

## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN .....	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR SINGKATAN .....	xvi
INTISARI .....	xviii
<i>ABSTRACT</i> .....	xix
1 BAB I DASAR TEORI.....	20
1.1 Latar Belakang .....	20
1.2 Rumusan Masalah.....	22
1.3 Batasan Tugas akhir .....	22
1.4 Tujuan Tugas Akhir .....	22
1.5 Manfaat Tugas Akhir .....	23
1.6 Sistematika Penulisan .....	23
1.6.1 Bab I Pendahuluan .....	23
1.6.2 Bab II Dasar Teori.....	23
1.6.3 Bab III Metode Penelitian.....	23
1.6.4 Bab IV Hasil dan Pembahasan.....	23
1.6.5 Bab V Kesimpulan dan Saran .....	23
2 BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	24
2.1 Tinjauan Pustaka.....	24
2.2 Dasar Teori.....	24
2.2.1 Microgrid .....	24

2.2.2	Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid code) .....	26
2.2.3	Motor Induksi .....	26
2.2.4	Generator Sinkron .....	31
2.2.5	Generator Induksi.....	31
2.2.6	Sensor ZMPT101B .....	34
2.2.7	Sensor Frekuensi dan ZCD .....	35
2.2.8	Optocoupler .....	36
2.2.9	Mikrokontroler Cortex-M3 STM32F103C8T6 .....	36
2.2.10	Sistem Kendali Proportional Integral Differential (PID) .....	38
3	<b>BAB III PERANCANGAN ALAT</b> .....	41
3.1	Alat dan Bahan Tugas Akhir.....	41
3.1.1	Alat Tugas Akhir.....	41
3.1.2	Bahan Tugas Akhir .....	41
3.2	Alur Tugas Akhir .....	42
3.2.1	Converter DC Chopper .....	49
3.2.2	Sensor Frekuensi .....	50
3.2.3	Sensor Tegangan .....	50
3.2.4	Pembacaan Sensor Frekuensi .....	51
3.2.5	Pembacaan Sensor Tegangan.....	51
3.2.6	Modul Komunikasi HC-05 .....	51
3.2.7	Pengujian Karaktersitik Sistem Testbed Microgrid.....	52
3.2.8	Pengujian Kendali Tegangan dan frekuensi Testbed Microgrid.....	55
4	<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	68
4.1	Pengujian Converter DC Chopper .....	68
4.2	Pengujian Sensor Frekuensi .....	69
4.3	Pengujian Sensor Tegangan .....	70
4.4	Pengujian Kendali Kalang Terbuka .....	70

4.4.1	Pengujian Steady-State .....	71
4.4.2	Pengujian Respon Step dan Perhitungan Parameter Proporsional dengan Penalaan Ziegler-Nichols dan Trial and Error .....	72
4.5	Pengujian Kendali Proporsional <i>Testbed Microgrid</i> dengan Generator Sinkron <i>Stand Alone</i> .....	76
4.5.1	Pengujian dengan Beban 615 watt .....	77
4.5.2	Pengujian dengan Beban 1095 watt .....	79
4.6	Pengujian Kendali Proporsional <i>Testbed Microgrid</i> dengan Generator Sinkron Bekerja Paralel .....	81
4.6.1	Pengujian dengan Beban 615 watt .....	82
4.6.2	Pengujian dengan Beban 1095 watt .....	84
4.6.3	Pengujian Beban Kapasitif .....	85
4.6.4	Pengujian dengan Perubahan Kecepatan Penggerak Mula Generator Induksi .	87
4.6.5	Pengujian dengan Mengurangi Kecepatan Penggerak Mula Generator Induksi 2 dengan Beban 615 watt .....	90
4.6.6	Pengujian dengan Menambah Kecepatan Penggerak Mula Generator Induksi 2 dengan Beban 615 watt .....	92
5	BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	94
5.1	Kesimpulan .....	94
5.2	Saran .....	95
	DAFTAR PUSTAKA .....	96
6	LAMPIRAN A .....	98
6.1	Dokumentasi Perangkat Keras .....	98
6.1.1	Generator dan Motor .....	98
6.1.2	Sistem Pengendali Penggerak Mula .....	99
6.1.3	<i>Capacitor Bank</i> .....	99
6.1.4	<i>Busbar</i> .....	100
6.1.5	Beban .....	100

6.1.6	<i>Testbed Microgrid</i> .....	100
6.1.7	Rangkaian <i>DC Chopoper</i> .....	101
6.1.8	Sensor Frekuensi .....	102
6.1.9	Sensor Tegangan .....	103
6.2	<i>Source Code</i> Kendali Frekuensi.....	105
6.3	<i>Source Code</i> Kendali Tegangan.....	112

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi Mikrokontroler STM32F103C8T6 .....	37
Tabel 2.2 Aturan Penalaan Ziegler-Nichols berdasarkan Nilai <i>Delay</i> (L) dan <i>Time Constant</i> (T).....	40
Tabel 4.1 Nilai Hasil Pengujian <i>Steady State</i> Tegangan dan frekuensi dengan Berbagai Variasi Beban .....	72
Tabel 4.2 Nilai Perhitungan Parameter Kendali PID dengan Penalaan <i>Ziegler-Nichols</i> .....	73
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Nilai $K_p$ , $K_i$ , dan $K_d$ dengan Menggunakan Penalaan <i>Ziegler-Nichols</i> .....	75
Tabel 4.4 Nilai Kendali Proporsional Generator Sinkron <i>Stand Alone</i> .....	76
Tabel 4.5 Nilai Kendali Proporsional Generator Sinkron Paralel dengan 2 Generator Induksi .....	76

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi Sistem <i>Microgrid</i> .....	25
Gambar 2.2 Kurva Torsi-Kecepatan Variasi Frekuensi.....	28
Gambar 2.3 Bentuk gelombang kotak (pulsa) dengan kondisi <i>high</i> 5V dan <i>low</i> 0V .....	29
Gambar 2.4 Sinyal Referensi (sinual tegangan DC).....	30
Gambar 2.5 Kurva Karakteristik Torsi-Kecepatan Mesin Induksi .....	32
Gambar 2.6 Skema Rangkaian Generator Induksi Terhubung dengan Jaringan serta <i>Capacitor bank</i> .....	33
Gambar 2.7 Kurva Arus Magnetisasi dan Kapasitansi 1 .....	34
Gambar 2.8 Kurva Arus Magnetisasi dan Kapasitansi 2 .....	34
Gambar 2.9 Skematik Sensor Frekuensi ZMPT101b 53 .....	35
Gambar 2.10 Proses Pembentukan Sinyal Digital pada Rangkaian ZCD .....	36
Gambar 2.11 Konfigurasi Pin STM32F103C8T6.....	38
Gambar 2.12 Blok Diagram Sistem Kendali <i>Proportional Integrator Differensial</i> (PID)..	38
Gambar 2.13 Garis Bantu dalam Penalaan <i>Ziegler-Nichols</i> .....	40
Gambar 3.1 Ilustrasi Sistem <i>Testbed Microgrid</i> ketika Generator Sinkron Beoperasi Paralel dengan 2 Genereator Induksi .....	42
Gambar 3.2 Ilustrasi Sistem <i>Testbed Microgrid</i> ketika Generator Sinkron <i>Stand Alone</i> ....	43
Gambar 3.3 Representasi Nyata dari Sistem <i>Testbed Microgrid</i> .....	44
Gambar 3.4 Detail Alur Kerja dari <i>Driver</i> .....	44
Gambar 3.5 Detail Alur Kerja Rangkaian Inverter .....	45
Gambar 3.6 Detail Alur Kerja Rangkaian <i>DC Chopper</i> .....	46
Gambar 3.7 Diagram Alir Penelitian .....	48
Gambar 3.8 Skematik Rangkaian <i>Converter DC Chopper</i> .....	49
Gambar 3.9 Skematik Rangkaian Sensor Frekuensi.....	50
Gambar 3.10 Skematik ZMPT101b.....	51
Gambar 3.11 Skematik Rangkaian Penyearah Gelombang .....	51
Gambar 3.12 Modul Komunikasi Bluetooth HC-05 .....	52
Gambar 3.13 Diagram Alir Pengujian <i>Kalang Terbuka</i> Kondisi <i>Steady State</i> .....	53
Gambar 3.14 Diagram Alir Pengujian <i>Bump Test</i> untuk Tegangan dan Frekuensi .....	54
Gambar 3.15 <i>Block Diagram</i> Sistem Kendali Tegangan Kalang Tertutup .....	55
Gambar 3.16 <i>Block Diagram</i> Sistem Kendali Frekuensi Kalang Tertutup .....	55

Gambar 3.17 Diagram Alir Operasi Kendali Otomatis <i>Testbed Microgrid</i> Kondisi Generator Sinkron Beroperasi <i>Stand Alone</i> .....	58
Gambar 3.18 Diagram Alir Operasi Kendali Otomatis <i>Testbed Microgrid</i> Kondisi Generator Sinkron Beroperasi Paralel .....	59
Gambar 3.19 Diagram Alir Pengujian Kendali Otomatis <i>Testbed Microgrid</i> Kondisi Generator Sinkron <i>Stand Alone</i> .....	60
Gambar 3.20 Alur Pengujian Skenario 1 .....	63
Gambar 3.21 Pengujian Skenario 2 .....	64
Gambar 3.22 Pengujian Skenario 3 .....	65
Gambar 3.23 Alur Pengujian Skenario 4 .....	66
Gambar 3.24 Pengujian Skenario 5 .....	67
Gambar 4.1 Variasi Nilai Tegangan Eksitasi <i>DC Chopper</i> .....	68
Gambar 4.2 Variasi Nilai Arus Eksitasi <i>DC Chopper</i> .....	68
Gambar 4.3 Hasil Pembacaan Pulsa Sensor Frekuensi.....	69
Gambar 4.4 Data Pembacaan Nilai ADC Tegangan.....	70
Gambar 4.5 Grafik Nilai <i>Steady State</i> Frekuensi <i>Testbed Microgrid</i> .....	71
Gambar 4.6 Grafik Nilai <i>Steady State</i> Tegangan <i>Testbed Microgrid</i> .....	71
Gambar 4.7 Hasil Pengujian Respon Step dari Frekuensi Generator Sinkron dalam Kondisi Paralel .....	73
Gambar 4.8 Hasil Pengujian Respon Step dari Frekuensi Generator Sinkron dalam Kondisi <i>Stand Alone</i> .....	74
Gambar 4.9 Hasil Pengujian Respon Step dari Tegangan Generator Sinkron dalam Kondisi Paralel.....	74
Gambar 4.10 Hasil Pengujian Respon Step dari Tegangan Generator Sinkron dalam Kondisi <i>Stand Alone</i> .....	74
Gambar 4.11 Pengujian Frekuensi Generator Sinkron <i>Stand Alone</i> Beban 615 watt Tanpa Kendali.....	77
Gambar 4.12 Pengujian Frekuensi Generator Sinkron <i>Stand Alone</i> Beban 615 watt Dengan Kendali.....	77
Gambar 4.13 Pengujian Tegangan Generator Sinkron <i>Stand Alone</i> Beban 615 watt Tanpa Kendali.....	77
Gambar 4.14 Pengujian Tegangan Generator Sinkron <i>Stand Alone</i> Beban 615 watt Dengan Kendali.....	78

Gambar 4.15 Pengujian Frekuensi Generator Sinkron <i>Stand Alone</i> Beban 1095 watt Tanpa Kendali.....	79
Gambar 4.16 Pengujian Frekuensi Generator Sinkron <i>Stand Alone</i> Beban 1095 watt Dengan Kendali.....	79
Gambar 4.17 Pengujian Tegangan Generator Sinkron <i>Stand Alone</i> Beban 1095 watt Tanpa Kendali saat Beban Dinyalakan.....	80
Gambar 4.18 Pengujian Tegangan Generator Sinkron <i>Stand Alone</i> Beban 1095 watt dengan Kendali saat Beban Dinyalakan.....	80
Gambar 4.19 Pengujian Frekuensi Generator Sinkron Beroperasi Paralel Beban 615 watt dengan Kendali .....	82
Gambar 4.20 Pengujian Tegangan Generator Sinkron Beroperasi Paralel Beban 615 watt dengan Kendali .....	82
Gambar 4.21 Pengujian Frekuensi Generator Sinkron Beroperasi Paralel dengan Beban 1095 watt dengan Kendali .....	84
Gambar 4.22 Pengujian Tegangan Generator Sinkron Beroperasi Paralel dengan Beban 1095 watt dengan Kendali saat Beban Dihidupkan.....	84
Gambar 4.23 Pengujian Frekuensi Generator Sinkron Beroperasi Paralel saat Bank Kapasitor Diubah dengan Kendali.....	85
Gambar 4.24 Pengujian Tegangan Generator Sinkron Beroperasi Paralel saat Bank Kapasitor Diubah dengan Kendali.....	86
Gambar 4.25 Pengujian Frekuensi Generator Sinkron Bekerja Paralel, Tanpa Beban dengan Kecepatan Penggerak Mula Generator Induksi B Naik Menjadi 1230 RPM Menggunakan Kendali Otomatis.....	87
Gambar 4.26 Pengujian Tegangan Generator Sinkron Bekerja Paralel, Tanpa Beban dengan Kecepatan Penggerak Mula Generator Induksi B Naik Menjadi 1230 RPM Menggunakan Kendali Otomatis.....	87
Gambar 4.27 Pengujian Frekuensi Generator Sinkron Bekerja Paralel, dengan Kecepatan Penggerak Mula Generator Induksi B Turun Menjadi 1030 RPM Tanpa Beban dengan Kendali Otomatis .....	89
Gambar 4.28 Pengujian Tegangan Generator Sinkron Bekerja Paralel, dengan Kecepatan Penggerak Mula Generator Induksi B Turun Menjadi 1030 RPM Tanpa Beban dengan Kendali Otomatis .....	89

Gambar 4.29 Pengujian Frekuensi Generator Sinkron Bekerja Paralel, dengan Kecepatan Penggerak Mula Generator Induksi B Turun menjadi 1030 RPM dan Beban 615 watt Dihidupkan dengan Kendali Otomatis.....	90
Gambar 4.30 Pengujian Tegangan Generator Sinkron Bekerja Paralel, dengan Kecepatan Penggerak Mula Generator Induksi B Turun menjadi 1030 RPM dan Beban 615 watt Dihidupkan dengan Kendali Otomatis.....	91
Gambar 4.31 Pengujian Frekuensi Generator Sinkron Bekerja Paralel, dengan Kecepatan Penggerak Mula Generator Induksi B Naik Menjadi 1230 RPM dan Beban 615 watt Dihidupkan dengan Kendali Otomatis.....	92
Gambar 4.32 Pengujian Tegangan Generator Sinkron Bekerja Paralel, dengan Kecepatan Penggerak Mula Generator Induksi B Naik Menjadi 1230 RPM dan Beban 615 watt Dihidupkan dengan Kendali Otomatis.....	92
Gambar 6.1 Generator Sinkron 7.5 kW dan Penggerak Mula 5.5 kW [8].....	98
Gambar 6.2 Generator Induksi A 1.5 kW dan Penggerak Mula 2.2 kW [8] .....	98
Gambar 6.3 Generator Induksi B 1.5 kW dan Penggerak Mula 2.2 kW [8].....	99
Gambar 6.4 Sistem Pengendali Penggerak Mula [8] .....	99
Gambar 6.5 Capacitor Bank [8] .....	99
Gambar 6.6 Busbar [8].....	100
Gambar 6.7 Beban Elektris [8] .....	100
Gambar 6.8 <i>Testbed Microgrid</i> [8].....	100
Gambar 6.9 <i>DC Chopper, LC Filter, Gate Driver</i> dan Sensor Tegangan.....	101
Gambar 6.10 Keluaran <i>DC Chopper</i> Setelah Filter .....	101
Gambar 6.11 Keluaran <i>DC Chopper</i> Tanpa Filter (Menggunakan Multimeter) .....	102
Gambar 6.12 Sensor Frekuensi .....	102
Gambar 6.13 Keluaran Sensor Frekuensi .....	103
Gambar 6.14 Sensor Tegangan .....	103
Gambar 6.15 Keluaran Sensor Tegangan Tanpa <i>Rectifier</i> .....	104
Gambar 6.16 Keluaran Sensor Tegangan Setelah <i>Rectifier</i> .....	104