancangan Program Arduino Kendali Inverter .....	IV-15
4.2.3	Perancangan Program Arduino Kendali Konverter Buck.....	IV-18
4.2.4	Perancangan Inverter Tiga Fasa .....	IV-21
4.2.5	Perancangan Konverter Buck.....	IV-22
4.2.6	Perancangan Beban .....	IV-24
4.3	Pengujian Unit.....	IV-25
4.3.1	Pengujian Absolute dan Incremental Rotary Encoder .....	IV-25
4.3.2	Pengujian program Arduino Kendali Inverter Tiga Fasa .....	IV-27
4.3.3	Pengujian Program Arduino Kendali Konverter Buck .....	IV-28
4.3.4	Pengujian Inverter Tiga Fasa.....	IV-33
4.3.5	Pengujian Konveter Buck.....	IV-36
4.3.6	Pengujian Beban.....	IV-43
4.4	Pembuatan Sistem .....	IV-47
4.5	Pengujian Sistem .....	IV-48
4.6	Pehitungan Parameter PI .....	IV-51
4.7	Pengujian Parameter PI .....	IV-56
4.7.1	Pengujian Sistem Pada Saat <i>Starting</i> .....	IV-61
4.7.2	Pengujian Sistem Pada Saat Diberi Beban.....	IV-64
4.8	Analisa.....	IV-68
4.8.1	Analisa Pengujian Sistem Pada Saat <i>Starting</i> .....	IV-69
4.8.2	Analisa Pengujian Sistem Pada Saat Diberi Beban.....	IV-78
4.9	Diskusi.....	IV-84
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		V-1
5.1	Kesimpulan.....	V-1
5.2	Saran .....	V-2
DAFTAR REFERENSI .....		I
LAMPIRAN.....		V

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Beberapa metode <i>tuning</i> kontrol PI ideal untuk proses FOPDT .....	II-23
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Pengukuran Kecepatan .....	IV-32
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Riak Tegangan .....	IV-42
Tabel 4.3 Kecepatan Rata-Rata Berdasarkan Persentase <i>Duty Cycle</i> .....	IV-49
Tabel 4.4 parameter FOPDT .....	IV-55
Tabel 4.5 parameter PI yang didapat dengan beberapa metode .....	IV-56
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Sistem Pada Saat <i>Starting</i> Dengan Beberapa Metode <i>Tuning</i> .....	IV-86
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Sistem Pada Saat Diberi Beban Dengan Beberapa Metode <i>Tuning</i> .....	IV-86

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Konfigurasi motor BLDC .....	II-1
Gambar 2. 2 Back-EMF motor BLDC .....	II-2
Gambar 2. 3 Sistem <i>drive</i> motor BLDC.....	II-3
Gambar 2. 4 Urutan switching untuk motor BLDC tiga fasa satu pasang kutub	II-4
Gambar 2.5 Prinsip <i>Driving</i> Motor BLDC satu pasang kutub.....	II-5
Gambar 2. 6 Urutan switching untuk motor BLDC tiga fasa dua pasang kutub	II-6
Gambar 2. 7 Prinsip <i>Driving</i> Motor BLDC dua pasang kutub .....	II-7
Gambar 2.8 Motor BLDC A2212 1000KV.....	II-7
Gambar 2.9 Rangkaian Penyangga Tristor Daya.....	II-10
Gambar 2. 10 Rotatory encoder .....	II-12
Gambar 2. 11 <i>Absolute Rotary Encoder</i> .....	II-13
Gambar 2.12 <i>Incremental Rotary Encoder</i> .....	II-13
Gambar 2.13 konverter buck (a) diagram rangkaian (b) rangkaian <i>Equivalent</i> (c) gelombang.....	II-15
Gambar 2.14 Eksperimen <i>bump test</i> mode kontrol manual (loop terbuka) .....	II-21
Gambar 2.15 Respon tangga eksperimen <i>bump test</i> untuk model FOPDT.....	II-21
Gambar 2.16 Kurva Respons Transien .....	II-23
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian.....	III-1
Gambar 3.2 Flowchart Perancangan Sistem .....	III-3
Gambar 3.3 flowchart perancangan <i>absolute rotary encoder</i> .....	III-4
Gambar 3.4 flowchart perancangan <i>incremental rotary encoder</i> .....	III-5
Gambar 3.5 Flowchart Perancangan Program Arduino kendali inverter.....	III-5
Gambar 3.6 Flowchart Perancangan Program Arduino kendali konverter buck	III-6
Gambar 3.7 Flowchart perancangan inverter tiga fasa.....	III-6
Gambar 3.8 Flowchart perancangan konverter buck .....	III-7
Gambar 3.9 flowchar pengujian <i>absolute rotary encoder</i> .....	III-8
Gambar 3.10 flowchar pengujian mikrokontroler arduino kendali inverter .....	III-9
Gambar 3.11 flowchar pengujian mikrokontroler arduino kendali buck.....	III-10
Gambar 3.12 Flowchar pengujian inverter tiga fasa .....	III-11
Gambar 3.13 Flowchart Pengujian Konverter Buck .....	III-12
Gambar 3.14 Flowchart Pengujian Sistem.....	III-13
Gambar 3.15 flowchart perhitungan parameter PI.....	III-14
Gambar 3.16 flowchart pengujian parameter PI .....	III-14
Gambar 4.1 posisi netral pada motor 1 pasang magnet (a) saling dorong-mendorong (b) saling tarik menarik .....	IV-2
Gambar 4.2 waktu pemberian arus dari fasa b menuju c (a) awal (b) akhir .....	IV-2
Gambar 4.3 proses pembongkaran belitan stator motor BLDC.....	IV-3
Gambar 4.4 wiring belitan motor BLDC .....	IV-3
Gambar 4.5 konfigurasi stator motor BLDC (a) depan (b) kanan (c) kiri .....	IV-4
Gambar 4.6 motor BLDC hubungan wye .....	IV-5
Gambar 4.7 Wiring motor BLDC hubungan wye.....	IV-5
Gambar 4.8 pembentukan kutub magnet (a) langkah ke-1 (b) langkah ke-2 (c) langkah ke-3 (d) langkah ke-4 (e) langkah ke-5 (f) langkah ke-6.....	IV-8
Gambar 4.9 posisi netral pada motor 7 pasang magnet (a) saling dorong-mendorong (b) saling tarik menarik .....	IV-8

Gambar 4.10 posisi awal magnet rotor (a) langkah ke-1 (b) langkah ke-2 (c) langkah ke-3 (d) langkah ke-4 (e) langkah ke-5 (f) langkah ke-6 .....	IV-11
Gambar 4.11 Diagram block Sistem .....	IV-12
Gambar 4. 12 Rotor Motor BLDC .....	IV-13
Gambar 4. 13 plate absolute rotaty encoder .....	IV-14
Gambar 4.14 inremental rotary encoder dan <i>absolute rotary encoder</i> .....	IV-15
Gambar 4.15 flowchart program arduino kendali inverter tiga fasa .....	IV-16
Gambar 4.16 flowchart program arduino kendali konverter buck.....	IV-19
Gambar 4.17 wiring rangkaian inverter 3 fasa.....	IV-22
Gambar 4.18 rangkaian inverter 3 fasa. ....	IV-22
Gambar 4.19 wiring rangkaian konverter buck.....	IV-24
Gambar 4.20 rangkaian konverter buck. ....	IV-24
Gambar 4.21 Beban.....	IV-25
Gambar 4.22 proses pengujian absolute rotary encoder sensor IR 1 dan 2 .....	IV-25
Gambar 4.23 hasil pengujian absolute rotary encoder sensor IR 1 dan 2 .....	IV-26
Gambar 4.24 proses pengujian absolute rotary encoder sensor IR 1 dan 3 .....	IV-26
Gambar 4. 25 hasil pengujian <i>absolute rotary encoder</i> sensor IR 1 dan 3. ....	IV-26
Gambar 4.26 proses pengujian arduino kendali inverter tiga fasa .....	IV-27
Gambar 4.27 pengukuran keluaran IR1 dan D1 .....	IV-27
Gambar 4.28 hasil keluaran IR1 dan D1 .....	IV-28
Gambar 4.29 Hasil Pengujian Keluaran Tegangan Mikrokontroler Arduino Dengan (a) <i>duty cycle</i> 0% (b) <i>duty cycle</i> 20% (c) <i>duty cycle</i> 40% (d) <i>duty cycle</i> 60% (e) <i>duty cycle</i> 80% (f) <i>duty cycle</i> 100% .....	IV-31
Gambar 4.30 pengujian kecepatan menggunakan tachometer .....	IV-32
Gambar 4.31 pengujian inverter 3 fasa .....	IV-34
Gambar 4.32 pengujian fasa A dan B pada inverter 3 pasa .....	IV-35
Gambar 4.33 hasil pengujian fasa A dan B.....	IV-35
Gambar 4.34 pengujian fasa B dan C pada inverter 3 fasa .....	IV-35
Gambar 4. 35 hasil pengujian fasa B dan C .....	IV-36
Gambar 4.36 Proses pengujian konverter buck .....	IV-36
Gambar 4.37 Hasil Pengujian Keluaran Tagangan Konverter Buck Dengan (a) <i>duty cycle</i> 0% (b) <i>duty cycle</i> 20% (c) <i>duty cycle</i> 40% (d) <i>duty cycle</i> 60% (e) <i>duty cycle</i> 80% (f) <i>duty cycle</i> 100% .....	IV-39
Gambar 4.38 rangkaian konverter buck dan <i>DC link</i> kapasitor .....	IV-39
Gambar 4.39 Hasil Pengujian Keluaran Tegangan <i>DC link</i> kapasitor Dengan (a) <i>duty cycle</i> 0% (b) <i>duty cycle</i> 20% (c) <i>duty cycle</i> 40% (d) <i>duty cycle</i> 60% (e) <i>duty cycle</i> 80% (f) <i>duty cycle</i> 100% .....	IV-42
Gambar 4.40 Grafik Pengujian Riak tegangan .....	IV-43
Gambar 4.41 beban (a) sebelum diberi beban (b) sesudah diberi beban .....	IV-44
Gambar 4.42 Respons Kecepatan Motor BLDC Saat Diberi Beban (a) Rentang Waktu 0 – 1 Detik (b) Rentang Waktu 0,7 – 1 Detik (c) Rentang Waktu 0,7 – 1 Detik (Pengujian Ke-1) .....	IV-46
Gambar 4.43 Diagram Pengawatan Sistem.....	IV-47
Gambar 4.44 Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC.....	IV-47
Gambar 4.45 Grafik kecepatan pada pengujian <i>duty cycle</i> 0-100% .....	IV-48
Gambar 4.46 Grafik Hasil Pengujian Pengatur Motor BLDC Berdasarkan Persentase <i>Duty Cycle</i> .....	IV-51
Gambar 4.47 Pengaturan CO <i>Duty Cycle</i> pada Pengujian <i>Bump Test</i> .....	IV-52

Gambar 4. 48 Respons Kecepatan Motor BLDC (Pengujian <i>Bump Test</i> ) (a) Pada waktu 0-3 detik (b) Pada waktu 2,9-3 detik (c) Pada waktu 2,9-3 detik (pengujian ke-4) (d) Pada waktu 0-3 detik (pengujian ke-4) (e) Pada waktu 0-0,25 detik (pengujian ke-4) .....	IV-54
Gambar 4.49 flowchart program arduino kendali konverter buck dengan PI..	IV-57
Gambar 4.50 Respons Kecepatan Motor BLDC Dengan Kendali PI Metode <i>Tuning Chien-regulator</i> Pada Saat <i>Starting</i> .....	IV-62
Gambar 4.51 Respons Kecepatan Motor BLDC Dengan Kendali PI Metode <i>Tuning Chien-Servo</i> Pada Saat <i>Starting</i> .....	IV-63
Gambar 4.52 Respons Kecepatan Motor BLDC Dengan Kendali PI Metode <i>Tuning Ziegler-Nichols</i> Pada saat <i>Starting</i> .....	IV-64
Gambar 4.53 Respons Kecepatan Motor BLDC Dengan Kendali PI Metode <i>Tuning Chien-regulator</i> Saat Diberi Beban .....	IV-65
Gambar 4.54 Respons Kecepatan Motor BLDC Dengan Kendali PI Metode <i>Tuning Chien-Servo</i> Saat Diberi Beban .....	IV-66
Gambar 4.55 Respons Kecepatan Motor BLDC Dengan Kendali PI Metode <i>Tuning Ziegler-Nichols</i> Saat Diberi Beban .....	IV-67
Gambar 4.56 Batas toleransi .....	IV-68
Gambar 4.57 Respons Kecepatan Motor BLDC Dengan Kendali PI Metode <i>Tuning Chien-regulator</i> (a) Pada waktu 2,9-3 detik (b) Pada waktu 2,9-3 detik (Pengujian Ke-4) (c) Pada waktu 0,15-0,4 detik (Pengujian Ke-4) (d) Pada waktu waktu 1,2-1,7 detik (Pengujian Ke-4) .....	IV-70
Gambar 4.58 Respons Kecepatan Motor BLDC Dengan Kendali PI Metode <i>Tuning Chien-Servo</i> (a) Pada waktu 2,9-3 detik (b) Pada waktu 2,9-3 detik (Pengujian Ke-4) (c) Pada waktu 0,15-0,4 detik (Pengujian Ke-4) (d) Pada waktu waktu 0,6-1,1 detik (Pengujian Ke-4) .....	IV-73
Gambar 4.59 Respons Kecepatan Motor BLDC Dengan Kendali PI Metode <i>Tuning Ziegler-Nichols</i> (a) Pada waktu 2,9-3 detik (b) Pada waktu 2,9-3 detik (Pengujian Ke-4) (c) Pada waktu 0,15-0,4 detik (Pengujian Ke-4) (d) Pada waktu waktu 0,6-0,8 detik (Pengujian Ke-4) .....	IV-76
Gambar 4.60 Respons Kecepatan Motor BLDC Dengan Kendali PI Metode <i>Tuning Chien-regulator</i> Saat Diberi Beban (a) Pada waktu 0,7-1 detik (Pengujian Ke-4) (b) Pada waktu 0-0,5 detik (Pengujian Ke-4) (c) Pada waktu 0-0,5 detik (Pengujian Ke-4) .....	IV-79
Gambar 4.61 Respons Kecepatan Motor BLDC Dengan Kendali PI Metode <i>Tuning Chien-Servo</i> Saat Diberi Beban (a) Pada waktu 0,7-1 detik (Pengujian Ke-4) (b) Pada waktu 0-0,5 detik (Pengujian Ke-4) (c) Pada waktu 0-0,5 detik (Pengujian Ke-4) .....	IV-81
Gambar 4.62 Respons Kecepatan Motor BLDC Dengan Kendali PI Metode <i>Tuning Ziegler-Nichols</i> Saat Diberi Beban (a) Pada waktu 0,7-1 detik (Pengujian Ke-4) (b) Pada waktu 0-0,5 detik (Pengujian Ke-4) (c) Pada waktu 0-0,5 detik (Pengujian Ke-4) .....	IV-83