



TESIS - TE142599

**PENGATURAN KONVERTER DC-DC
BIDIRECTIONAL DENGAN MPPT BERBASIS
MODIFIED PERTURBATION AND OBSERVATION
PADA SISTEM TURBIN ANGIN**

RACHMA PRILIAN EVININGSIH
NRP. 2215201009

DOSEN PEMBIMBING
Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Prof. Dr.Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TE142599

**PENGATURAN KONVERTER DC-DC
BIDIRECTIONAL DENGAN MPPT BERBASIS
MODIFIED PERTURBATION AND OBSERVATION
PADA SISTEM TURBIN ANGIN**

RACHMA PRILIAN EVININGSIH
NRP 2215201009

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Prof. Dr.Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



THESIS - TE142599

THE CONTROL OF BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER WITH MPPT BASED ON MODIFIED PERTURBATION AND OBSERVATION ON THE WIND TURBINE SYSTEM

RACHMA PRILIAN EVININGSIH
NRP 2215201009

SUPERVISOR

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Prof. Dr.Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng

MAGISTER PROGRAM
POWER SYSTEM ENGINEERING
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Oleh:


Rachma Prilian Eviningsih
NRP. 2215201009

Tanggal Ujian : 9 Januari 2017
Periode Wisuda : Maret 2017

Disetujui oleh:


1. Dr. Ardyono Privadi, ST, M.Eng. (Pembimbing I)
NIP. 197309271998031004


2. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng. (Pembimbing II)
NIP. 195809161986011001


3. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT. (Penguji)
NIP. 196404051990021001


4. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. (Penguji)
NIP. 196603181990101001


5. Dr. Ir. Soedibyo, MMT. (Penguji)
NIP. 195512071980031004

an. Direktur Program Pascasarjana

Asisten Direktur


Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng.
NIP. 196110211986031001

Direktur Program Pascasarjana

Prof. Ir. Diauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.
NIP. 196012021987011001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**PENGATURAN KONVERTER DC-DC *BIDIRECTIONAL* DENGAN MPPT BERBASIS *MODIFIED PERTURBATION AND OBSERVATION* PADA SISTEM TURBIN ANGIN**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 16 Januari 2017

Rachma Prilian Eviningsih
NRP. 2215201009

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENGATURAN KONVERTER DC-DC *BIDIRECTIONAL* DENGAN MPPT BERBASIS *MODIFIED PERTURBATION* *AND OBSERVATION* PADA SISTEM TURBIN ANGIN

Nama mahasiswa : Rachma Prilian Eviningsih
NRP : 2215201009
Pembimbing : 1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
2. Prof. Dr.Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.

ABSTRAK

Sistem turbin angin sangat dipengaruhi oleh kondisi angin yang fluktuatif, sehingga menyebabkan daya keluaran pada sistem turbin angin pun juga mengalami fluktuasi dan daya pada DC Bus tidak akan konstan. Oleh karena itu, pada sistem turbin angin membutuhkan baterai sebagai penyimpan energi. Ketika daya keluaran pada sistem turbin angin dengan generator PMSG melebihi kebutuhan daya beban maka daya akan disimpan ke dalam baterai (mode pengisian). Begitu juga sebaliknya, ketika daya yang dibangkitkan sistem turbin angin-PMSG tidak mampu memenuhi kebutuhan beban maka baterai akan membantu menyuplai daya yang dibutuhkan (mode pengosongan). Operasi pengisian dan pengosongan baterai diatur dengan menggunakan konverter *bidirectional*. Konverter DC-DC *bidirectional* dapat bekerja dalam dua mode, yaitu mode pengisian baterai (*mode buck*) dan mode pengosongan baterai (*mode boost*). Metode pencarian daya maksimal dengan menggunakan metode berbasis *Modified Perturbation and Observation* (P&O) juga digunakan untuk mengatur pensaklaran pada konverter *boost* sehingga didapatkan *Maximum Power Point* (MPP) dari sistem turbin angin. Hasil dari penelitian ini mampu mempercepat kondisi tunak pencarian daya maksimal jika dibandingkan dengan metode P&O konvensional. Serta konverter *bidirectional* mampu mengatur proses pengisian dan pengosongan baterai dengan baik.

Kata kunci: konverter DC-DC *bidirectional*, *Modified Perturbation and Observation*, turbin angin.

Halaman ini sengaja dikosongkan

THE CONTROL OF BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER WITH MPPT BASED ON MODIFIED PERTURBATION AND OBSERVATION ON THE WIND TURBINE SYSTEM

By : Rachma Prilian Eviningsih
Student Identity Number : 2215201009
Supervisor(s) : 1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
: 2. Prof. Dr.Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.

ABSTRACT

Wind turbine system is influenced by wind conditions changing, causing the output power at the wind turbine system also fluctuated and power on the DC bus will not be constant. Therefore, the wind turbine system on a stand-alone condition requires a battery as energy storage. When the output power of Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) on wind turbine system is greater than the required power load, it will be stored in the battery (charging mode). Likewise, when the power generated PMSG not able to serve the power requirements of the load, the battery will also supply the required power (discharge mode). Battery charge and discharge operation is set by using a converter. Bidirectional DC-DC converter can work in two modes, namely battery charging mode (buck mode) and a battery discharge mode (boost mode). Maximum power tracking method based on Modified Perturbation and Observation (P&O) is also used to set the switching boost converter to obtain the Maximum Power Point (MPP) of a wind turbine system. The results of this study could accelerate the steady conditions in the maximum power tracking compared to the conventional P&O method and bidirectional converter is able to regulate the process of charging and discharging the battery properly.

Keywords: Bidirectional DC-DC converter, Modified Perturbation and Observation, wind turbine.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis diberikan kemudahan dalam menyelesaikan Tesis yang berjudul: ***Pengaturan Konverter DC-DC Bidirectional dengan MPPT Berbasis Modified Perturbation and Observation pada Sistem Turbin Angin*** tepat pada waktunya. Tesis ini disusun dengan tujuan untuk memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Bidang Studi Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Sepuluh Nopember Surabaya.

Saat menyusun tesis ini, penulis tidak lepas dari yang namanya kesulitan dalam penyelesaiannya. Namun, dengan bantuan dari pihak-pihak yang rela ikhlas membantu akhirnya selesailah Tesis ini dengan baik. Untuk itu, pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Segenap keluarga penulis, Ayahanda Epyk Sunarno dan Ibunda Suratiningsih, serta adik tercinta M. Ilham Fatqurrochman yang telah memberikan doa, semangat, dan dukungan kepada penulis.
2. Bapak Prof. Dr.Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng dan Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing penulis yang telah rela meluangkan banyak waktu untuk membimbing penulis, memberikan saran, dan bantuan, dan juga pengetahuan sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan baik dan lancar.
3. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT., Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT., dan Dr. Ir. Soediby, MMT. selaku anggota Dewan Penguji yang telah banyak memberikan saran dan kritik dalam penyelesaian tesis ini.
4. Keluarga besar Jurusan Teknik Elektro, baik para dosen, karyawan yang telah meluangkan waktunya untuk mendidik dan membantu penulis selama menjalani perkuliahan di ITS.
5. Keluarga besar Laboratorium LIPIST, Bapak Dosen, Bapak Ibu Mahasiswa S3, member S2, dan adik asisten laboratorium atas kerjasamanya dan dukungannya kepada penulis selama ini.

6. Team Riset Turbin Angin Laboratorium LIPIST, Ibu Ratna, Mas Irwan, Mas Multazam, Sefri, dan Dwiyan atas bimbingan, dukungan, dan kerjasamanya selama ini sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini dengan baik dan tepat waktu.
7. Jauhari, Maya, Dini, Mbak Ayusta, Mbak Nita, Mbak Nuha, Mas Yoakim, dan Mas Vicky atas bantuan, dukungan, dan semangat serta telah menjadi teman yang sangat baik bagi penulis selama menjalani perkuliahan di ITS.
8. Seluruh keluarga besar e-51 atas dukungan dan semangat untuk penulis. Dan penulis juga berterima kasih kepada kalian yang telah menjadi keluarga kedua bagi penulis yang tidak akan pernah penulis lupakan.
9. Teman-teman angkatan 2014 Ganjil atas dukungan dan bantuannya kepada penulis selama menjalani perkuliahan di ITS.
10. Teman-teman angkatan 2014 Genap atas dukungan dan bantuannya kepada penulis selama menjalani perkuliahan di ITS.
11. Teman-teman angkatan 2015 Ganjil atas dukungan dan bantuannya kepada penulis selama menjalani perkuliahan di ITS.
12. Teman-teman angkatan 2015 Genap atas dukungan dan bantuannya kepada penulis selama menjalani perkuliahan di ITS.
13. Dan semua pihak yang telah membantu penulis yang tidak dapat disebut satu-satu.

Penulis berharap dengan penyusunan Tesis ini dapat menjadikan suatu manfaat dan sumbangan pemikiran kepada pembaca yang lainnya. Penulis juga mengharapkan kritik dan saran dari pembaca untuk kemajuan Tesis ini dimasa yang akan datang. Penulis juga memohon maaf apabila terdapat kekurangan pada Tesis kali ini.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Kontribusi	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	5
2.1 Turbin Angin.....	5
2.2 Permanent Magnet Synchronous Generator	6
2.3 Maximum Power Point Tracking dengan menggunakan Modified Perturbation and Observation	6
2.3.1 Perturbation and Observartion	7
2.3.2 Modified Perturbation and Observartion	9
2.4 Konverter Rectifier 3 Fasa	10
2.5 Konverter Boost - Bidirectional.....	11
2.6 Konverter DC-DC.....	12
2.6.1 Konverter Buck	13
2.6.2 Konverter Boost	15
2.7 Konverter DC-DC Bidirectional.....	17
2.7.1 Mode Buck pada Konverter DC-DC Bidirectional.....	19
2.7.2 Mode Boost pada Konverter DC-DC Bidirectional.....	20
2.8 Pemodelan Baterai	22

BAB 3 PERANCANGAN DAN PEMODELAN SISTEM TURBIN ANGIN	25
3.1 Konfigurasi Sistem	25
3.2 Parameter Modul Sistem Turbin Angin	26
3.2.1 Parameter Motor Induksi	26
3.2.2 Parameter Permanent Magnet Synchronous Generator	27
3.2.3 Rectifier 3 Fasa	28
3.2.4 Konverter Boost	28
3.3 Perancangan Konverter DC-DC Bidirectional	29
3.3.1 Mode Boost	29
3.3.2 Mode Buck	31
3.4 Parameter Baterai Lead Acid	33
3.5 Perancangan Algoritma Modified Perturb and Observe	34
3.6 Sensor Tegangan	35
3.7 Perancangan Sensor Arus	36
BAB 4 HASIL PENGUJIAN SIMULASI, PROTOTYPE, DAN ANALISIS DATA	39
4.1 Pengujian Simulasi Kinerja Algoritma MPPT	39
4.1.1 Kinerja Metode MPPT pada Sistem Turbin Angin	40
4.2 Pengujian Simulasi Sistem Turbin Angin saat Kondisi Statis	48
4.2.1 Kondisi Saat Daya Sistem Turbin Angin melebihi Daya Beban ($P_{wind} > P_{beban}$)	50
4.2.2 Kondisi Saat Daya Beban melebihi Daya Sistem Turbin Angin ($P_{beban} > P_{wind}$)	51
4.3 Hasil Pengujian Hardware MPPT	53
4.3.1 Pengujian Algoritma pada Kecepatan 300 RPM	56
4.3.2 Pengujian Algoritma pada Kecepatan 400 RPM	58
4.3.3 Pengujian Algoritma pada Kecepatan 500 RPM	60
4.3.4 Pengujian Algoritma pada Kecepatan 600 RPM	63
4.4 Hasil Pengujian Konverter Bidirectional	65
4.5 Hasil Pengujian Integrasi	66
4.5.1 Pengujian Modul Turbin Angin - Bidirectional saat Mode Buck (Charging)	66
4.5.2 Pengujian Konverter Boost-Bidirectional saat Mode Boost (Discharging)	67

BAB 5 PENUTUP.....	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	70
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	73
BIODATA PENULIS	81

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram Alir MPPT dengan menggunakan Algoritma P&O [6].....	8
Gambar 2. 2 Diagram Alir MPPT dengan menggunakan Algoritma Modified P&O.....	9
Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen Penyearah 3 Fasa Tidak Terkontrol.	10
Gambar 2. 4 Rangkaian Ekuivalen Konverter Boost –Bidirectional pada Sistem Turbin Angin.....	11
Gambar 2. 5 Aliran Daya dari Sistem Turbin Angin menuju konverter Boost- Bidirectional.....	12
Gambar 2. 6 Rangkaian Konverter Buck.	13
Gambar 2. 7 Rangkaian Konverter Buck saat kondisi Saklar “ON”	14
Gambar 2. 8 Rangkaian Konverter Buck saat kondisi Saklar “OFF”.....	14
Gambar 2. 9 Rangkaian Konverter Boost.	17
Gambar 2. 10 Rangkaian Konverter Boost saat kondisi Saklar “ON”.....	17
Gambar 2. 11 Rangkaian Konverter Boost saat kondisi Saklar “OFF”.....	17
Gambar 2. 12 Rangkaian Konverter DC-DC Bidirectional.	18
Gambar 2. 13 Pemodelan Saklar pada Konverter DC-DC Bidirectional.....	18
Gambar 2. 14 Mode Buck pada Konverter DC-DC Bidirectional saat Saklar Buck dalam kondisi Closed.	19
Gambar 2. 15 Rangkaian Pengganti saat Saklar Buck dalam kondisi Closed.	19
Gambar 2. 16 Mode Buck pada Konverter DC-DC Bidirectional saat Saklar Buck dalam kondisi Open.....	20
Gambar 2. 17 Rangkaian Pengganti saat Saklar Buck dalam kondisi Open.....	20
Gambar 2. 18 Mode Boost pada Konverter DC-DC Bidirectional saat Saklar Boost dalam kondisi Closed.....	21
Gambar 2. 19 Rangkaian Pengganti saat Saklar Boost dalam kondisi Closed.	21
Gambar 2. 20 Mode Boost pada Konverter DC-DC Bidirectional saat Saklar Boost dalam kondisi Open.	22
Gambar 2. 21 Rangkaian Pengganti saat Saklar Boost dalam kondisi Open.....	22
Gambar 2. 22 Rangkaian Ekuivalen Baterai Non-Linear.	23

Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	25
Gambar 3. 2 Blok Diagram Sistem.....	26
Gambar 3. 3 Emulator Berbasis Laboratorium Sistem Turbin Angin dan PMSG.	27
Gambar 3. 4 Rangkaian Full Wave Rectifier 3 Fasa.	28
Gambar 3. 5 Rangkaian Ekuivalen Konverter Boost.	28
Gambar 3. 6 Rangkaian Konverter DC-DC Bidirectional.....	29
Gambar 3. 7 Rangkaian Ekuivalein saat Mode Boost.	30
Gambar 3. 8 Rangkaian Ekuivalein saat Mode Buck.....	32
Gambar 3. 9 Rangkaian Sensor Tegangan.....	35
Gambar 3. 10 Rangkaian ACS 712.	37
Gambar 4. 1 Desain Rangkaian untuk Pengujian Simulasi MPPT.....	39
Gambar 4. 2 Respon Simulasi Duty Cycle dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 12 m/s.....	40
Gambar 4. 3 Respon Simulasi Daya Rectifier dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 12 m/s.....	41
Gambar 4. 4 Respon Simulasi Tegangan Rectifier dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 12 m/s.....	41
Gambar 4. 5 Respon Simulasi Arus Rectifier dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 12 m/s.....	41
Gambar 4. 6 Respon Simulasi Duty Cycle dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 8 m/s.....	42
Gambar 4. 7 Respon Simulasi Daya Rectifier dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 8 m/s.....	42
Gambar 4. 8 Respon Simulasi Tegangan Rectifier dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 8 m/s.....	43
Gambar 4. 9 Respon Simulasi Arus Rectifier dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 8 m/s.....	43
Gambar 4. 10 Respon Simulasi Duty Cycle dengan Algoritma Modified P&O saat Kecepatan Angin 12 m/s.	44
Gambar 4. 11 Respon Simulasi Daya Rectifier dengan Algoritma Modified P&O saat Kecepatan Angin 12 m/s.	44

Gambar 4. 12 Respon Simulasi Tegangan Rectifier dengan Algoritma Modified P&O saat Kecepatan Angin 12 m/s.....	45
Gambar 4. 13 Respon Simulasi Arus Rectifier dengan Algoritma Modified P&O saat Kecepatan Angin 12 m/s.....	45
Gambar 4. 14 Respon Simulasi Duty Cycle dengan Algoritma Modified P&O saat Kecepatan Angin 8 m/s.....	46
Gambar 4. 15 Respon Simulasi Daya Rectifier dengan Algoritma Modified P&O saat Kecepatan Angin 8 m/s.....	46
Gambar 4. 16 Respon Simulasi Tegangan Rectifier dengan Algoritma Modified P&O saat Kecepatan Angin 8 m/s.....	46
Gambar 4. 17 Respon Simulasi Arus Rectifier dengan Algoritma Modified P&O saat Kecepatan Angin 8 m/s.....	47
Gambar 4. 18 Variasi Kecepatan Angin.....	47
Gambar 4. 19 Respon Hasil Simulasi Perbandingan Kinerja MPPT dengan Variasi Kecepatan Angin.....	48
Gambar 4. 20 Desain Rangkaian Untuk Pengujian Simulasi Sistem Saat Kondisi Statis.....	49
Gambar 4. 21 Aliran Daya pada setiap Kondisi.....	50
Gambar 4. 22 Tegangan dan SOC Baterai saat Kondisi $P_{wind} > P_{beban}$	51
Gambar 4. 23 Tegangan Bus DC saat Kondisi $P_{wind} > P_{beban}$	51
Gambar 4. 24 Tegangan dan SOC Baterai saat Kondisi $P_{beban} > P_{wind}$ saat Kecepatan Angin 10 m/s.....	52
Gambar 4. 25 Tegangan Bus DC saat Kondisi $P_{beban} > P_{wind}$ pada Kecepatan Angin 10 m/s.....	52
Gambar 4. 26 Modul Perangkat Keras yang Digunakan untuk Pengujian.....	53
Gambar 4. 27 Emulator Berbasis Laboratorium Turbin Angin dan PMSG.....	54
Gambar 4. 28 Kurva Karakteristik Daya Rectifier terhadap RPM.....	55
Gambar 4. 29 Kurva Karakteristik Daya Rectifier terhadap Duty Cycle.....	55
Gambar 4. 30 Kurva Daya Rectifier saat Kecepatan 300 RPM.....	56
Gambar 4. 31 Kurva Hasil Pengujian Daya Rectifier dengan Metode P&O.....	56
Gambar 4. 32 Kurva Hasil Pengujian Daya Rectifier dengan Metode Modified P&O.....	57

Gambar 4. 33 Kurva Hasil Pengujian Daya Rectifier dengan Metode P&O dan Modified P&O.	57
Gambar 4. 34 Kurva Daya Rectifier saat Kecepatan 400 RPM.	58
Gambar 4. 35 Kurva Hasil Pengujian Daya Rectifier dengan Metode P&O.	59
Gambar 4. 36 Kurva Hasil Pengujian Daya Rectifier dengan Metode Modified P&O.	59
Gambar 4. 37 Kurva Hasil Pengujian Daya Rectifier dengan Metode P&O dan Modified P&O.	60
Gambar 4. 38 Kurva daya rectifier saat kecepatan 500 RPM.	61
Gambar 4. 39 Kurva Hasil Pengujian Daya Rectifier dengan Metode P&O.	61
Gambar 4. 40 Kurva Hasil Pengujian Daya Rectifier dengan Metode Modified P&O.	62
Gambar 4. 41 Kurva hasil pengujian daya rectifier dengan metode P&O dan Modified P&O.	62
Gambar 4. 42 Kurva daya rectifier saat kecepatan 600 RPM.	63
Gambar 4. 43 Kurva Hasil Pengujian Daya Rectifier dengan Metode P&O.	63
Gambar 4. 44 Kurva Hasil Pengujian Daya Rectifier dengan Metode Modified P&O.	64
Gambar 4. 45 Kurva hasil pengujian daya rectifier dengan metode P&O dan Modified P&O.	64
Gambar 4. 46 Modul Rangkaian Konverter Bidirectional.	65
Gambar 4. 47 Hasil Pengujian Integrasi saat Mode Konverter Buck (Charging Baterai).	67
Gambar 4. 48 Hasil Pengujian Integrasi saat Mode Boost (Discharging Baterai).	68

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Motor Induksi Tipe A-Y3-905	26
Tabel 3. 2 Spesifikasi Generator PMSG Tipe TD 500 Neidex	27
Tabel 3. 3 Parameter Konverter Boost	29
Tabel 3. 4 Spesifikasi Konverter Bidirectional saat Mode Boost	30
Tabel 3. 5 Spesifikasi Konverter Bidirectional saat Mode Buck	31
Tabel 3. 6 Spesifikasi Baterai NP SERIES - NP7-12	33
Tabel 3. 7 Parameter Baterai	33
Tabel 3. 8 Parameter Algoritma Perturb and Observe	34
Tabel 3. 9 Parameter Algoritma Perturb and Observe	35
Tabel 4. 1 Aliran Daya pada Sistem saat Kondisi $P_{wind} > P_{beban}$ pada Kondisi Kecepatan Angin 12 m/s	50
Tabel 4. 2 Aliran Daya pada Sistem saat Kondisi $P_{beban} > P_{wind}$ pada Kondisi Kecepatan Angin 10 m/s	52
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Integrasi saat Mode Konverter Buck untuk Charging Baterai	66
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Integrasi saat Mode Konverter Boost untuk Proses Load Sharing pada DC Bus	68

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

AC	= <i>Alternating Current</i>
DC	= <i>Direct Current</i>
PWM	= <i>Pulse Width Modulation</i>
PID	= <i>Proportional-Integral-Derivative</i>
PMSG	= <i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
MPP	= <i>Maximum Power Point</i>
MPPT	= <i>Maximum Power Point Tracking</i>
P&O	= <i>Perturbation and Observation</i>
HCS	= <i>hill-climb searching</i>
MP&O	= <i>Modified Perturbation and Observation</i>
SOC	= <i>State of Charge</i>
IGBT	= <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
MOSFET	= <i>Metal Oxyde Semi Conductor</i>
P_{wind}	= daya mekanik pada turbin angin
ρ	= kerapatan udara (1,225 kg/m ³)
π	= phi (3,14)
R_b	= jari-jari <i>blade</i> pada turbin angin (m ²)
V_w	= kecepatan angin (m/s)
P_m	= daya mekanik
C_p	= koefisien daya pada turbin angin
λ, TSR	= <i>tip speed ratio</i>
β	= <i>pitch angle</i> (derajat)
$c_1 - c_6$	= konstanta empiris
ω_R	= kecepatan putar pada turbin (rad/s)
T_m	= torsi mekanik pada turbin (Newton.meter atau Nm)
p	= jumlah pasang kutub
λ_m	= fluks magnetik
V_d	= tegangan di sisi d
V_q	= tegangan di sisi q

i_d	= arus di sisi d
i_q	= arus di sisi q
L_d	= nilai induktor di sisi d
L_q	= nilai induktor di sisi q
R_s	= nilai resistansi pada stator
ω	= frekuensi sudut listrik
V	= tegangan fasa
L_s	= nilai induktansi pada generator
T_e	= torsi elektrik
ΔD	= <i>step size</i>
D	= <i>duty cycle</i>
V_{in}	= tegangan masukan
V_L	= tegangan induktor
V_{out}	= tegangan keluaran
Δi_L	= riak arus induktor
f_s	= frekuensi pensaklaran
T	= periode pensaklaran
ΔV_o	= riak tegangan kapasitor
t_{off}	= waktu saklar padam
t_{on}	= waktu saklar menyala
L	= induktor
C	= kapasitor
R	= resistansi, beban
E	= tegangan tanpa beban
E_0	= tegangan konstan baterai
K	= tegangan polarisasi
Q	= kapasitas baterai (Ah),
A	= amplitudo daerah eksponensial
B	= konstanta waktu invers daerah eksponensial (Ah^{-1})
E_{full}	= tegangan baterai saat terisi penuh
E_{exp}	= tegangan baterai saat kondisi eksponensial

E_{nom} = tegangan nominal baterai

Q_{exp} = muatan baterai saat kondisi eksponensial

Q_{nom} = muatan nominal baterai

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Populasi penduduk yang semakin bertambah setiap tahun membuat permintaan akan pasokan listrik bertambah sedangkan ketersediaan sumber energi tak terbarukan semakin menipis dan polusi yang juga semakin meningkat karena masih menggunakan energi yang berasal dari batu-bara, minyak dan sebagainya. Oleh karena itu, banyak negara termasuk Indonesia yang beralih dari energi tak terbarukan ke energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan dan tidak pernah habis pasokannya contohnya saja seperti air, energi angin, ataupun energi matahari [1-2].

Salah satu energi terbarukan yang sedang dikembangkan di Indonesia adalah energi angin. Namun sumber energi terbarukan termasuk energi angin sangat dipengaruhi oleh kondisi angin yang berubah-ubah sehingga dapat menyebabkan adanya fluktuasi daya disisi beban. Oleh karena itu, pada sistem turbin angin sangat dibutuhkan penyimpan energi listrik, seperti baterai yang dapat menjaga kestabilan daya disisi beban walaupun terjadi fluktuasi angin secara tiba-tiba. Baterai ini dapat bekerja sebagai sumber beban dan dapat sebagai beban. Saat kecepatan angin tinggi dan kebutuhan daya pada beban sudah terpenuhi, maka baterai akan sebagai beban sehingga kelebihan daya tersebut akan dibuang ke baterai (mode pengisian). Sebaliknya, jika kecepatan angin rendah, maka baterai akan ikut membantu menyuplai daya di sisi beban agar tetap terjaga konstan (mode pengosongan) [2].

Konverter dc-dc *bidirectional* dapat menjadi salah satu pilihan yang dapat digunakan untuk mengatasi masalah mengenai penyimpanan energi. Dengan menerapkan konverter dc-dc *bidirectional* pada turbin angin dapat menggabungkan dua tipe sumber energi yang berbeda dengan melalui input ganda pada konverter dc-dc *bidirectional*. Konverter ini mempunyai dua mode yaitu mode pengisian baterai (mode *buck*) dan mode pengosongan baterai yang dapat digunakan sebagai suplai beban (mode *boost*) [3].

Pada penelitian kali ini akan dilakukan perancangan kontrol pada konverter dc-dc *bidirectional* sebagai penyimpan dan penyedia daya pada turbin

angin saat *stand-alone* sehingga dapat bekerja dalam dua mode pengisian dan pengosongan secara bergantian. Sumber bus DC diasumsikan berasal dari tegangan AC keluaran dari PMSG yang kemudian directifierkan menjadi tegangan DC kemudian di *boost* (dinaikkan tegangan DCnya) yang akan menjadi suplai beban dan pengisian baterai, sedangkan sumber yang berasal dari baterai digunakan untuk membantu suplai beban ketika turbin angin tidak mampu mensuplai beban. Metode *modified perturbation and observation* juga digunakan untuk mengatur pensaklaran pada konverter *boost* sehingga didapatkan Maximum Power Point (MPP) dari sistem turbin angin.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang diangkat pada penelitian kali ini adalah sebagai berikut ini:

1. Sistem turbin angin tidak dapat mencapai titik daya maksimumnya jika tanpa menggunakan metode algoritma MPPT.
2. Mengurangi osilasi di titik puncak dan mempercepat *tracking* pada algoritma MPPT dapat dilakukan dengan cara memodifikasi algoritma tersebut.
3. Sistem kontrol untuk pengaturan aliran daya pada sistem turbin angin dan baterai sangat diperlukan agar sistem dapat berjalan dengan baik.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian kali ini adalah :

1. Untuk mengekstrak daya maksimum pada sistem turbin angin menggunakan PMSG dengan metode *modified perturbation and observation*.
2. Pada sistem turbin angin menggunakan topologi konverter *boost-bidirectional*.
3. Konverter *bidirectional* yang dapat bekerja dengan dua mode, yaitu mode pengisian baterai (mode *buck*) dan mode pengosongan baterai (mode *boost*).

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini terdapat beberapa batasan, antara lain:

1. Untuk pengujian *software*, sistem turbin angin dan PMSG menggunakan parameter yang terdapat pada *software* PSIM.
2. Untuk pengujian *hardware*, kecepatan angin dimodelkan dengan menggunakan motor induksi sebagai *primemover* PMSG. Untuk peralatan seperti *rectifier*, konverter *boost*, dan sensor, merupakan modul laboratorium yang sudah jadi sehingga tidak dibahas secara mendetail.
3. Optimasi daya output pada sistem turbin angin dengan menggunakan algoritma P&O dan modified P&O.
4. Konverter *bidirectional* dapat bekerja dengan dua mode, yaitu dapat menyalurkan energi dari sumber turbin angin ke baterai dan juga dapat menyalurkan energi dari baterai ke beban.

1.5 Kontribusi

Berdasarkan metode yang digunakan pada sistem pengaturan konverter DC-DC bidirectional dengan MPPT berbasis *Modified Perturbation and Observation* pada sistem turbin angin maka diharapkan penelitian ini memberikan kontribusi sebagai berikut:

1. Memberikan metode yang lebih cepat dan akurat dalam mencari daya maksimum pada sistem turbin angin.
2. Mengaplikasikan sistem pengaturan pada integrasi turbin angin dan konverter dc-dc *bidirectional* untuk kontinuitas suplai daya beban.
3. Menjadi referensi untuk pengembangan penelitian tentang integrasi sistem turbin angin dan konverter dc-dc *bidirectional*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Pada bab ini, akan dijelaskan beberapa teori penunjang yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan.

2.1 Turbin Angin

Menurut referensi [4], daya mekanik pada turbin angin dapat dituliskan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho \pi R_b^2 V_w^3 \quad (2.1)$$

Persamaan berikut ini merupakan hubungan antara daya mekanik dengan koefisien *tip speed ratio* (TSR):

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R_b^2 V_w^3 \quad (2.2)$$

C_p merupakan koefisien daya pada turbin angin yang menggambarkan efisiensi dari turbin angin dalam mengkonversi energi kinetik dari angin menjadi energi putaran yang nantinya dapat memutar turbin angin. C_p memiliki nilai batasan yaitu 0,59 yang disebut juga dengan *Betz limit* [2]. Turbin angin tidak akan dapat beroperasi jika nilai C_p melebihi dari *Betz limit*. Hubungan antara TSR, *pitch angle*, dan koefisien daya pada turbin angin dapat digambarkan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (2.4)$$

Pitch angle dan *tip speed ratio* sangat tergantung pada kecepatan putar turbin dan kecepatan angin, seperti pada persamaan berikut ini:

$$\lambda = \frac{R\omega_R}{V_w} \quad (2.5)$$

Untuk mencari nilai torsi mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin dapat digunakan persamaan berikut ini:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (2.6)$$

2.2 Permanent Magnet Synchronous Generator

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) merupakan salah satu jenis generator sinkron yang banyak diaplikasikan pada sistem turbin angin dikarenakan memiliki beberapa kelebihan antara lain ukurannya yang kecil, memiliki kehandalan yang tinggi, tidak butuh pemeliharaan yang rumit, serta kerapatan daya yang lebih tinggi karena tidak memiliki belitan rotor. Jenis generator ini juga tidak memerlukan sistem eksitasi karena sumber eksitasi disediakan oleh magnet permanen yang berada pada rotor. Selain itu, desain yang sederhana dengan rotor tanpa kumparan medan, *slip ring*, dan tanpa sistem eksitasi juga membuat PMSG dapat meningkatkan efisiensi pada mesin. PMSG digunakan untuk aplikasi pada turbin tenaga angin yang rendah. Untuk memodelkan PMSG dapat digunakan transformasi Park seperti pada persamaan berikut ini [2]:

$$V_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega L_q i_q \quad (2.7)$$

$$V_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega L_d i_d + \omega \lambda_m \quad (2.8)$$

Torsi elektrik pada rotor dapat dimodelkan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$T_e = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_q i_d - \lambda_m i_q] \quad (2.9)$$

Jika rotor berbentuk silindris, maka $L_q \approx L_d \approx L_s$, maka:

$$T_e = \frac{3}{2} p \lambda_m i_q \quad (2.10)$$

2.3 Maximum Power Point Tracking dengan menggunakan Modified Perturbation and Observation

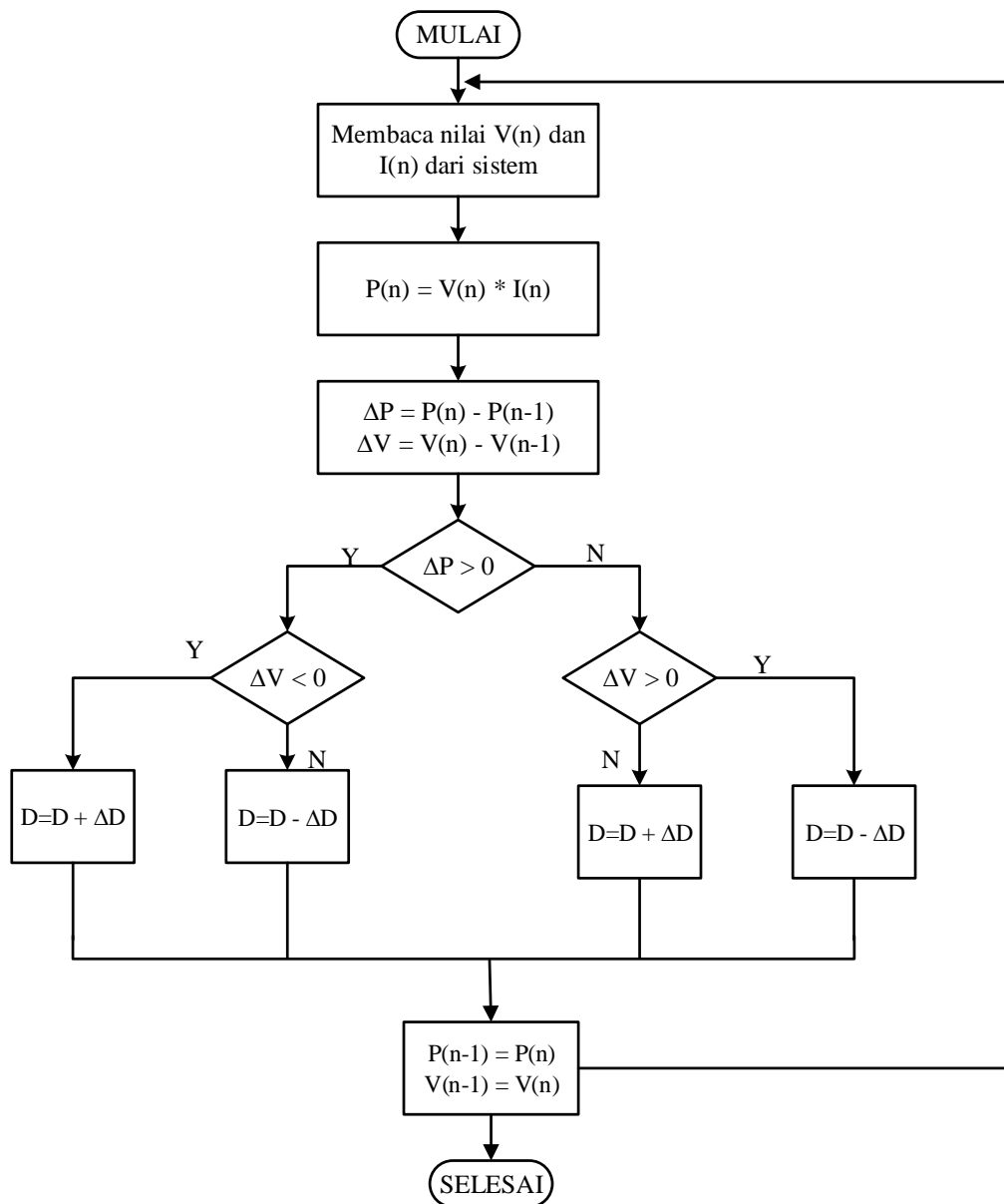
Untuk mendapatkan operasi optimal dari PMSG pada sistem turbin angin adalah dengan mendapatkan daya maksimal dari sistem turbin angin dengan menggunakan metode MPPT. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) merupakan sebuah metode pelacakan nilai daya maksimum dari sebuah sistem. MPPT digunakan untuk mendapatkan nilai tegangan dan arus yang optimal sehingga didapat daya keluaran yang maksimal dari sistem turbin angin. Daya keluaran yang maksimal ini akan menghasilkan efisiensi yang tinggi dan mengurangi rugi daya pada sistem tersebut.

2.3.1 *Perturbation and Observartion*

Menurut referensi [5], *perturbation and observation* (P&O) atau metode *hill-climb searching* (HCS), adalah teknik optimasi matematika yang digunakan untuk mencari titik optimum dari fungsi yang sudah diberikan. Oleh karena itu, metode ini banyak digunakan pada sistem turbin angin untuk menentukan titik operasi optimal yang dapat memaksimalkan energi yang telah diserap oleh turbin angin. Dengan menggunakan metode P&O, tidak perlu dipelajari terlebih dahulu mengenai karakteristik dari kurva turbin angin sehingga membuat metode ini lebih independen, sederhana, dan fleksibel.

Terdapat dua parameter utama yang digunakan dalam algoritma MPPT antara lain [6]:

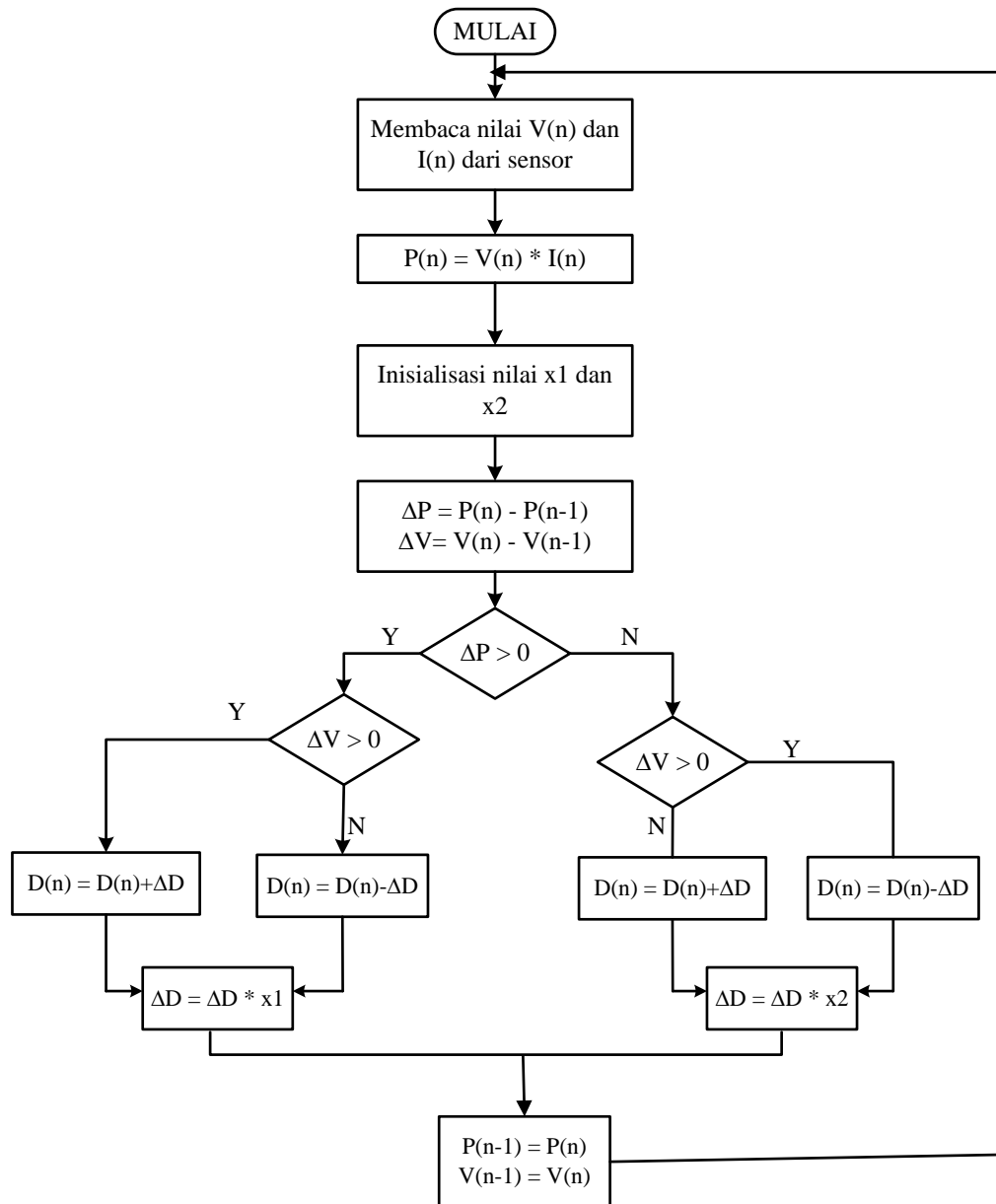
1. *Menentukan waktu gangguan yang tepat (T_a)*; untuk mengurangi osilasi pada algoritma P&O, maka waktu gangguan harus diatur lebih tinggi dibandingkan waktu penyelesaian pada sistem untuk *step size* (ΔD) pada *duty cycle*.
2. *Menentukan step size yang tepat (ΔD)*; menentukan nilai ΔD tidak mudah. Jika ΔD dimasukkan nilai yang tinggi (ΔD_{max}), maka kecepatan responnya lebih cepat tetapi banyak osilasi di sekitar titik puncak yang dapat menurunkan efisiensi. Sedangkan jika ΔD dimasukkan nilai kecil (ΔD_{min}), maka efisiensinya akan meningkat dikarenakan osilasi di sekitar titik puncak sedikit akan tetapi mengurangi kecepatan responnya.



Gambar 2. 1 Diagram Alir MPPT dengan menggunakan Algoritma P&O [6].

Algoritma P&O masih memiliki banyak kekurangan jika diterapkan pada sistem turbin angin menggunakan PMSG untuk mengekstrak daya maksimum karena tingkat efisiensi dari metode ini sangat bergantung pada besaran ΔD . Oleh karena itu, kekurangan pada algoritma metode P&O dapat diatasi dengan cara memodifikasi algoritma tersebut dengan mengubah besaran nilai ΔD . Dengan perubahan besaran nilai dari ΔD maka pada saat awal inisiasi nilai ΔD digunakan yang besar dan nantinya saat sudah mencapai titik nilai daya maksimum maka secara otomatis ΔD akan menjadi kecil.

2.3.2 Modified Perturbation and Observartion



Gambar 2. 2Diagram Alir MPPT dengan menggunakan Algoritma *Modified* P&O.

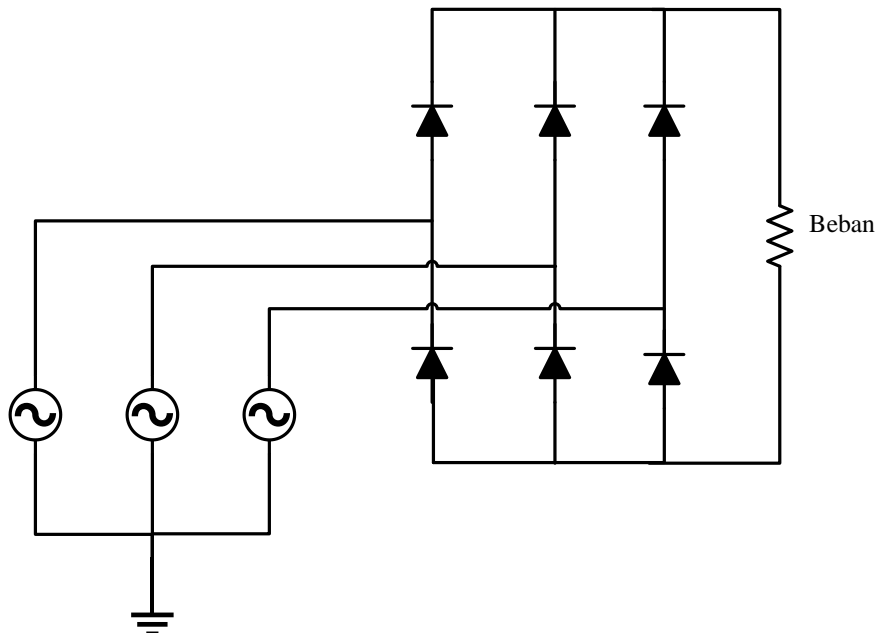
Pada gambar 2.2 menunjukkan diagram alir dari metode *modified* P&O untuk mengekstrak daya maksimum pada sistem turbin angin. Dengan melakukan modifikasi pada metode P&O, diharapkan dapat memberikan waktu yang lebih responsif dan dapat menghilangkan osilasi karena fluktuasi dari nilai daya saat mencapai nilai maksimum akan semakin berkurang karena perubahan dari nilai ΔD . Oleh karena itu, algoritma P&O dimodifikasi dengan mengalikan nilai ΔD dengan

konstanta x_1 dan x_2 dengan nilai antara 0,5 - 0,9 maka besaran ΔD akan semakin kecil.

2.4 Konverter Rectifier 3 Fasa

Seperti yang terdapat pada referensi [7], dijelaskan bahwa penyearah 6 pulsa merupakan salah satu jenis penyearah yang terdiri dari 6 buah saklar semikonduktor yang terbagi menjadi dua bagian yang setiap bagiannya terdiri dari 3 buah saklar dan masing-masing terhubung dengan setiap fasa R, S, dan T sebagai tegangan masukan dari konverter tersebut. Pada penelitian kali ini, konverter penyearah yang digunakan adalah penyearah 6 pulsa tidak terkontrol yang berupa dioda. Pada gambar 2.3 merupakan rangkaian ekuivalen penyearah 3 fasa tidak terkontrol.

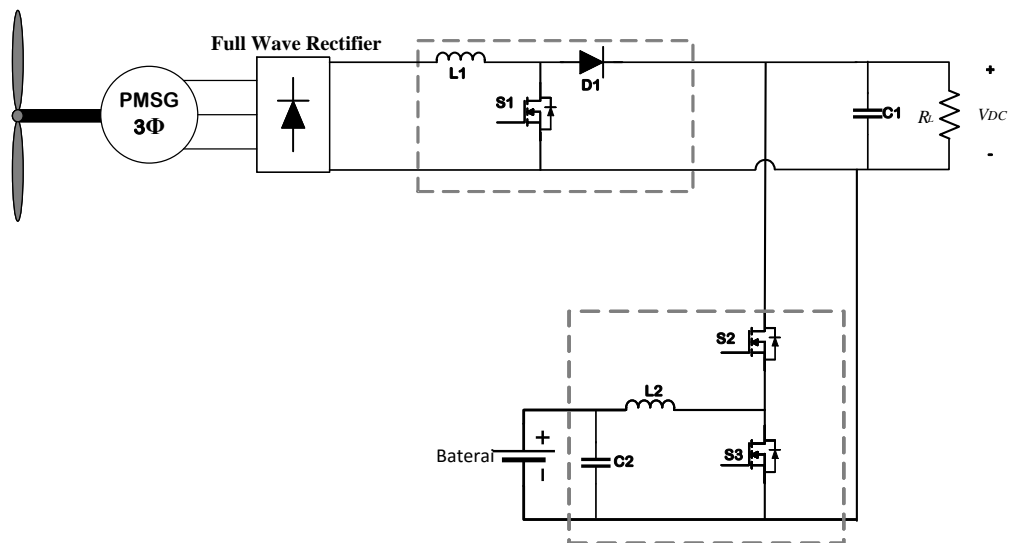
Jika dilihat pada gambar 2.3, prinsip kerja dari penyearah 6 pulsa tidak terkontrol adalah 3 diode akan menghasilkan bentuk gelombang tegangan positif dan 3 diode sisanya akan menghasilkan bentuk gelombang tegangan negatif. Untuk nilai amplitude pada konverter jenis ini adalah nilai maksimum tegangan *line-to-line* dan tegangan rata-rata keluaran dc adalah luasan gelombang tegangan [7].



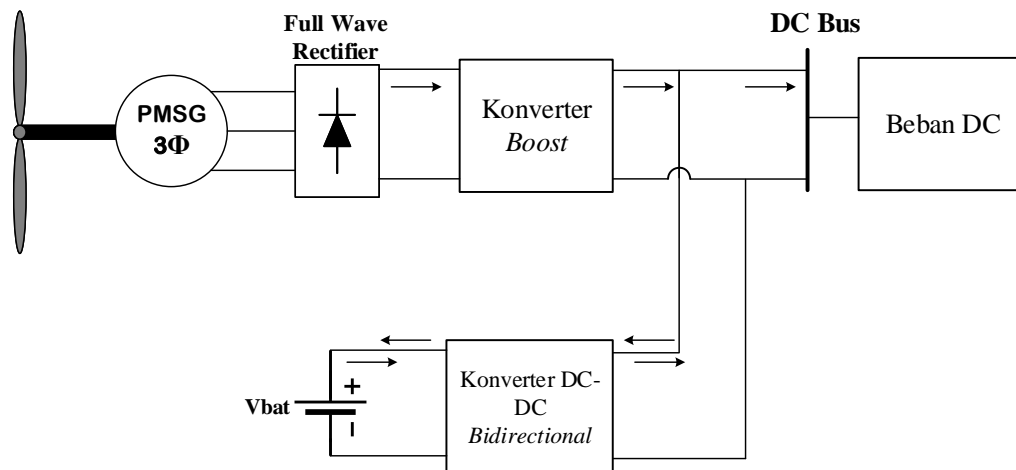
Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen Penyearah 3 Fasa Tidak Terkontrol.

2.5 Konverter Boost - Bidirectional

Konverter DC-DC memiliki peranan yang penting dalam sebuah sistem terutama sistem turbin angin kondisi *stand-alone*. Konverter yang digunakan harus dapat bekerja secara efektif sesuai dengan kondisi sistem. Pada penelitian ini, jenis konverter yang digunakan adalah konverter *boost* dan konverter *bidirectional*. Konverter *boost* digunakan untuk mendapatkan daya maksimum dengan mencari titik daya maksimum dari sistem turbin angin dengan menggunakan metode algoritma MPPT. Sedangkan konverter *bidirectional* digunakan untuk proses pengisian dan pengosongan baterai. Rangkaian ekuivalen konverter *boost* – *bidirectional* pada sistem turbin angin ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Rangkaian Ekuivalen Konverter *Boost* –*Bidirectional* pada Sistem Turbin Angin.



Gambar 2. 5 Aliran Daya dari Sistem Turbin Angin menuju konverter *Boost-Bidirectional*.

Konverter *bidirectional* merupakan sebuah konverter yang dapat bekerja dua arah dan memiliki dua saklar yang digunakan untuk mode *buck* atau menurunkan tegangan serta mode *boost* atau menaikkan tegangan. Apabila terjadi kelebihan daya yang dihasilkan oleh sistem turbin angin maka daya tersebut disalurkan menuju baterai dan baterai akan mengalami proses pengisian. Akan tetapi jika sistem turbin angin tidak dapat memenuhi kebutuhan daya beban, maka daya pada baterai akan disalurkan menuju beban untuk membantu kekurangan daya yang dihasilkan oleh sistem turbin angin atau dengan kata lain terjadi proses pengosongan baterai. Pada Gambar 2.5 menunjukkan aliran daya dari sistem turbin angin menuju konverter *boost-bidirectional*.

2.6 Konverter DC-DC

Konverter DC-DC adalah sebuah rangkaian elektronika daya yang dapat mengubah tegangan DC ke level tegangan DC yang berbeda [8]. Dengan menggunakan rangkaian konverter DC-DC, maka tegangan masukan dapat dinaikkan atau diturunkan sesuai dengan kebutuhan. Tegangan keluaran pada konverter DC-DC dapat diatur dengan cara mengubah nilai *duty cycle* (rasio waktu *on/off* pada pensaklaran). Menurut referensi [7], terdapat tiga macam konverter DC ke DC antara lain sebagai berikut:

1. Konverter *Buck*
2. Konverter *Boost*
3. Konverter *Buck-Boost*

2.6.1 Konverter *Buck*

Konverter *Buck* adalah salah satu konverter DC-DC yang mampu menyediakan tegangan keluaran yang lebih rendah dibandingkan tegangan masukan ($V_o < V_{in}$) dengan mengatur *duty cycle*. Pada gambar 2.6 menunjukkan rangkaian konverter *buck* yang terdiri dari tegangan masukan (V_{in}), saklar, dioda, induktor L, kapasitor C, dan resistansi beban R.

Pada konverter *buck* terdapat dua kondisi, antara lain:

1. Saat saklar dalam kondisi “ON”

Pada gambar 2.7 menunjukkan rangkaian konverter *buck* saat kondisi saklar “ON”, maka arus akan mengalir ke induktor dan beban. Kondisi ini disebut periode pengisian arus induktor dan dioda dalam keadaan *reverse bias*. Maka dapat dicari rumus matematikanya sebagai berikut ini:

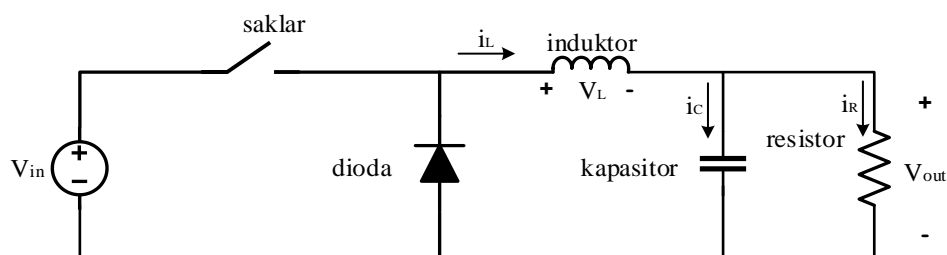
$$V_{in} = V_L + V_{out}$$

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} + V_{out}$$

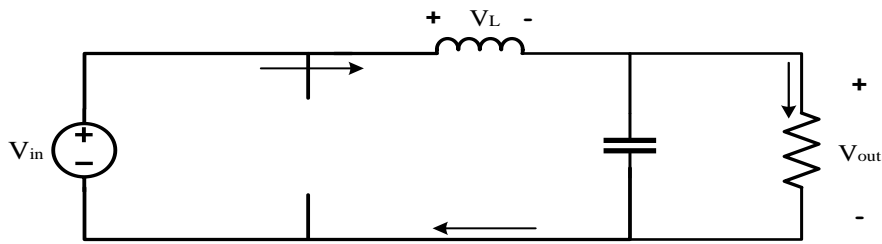
$$V_{in} = L \frac{\Delta i_L(on)}{t_{on}} + V_{out}$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta i_L(on)}{DT} + V_{out}$$

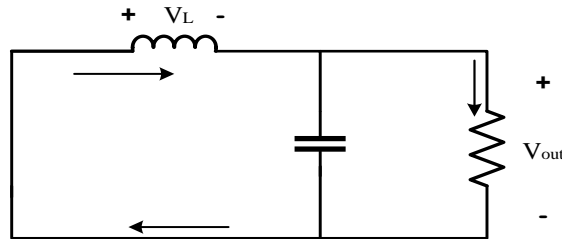
$$\Delta i_L(on) = \frac{(V_{in} - V_{out})DT}{L} \quad (2.11)$$



Gambar 2. 6 Rangkaian Konverter *Buck*.



Gambar 2. 7 Rangkaian Konverter *Buck* saat kondisi Saklar “ON”.



Gambar 2. 8 Rangkaian Konverter *Buck* saat kondisi Saklar “OFF”.

2. Saat saklar dalam kondisi “OFF”

Pada gambar 2.8 menunjukkan rangkaian konverter buck saat kondisi saklar “OFF”, maka dioda akan *forward bias* karena adanya pengosongan dari induktor. Arus mengalir dari induktor ke beban dilanjutkan ke dioda dan kembali lagi ke induktor. Karena arus yang mengalir adalah arus pengosongan induktor saja dan induktor bersifat murni (tidak ada resistansi) maka arus akan membentuk kurva linier menurun. Oleh karena ini $V_o < V_{in}$ dengan menggunakan konverter *buck*. Maka dari itu dapat dicari rumus matematiknya sebagai berikut ini:

$$\begin{aligned}
 -V_{out} &= V_L \\
 -V_{out} &= L \frac{di}{dt} \\
 -V_{out} &= L \frac{\Delta i_L(off)}{t_{off}} \\
 -V_{out} &= L \frac{\Delta i_L(off)}{(1-D)T} \\
 \Delta i_L(off) &= -\frac{V_{out}(1-D)T}{L} \tag{2.12}
 \end{aligned}$$

Saat dalam operasi *steady-state*, total perubahan arus pada induktor harus sama dengan nol. Maka akan didapatkan rumus matematik sebagai berikut ini:

$$\Delta i_L(on) + \Delta i_L(off) = 0 \tag{2.13}$$

Dengan memasukkan persamaan (2.11) dan (2.12) ke persamaan (2.13), maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut ini:

$$\begin{aligned} \frac{(V_{in}-V_{out})DT}{L} - \frac{V_{out}(1-D)T}{L} &= 0 \\ V_{in}D - V_{out}D - V_{out} + V_{out}D &= 0 \\ V_{out} &= V_{in}D \end{aligned} \quad (2.14)$$

Komponen induktor pada rangkaian konverter *buck* digunakan sebagai filter arus yang dapat mengurangi riak arus. Dengan menggunakan persamaan berikut ini dapat dicari nilai induktor:

$$L = \frac{V_{out} \cdot (1-D)}{\Delta i_L \cdot f_s} \quad (2.15)$$

Sedangkan komponen kapasitor pada rangkaian konverter *buck* diatas digunakan sebagai filter tegangan yang dapat mengurangi riak tegangan. Nilai kapasitor dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$C = \frac{(1-D)}{8.L \cdot \left(\frac{\Delta V_o}{V_{out}}\right) \cdot f_s^2} \quad (2.16)$$

2.6.2 Konverter *Boost*

Konverter *boost* adalah salah satu DC-DC yang mampu menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dibandingkan tegangan masukannya ($V_o > V_{in}$). Rangkaian konverter *boost* yang terdapat pada gambar 2.9 terdiri dari beberapa komponen, antara lain tegangan sumber (V_{in}), saklar, dioda, induktor L, kapasitor C, dan resistansi beban R.

Terdapat dua kondisi pada konverter *boost*, antara lain:

1. Saat dalam kondisi saklar “ON”

Pada gambar 2.10 menunjukkan rangkaian konverter *boost* dalam kondisi saklar “ON”, maka induktor akan terhubung langsung dengan sumber atau V_{in} dan akan mengalami proses pengisian (*charging*). Maka dari itu dapat dicari rumus matematiknya sebagai berikut ini:

$$\begin{aligned} V_{in} &= V_L \\ V_{in} &= L \frac{di}{dt} \\ V_{in} &= L \frac{\Delta i_L(on)}{t_{on}} \end{aligned}$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta i_L(on)}{DT}$$

$$\Delta i_L(on) = \frac{V_{in} D T}{L} \quad (2.17)$$

2. Saat dalam kondisi saklar “OFF”

Pada gambar 2.11 merupakan rangkaian konverter *boost* saat kondisi saklar dalam keadaan “OFF”, tegangan masukan (V_{in}) akan terangkai seri dengan induktor dan resistor. Induktor yang semula dalam keadaan pengisian berubah menjadi pengosongan arus dan dalam kondisi ini induktor berfungsi sebagai sumber arus atau sumber tegangan V_L dan resistor berfungsi sebagai beban yang di catu oleh dua sumber tegangan yaitu V_{in} dan V_L . Maka dari itu dapat dicari rumus matematiknya sebagai berikut ini:

$$V_{in} = V_L + V_{out}$$

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} + V_{out}$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta i_L(off)}{t_{off}} + V_{out}$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta i_L(off)}{(1-D)T} + V_{out}$$

$$\Delta i_L(off) = \frac{(V_{in}-V_{out})(1-D)T}{L} \quad (2.18)$$

Saat operasi *steady-state*, total perubahan arus pada induktor harus sama dengan nol. Maka akan didapatkan rumus matematik sebagai berikut ini:

$$\Delta i_L(on) + \Delta i_L(off) = 0 \quad (2.19)$$

Dengan memasukkan persamaan (2.17) dan (2.18) ke persamaan (2.19), maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut ini:

$$\frac{V_{in} D T}{L} + \frac{(V_{in}-V_{out})(1-D)T}{L} = 0$$

$$V_{in}(D + 1 - D) - V_{out}(1 - D) = 0$$

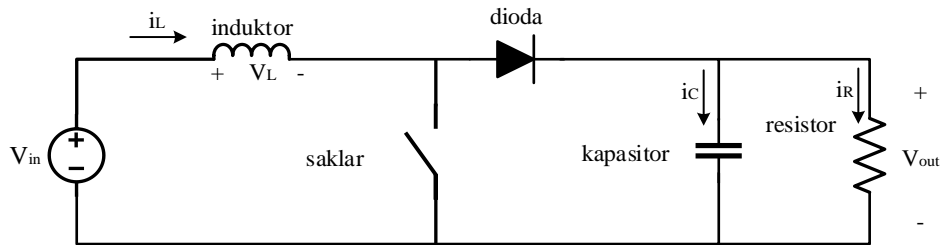
$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (2.20)$$

Komponen induktor dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut ini:

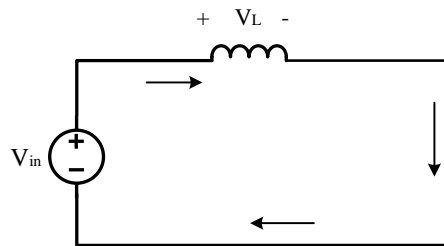
$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta i_L \cdot f_s} \quad (2.21)$$

Sedangkan komponen kapasitor pada rangkaian konverter *boost* diatas digunakan sebagai filter tegangan yang dapat mengurangi riak tegangan. Nilai kapasitor dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut ini:

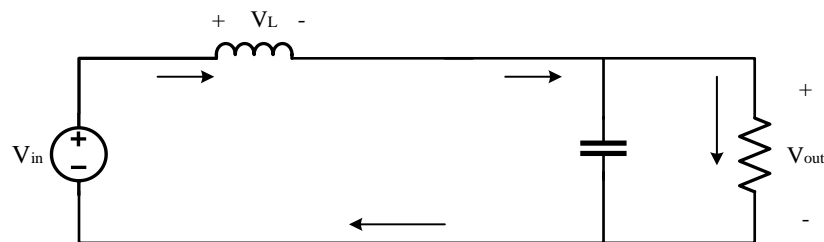
$$C = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f_s} \quad (2.22)$$



Gambar 2. 9 Rangkaian Konverter *Boost*.



Gambar 2. 10 Rangkaian Konverter *Boost* saat kondisi Saklar “ON”.

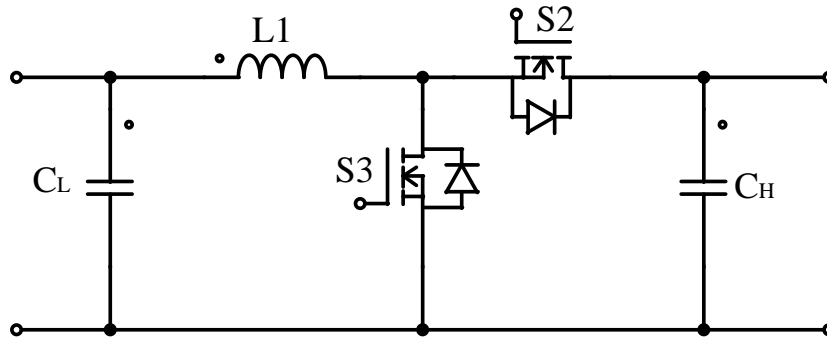


Gambar 2. 11 Rangkaian Konverter *Boost* saat kondisi Saklar “OFF”.

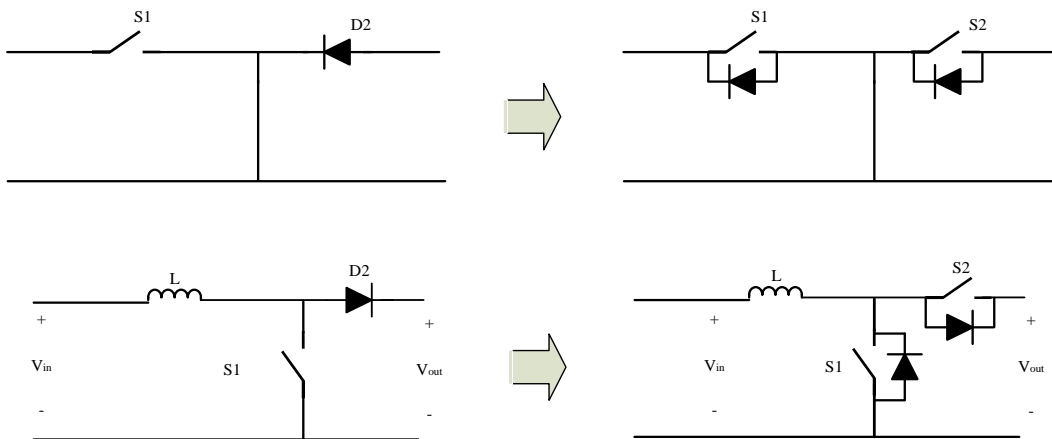
2.7 Konverter DC-DC *Bidirectional*

Konverter DC-DC *bidirectional* beserta penyimpanan energi menjadi pilihan yang menjanjikan bagi banyak sistem yang berhubungan dengan daya, termasuk kendaraan hibrida, kendaraan dengan bahan bakar baterai, sistem energi terbarukan, dan sebagainya. Selain itu, dengan menggunakan sistem *bidirectional* tidak hanya mengurangi biaya dan meningkatkan efisiensi, tetapi juga meningkatkan performa pada sistem. Pada sistem energi terbarukan, *multiple-input*

konverter DC-DC *bidirectional* digunakan untuk menggabungkan sumber energi yang berbeda. Rangkaian konverter DC-DC *bidirectional* ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Rangkaian Konverter DC-DC *Bidirectional*.



Gambar 2. 13 Pemodelan Saklar pada Konverter DC-DC *Bidirectional*.

Gambar 2.13 menunjukkan aplikasi dari saklar yang akan digunakan pada konverter DC-DC *bidirectional* sehingga konverter akan dapat bekerja dalam dua mode, yaitu *mode buck* dan *mode boost*.

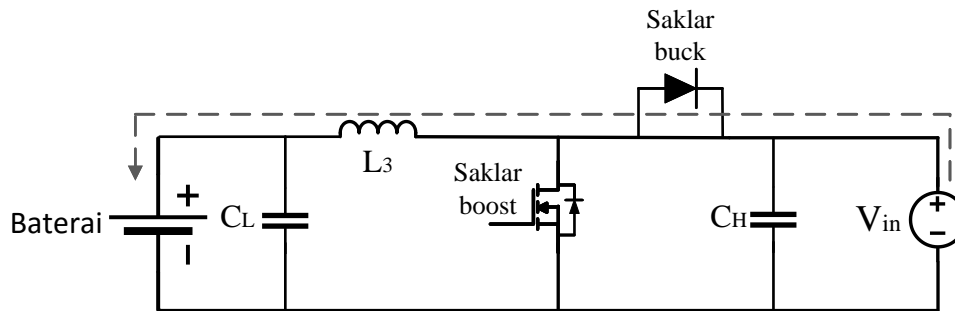
Menurut referensi [9], untuk menerapkan aliran arus dua arah pada konverter DC-DC *bidirectional*, maka saklar pada konverter harus dapat mengalirkan arus pada kedua arah. Biasanya konverter tersebut diaplikasikan dengan menggunakan saklar daya *unidirectional semiconductor*, seperti MOSFET atau IGBT. Oleh karena itu, dengan penambahan dioda yang terpasang seri dengan saklar akan dapat digunakan untuk mengalirkan arus dua arah.

2.7.1 Mode *Buck* pada Konverter DC-DC *Bidirectional*

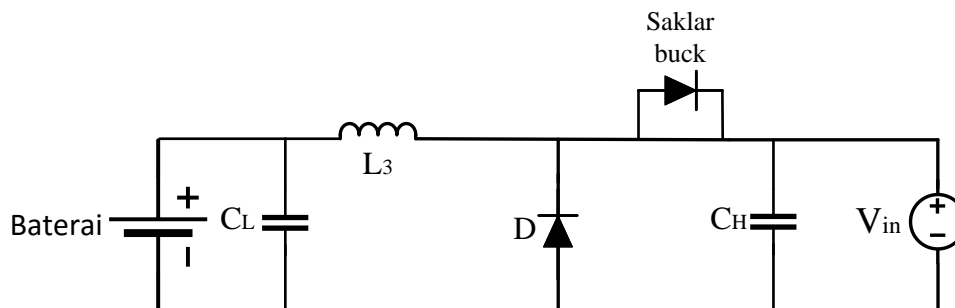
Mode *buck* pada konverter DC-DC *bidirectional* terbagi menjadi dua kondisi, yaitu kondisi saat saklar *buck* dalam keadaan *open* dan saat saklar *buck* dalam kondisi *closed*.

1. Saat kondisi saklar *closed*

Rangkaian konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *buck* saat kondisi saklar *buck closed* ditunjukkan pada Gambar 2.14. Pada saat saklar *buck* dalam kondisi *closed* dan saklar *boost* saat kondisi *open*, maka dioda internal pada saklar *boost* dalam keadaan *reverse bias* dan arus akan mensuplai induktor dan baterai, sehingga arus akan menambah muatan di dalam induktor dan baterai akan mengalami proses *charging* atau pengisian. Rangkaian pengganti konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *buck* saat saklar *buck* dalam kondisi *closed* ditunjukkan pada Gambar 2.15.



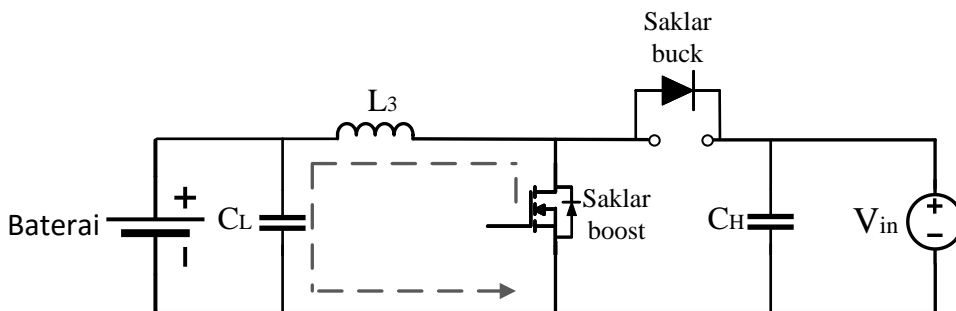
Gambar 2. 14 Mode *Buck* pada Konverter DC-DC *Bidirectional* saat Saklar *Buck* dalam kondisi *Closed*.



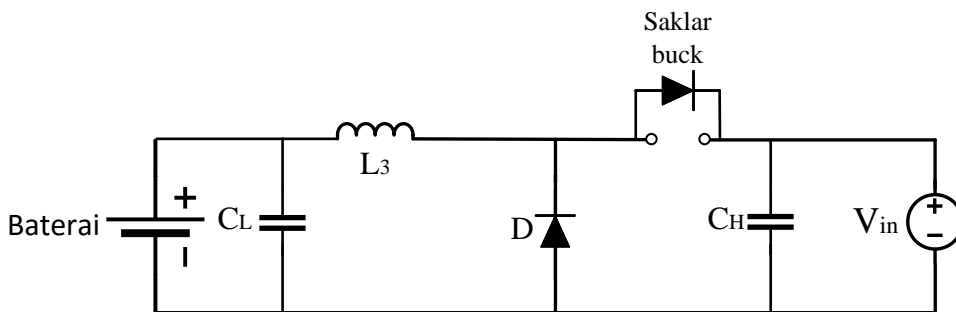
Gambar 2. 15 Rangkaian Pengganti saat Saklar *Buck* dalam kondisi *Closed*.

2. Saat kondisi saklar *open*

Rangkaian konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *buck* saat kondisi saklar *buck open* ditunjukkan pada Gambar 2.16. Pada saat saklar *buck* dalam kondisi *open*, maka arus yang tersimpan di dalam induktor akan mengalir menuju dioda internal pada saklar *boost*. Oleh karena itu dioda internal dalam kondisi *forward bias*, lalu arus akan dialirkan melewati dioda yang bertindak sebagai *freewheeling*. Rangkaian pengganti konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *buck* saat saklar *buck* dalam kondisi *open* ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2. 16 Mode *Buck* pada Konverter DC-DC *Bidirectional* saat Saklar *Buck* dalam kondisi *Open*.



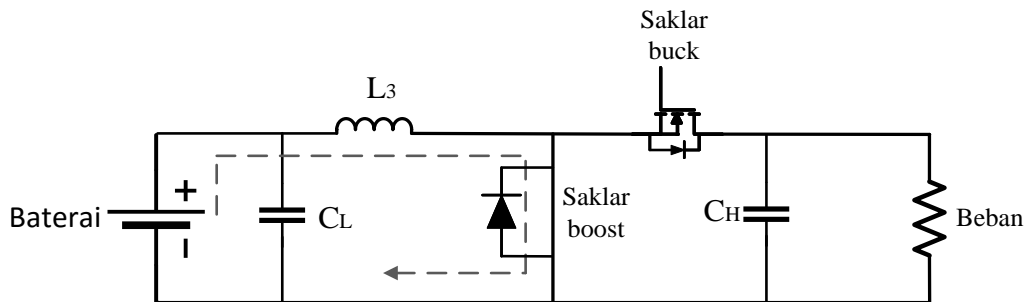
Gambar 2. 17 Rangkaian Pengganti saat Saklar *Buck* dalam kondisi *Open*.

2.7.2 Mode *Boost* pada Konverter DC-DC *Bidirectional*

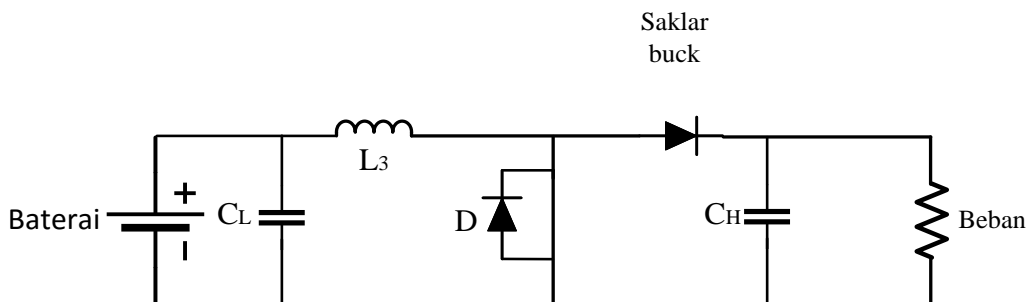
Mode *boost* pada konverter DC-DC *bidirectional* terbagi menjadi dua kondisi, yaitu kondisi saat saklar *boost* dalam keadaan *open* dan saat saklar *boost* dalam kondisi *closed*.

1. Saat kondisi saklar *closed*

Rangkaian konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *boost* saat saklar *boost* dalam kondisi *closed* ditunjukkan pada Gambar 2.18. Pada saat saklar *boost* dalam kondisi *closed* dan saklar *buck* saat kondisi *open*, maka dioda internal pada saklar *boost* dalam keadaan *reverse bias* dan dioda internal yang terdapat pada saklar *buck* dalam keadaan *forward bias*, sehingga baterai hanya akan mensuplai arus ke induktor. Rangkaian pengganti konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *boost* saat saklar *boost* dalam kondisi *closed* ditunjukkan pada Gambar 2.19.



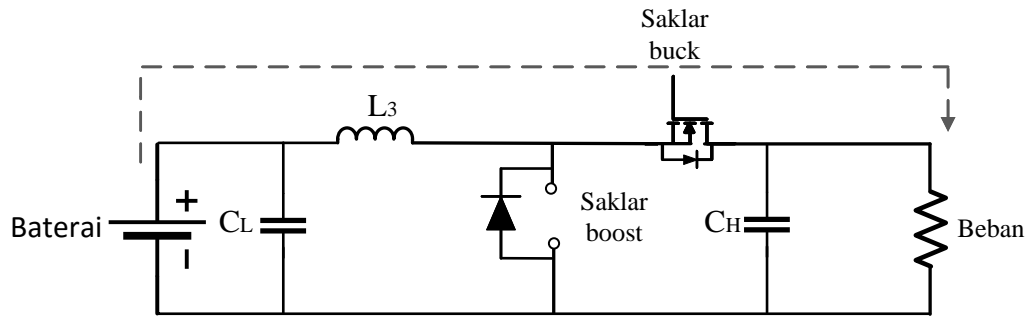
Gambar 2. 18 Mode *Boost* pada Konverter DC-DC *Bidirectional* saat Saklar *Boost* dalam kondisi *Closed*.



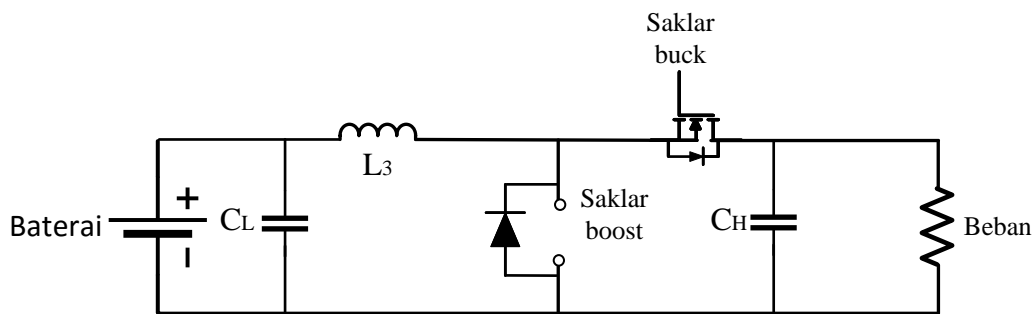
Gambar 2. 19 Rangkaian Pengganti saat Saklar *Boost* dalam kondisi *Closed*.

2. Saat kondisi saklar *open*

Rangkaian konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *boost* saat saklar *boost* dalam kondisi *open* ditunjukkan pada Gambar 2.20. Pada saat saklar *boost* dalam keadaan *open*, maka arus akan mengalir dari baterai menuju beban dan proses ini yang dinamakan proses *discharging* atau pengosongan baterai. Rangkaian pengganti konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *boost* saat saklar *boost* dalam kondisi *open* ditunjukkan pada Gambar 2.21.



Gambar 2. 20 Mode *Boost* pada Konverter DC-DC *Bidirectional* saat Saklar *Boost* dalam kondisi *Open*.

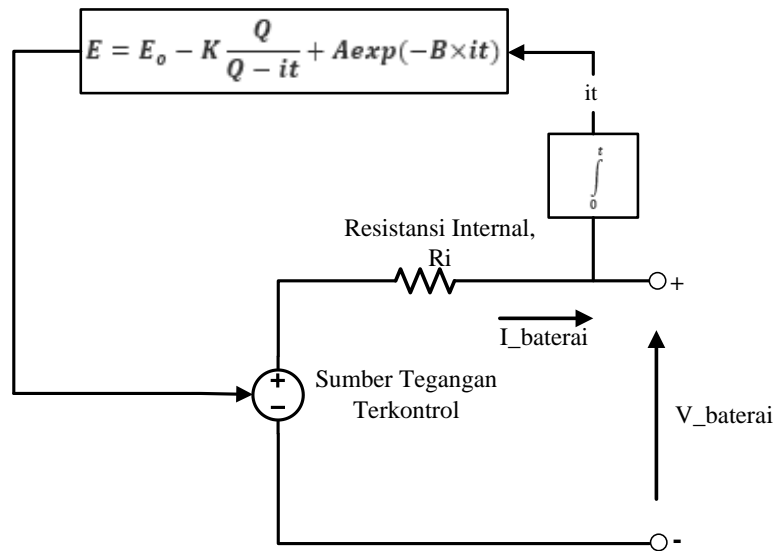


Gambar 2. 21 Rangkaian Pengganti saat Saklar *Boost* dalam kondisi *Open*.

2.8 Pemodelan Baterai

Baterai yang akan digunakan pada penelitian kali ini adalah dengan menggunakan baterai *lead acid* karena baterai jenis ini sangat sering digunakan pada sistem energi terbarukan. Hal ini dikarenakan harganya yang ekonomis dan umur baterai yang cukup panjang.

Menurut referensi [10], pemodelan baterai dibagi ke dalam pemodelan eksperimen, pemodelan elektrokimia, dan pemodelan rangkaian ekuivalen. Pemodelan rangkaian ekuivalen merupakan pemodelan yang sesuai untuk simulasi dinamik. Pada penelitian ini, jenis yang digunakan adalah pemodelan rangkaian ekuivalen yang mengacu pada model Sheperd, pemodelan baterai yang terdiri dari tegangan terkontrol dan yang dirangkai seri dengan resistansi internal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.22.



Gambar 2. 22 Rangkaian Ekuivalen Baterai Non-Linear.

Persamaan untuk sumber tegangan terkontrol adalah sebagai berikut:

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int i_b dt} + A \exp(-B \int i_b dt) \quad (2.23)$$

Dari referensi [10], menyatakan bahwa pada hambatan dalam yang terdapat pada pemodelan baterai diasumsikan dalam kondisi konstan selama siklus pengisian dan pengosongan.

Berikut ini adalah beberapa persamaan yang digunakan untuk menentukan parameter – parameter yang terdapat pada pemodelan baterai:

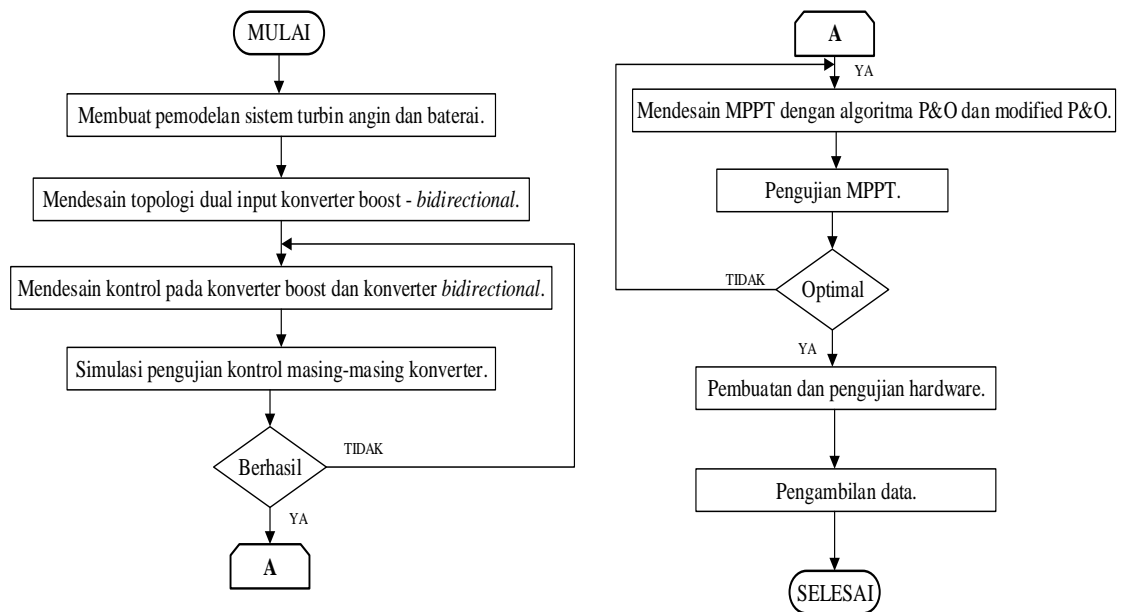
$$\left\{ \begin{array}{l} A = E_{full} - E_{exp} \\ B = \frac{3}{Q_{exp}} \\ K = \left[E_{full} - E_{nom} + A(\exp(-BQ_{nom}) - 1) \right] \frac{Q - Q_{nom}}{Q_{nom}} \end{array} \right. \quad (2.24)$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PERANCANGAN DAN PEMODELAN SISTEM TURBIN ANGIN

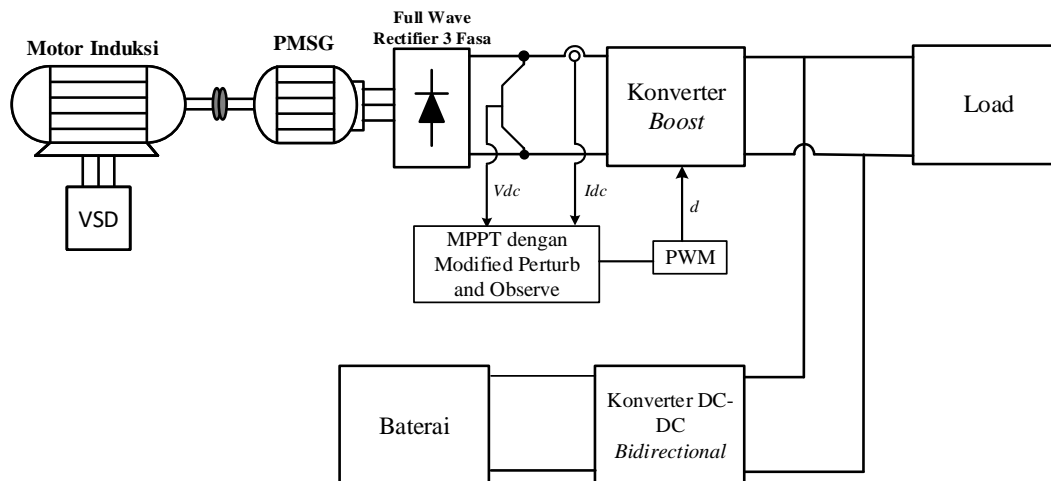
Pada bab 3 ini akan dibahas mengenai perancangan dan pemodelan dari sistem turbin angin. Perancangan meliputi perhitungan dan penentuan komponen-komponen yang akan digunakan. Pada Gambar 3.1 menunjukkan diagram alir dari semua proses yang dilakukan pada penelitian kali ini.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.

3.1 Konfigurasi Sistem

Komponen utama yang terdapat pada sistem ini terdiri dari *variable speed drive* (VSD), motor induksi (sebagai *prime mover* dari PMSG), *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), *full wave rectifier* 3 fasa, sensor tegangan, sensor arus, konverter DC-DC *boost*, konverter DC-DC *bidirectional*, dan baterai. Pada Gambar 3.2 menunjukkan blok diagram sistem yang digunakan pada penelitian kali ini.



Gambar 3. 2 Blok Diagram Sistem.

Pada penelitian ini, perangkat keras dirancang hanya untuk menguji performa dari algoritma yang diusulkan untuk mendapatkan daya maksimum dari sistem turbin angin dan juga untuk mengetahui bahwa konverter *bidirectional* dapat bekerja dengan dua arah, yaitu mode pengisian dan pengosongan baterai.

3.2 Parameter Modul Sistem Turbin Angin

3.2.1 Parameter *Motor Induksi*

Pada penelitian ini menggunakan motor induksi sebagai *prime mover* pada sistem turbin angin. Dengan menggunakan *variable speed drive* (VSD) untuk mengatur kecepatan pada motor induksi sehingga dapat dimodelkan seperti kecepatan angin. Kecepatan angin di daerah Nganjuk berada antara 3 m/s sampai 5 m/s, sehingga kecepatan dari motor induksi yang digunakan berkisar antara 300 rpm sampai dengan 500 rpm. Pada Tabel 3.1 menunjukkan spesifikasi motor induksi yang digunakan.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Motor Induksi Tipe A-Y3-905

Parameter	Nilai
Tegangan	220/380 V
Daya Output	1,5 KW
RPM	2850
Frekuensi	50 Hz

Parameter	Nilai
Cos θ	0,84

3.2.2 Parameter *Permanent Magnet Synchronous Generator*

Generator yang digunakan pada penelitian ini adalah generator jenis *permanent magnet synchronous generator* atau disingkat dengan PMSG. PMSG digunakan untuk menghasilkan tegangan dari hasil putaran turbin angin. Spesifikasi generator PMSG ditunjukkan pada Tabel 3.2. Pada Gambar 3.3 menunjukkan emulator berbasis laboratorium sistem turbin angin dan PMSG yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 3. 2 Spesifikasi Generator PMSG Tipe TD 500 Neidec

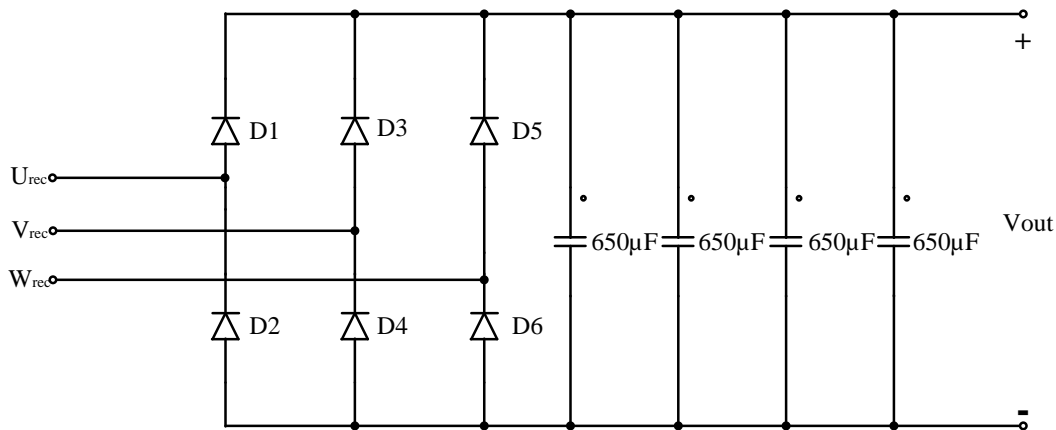
Parameter	Nilai
Tegangan	160 V
Daya Output	500 Watt
RPM	1000
Tegangan/100 rpm	16 volt



Gambar 3. 3 Emulator Berbasis Laboratorium Sistem Turbin Angin dan PMSG.

3.2.3 Rectifier 3 Fasa

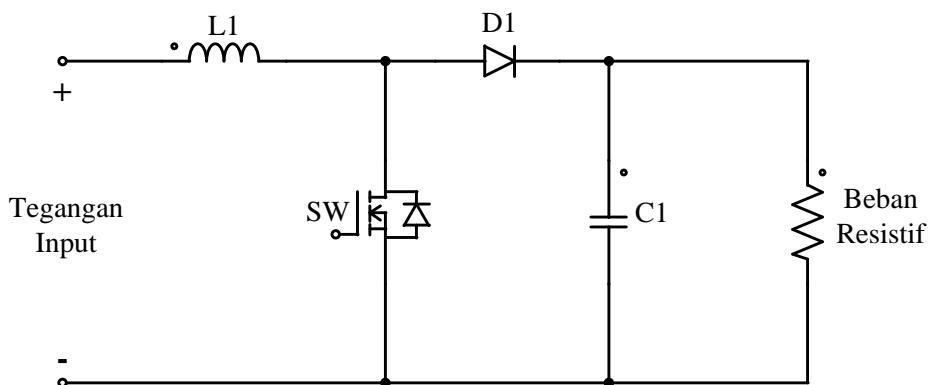
Pada penelitian ini, modul *rectifier* yang digunakan adalah *full wave rectifier 3 fasa uncontrolled*. *Rectifier* ini bertujuan untuk menyearahkan tegangan *output* dari generator PMSG. *Rectifier* ini terdiri dari 6 buah dioda dan 4 buah kapasitor yang dirangkai secara *parallel*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4. Tujuan ditambahkan kapasitor adalah untuk mengurangi *ripple* dari tegangan *output* dari generator PMSG.



Gambar 3. 4 Rangkaian *Full Wave Rectifier 3 Fasa*.

3.2.4 Konverter Boost

Konverter *boost* digunakan untuk menaikkan tegangan keluaran dari *rectifier*. Untuk mendapatkan daya maksimum dari sistem turbin angin dapat dilakukan dengan menggunakan metode MPPT untuk mengatur *duty cycle*. Pada Tabel 3.3 merupakan parameter pada modul konverter *boost* yang digunakan pada penelitian ini. Pada Gambar 3.5 menunjukkan rangkaian ekuivalen konverter *boost*.



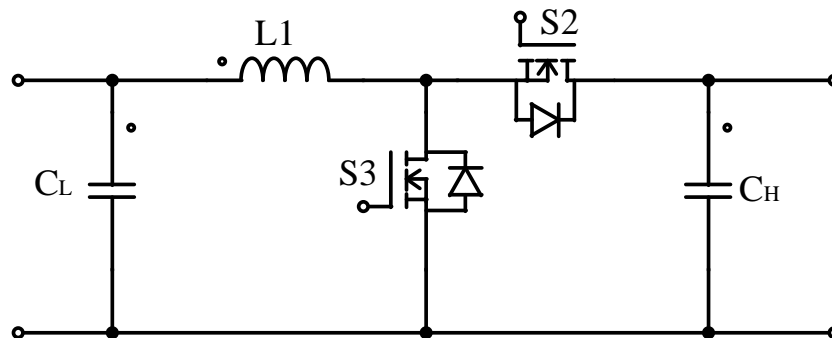
Gambar 3. 5 Rangkaian Ekuivalen Konverter *Boost*.

Tabel 3. 3 Parameter Konverter *Boost*.

Parameter	Nilai
V_{in_min}	50 volt
V_{in_max}	160 volt
V_{out}	400 volt
P_o	500 watt
Frekuensi Pensaklaran	31,24 kHz
t_{fall}	29nS
Duty cycle	0,875
L	1,4 mH
C	87,53 μ F

3.3 Perancangan Konverter DC-DC *Bidirectional*

Pada perancangan konverter DC-DC *bidirectional* ini dibagi menjadi dua mode, yaitu perancangan saat mode *boost* dan perancangan untuk mode *buck*. Rangkaian konverter DC-DC *bidirectional* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.6.



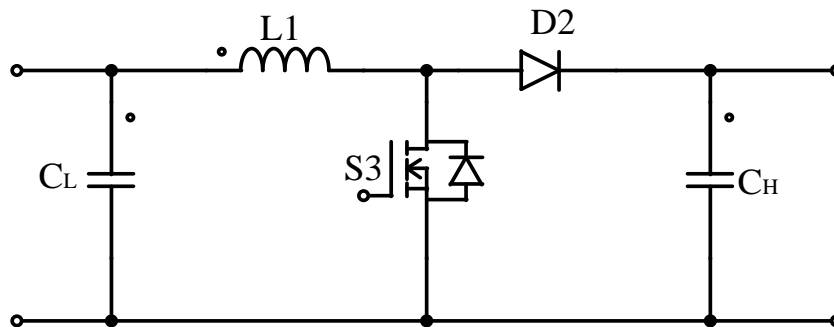
Gambar 3. 6 Rangkaian Konverter DC-DC *Bidirectional*.

3.3.1 Mode *Boost*

Dalam perancangan mode *boost* diperlukan beberapa parameter yang digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan nilai komponen yang sesuai seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.4 berikut ini. Pada Gambar 3.7 menunjukkan rangkaian ekuivalen konverter DC-DC *bidirectional* saat mode *boost*.

Tabel 3. 4 Spesifikasi Konverter *Bidirectional* saat Mode *Boost*.

Parameter	Nilai
V_{in}	120 volt
V_{out}	400 volt
P_o	300 watt
Frekuensi Pensaklaran	31,24 kHz
t_{fall}	29nS



Gambar 3. 7 Rangkaian Ekuivalein saat Mode *Boost*.

- Duty cycle

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{120}{400} = 0,7$$

- Nilai Resistor

$$R = \frac{V_{out}^2}{P_o} = \frac{400^2}{300} = 533,33 \Omega$$

- Nilai Induktor

- Mencari nilai $I_{L(avg)}$

$$I_{L(avg)} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R} = \frac{120}{(1-0,7)^2 533,33} = 2,5A$$

- Mencari nilai ΔI_L

$$\Delta I_L = 1\% \times 2,5 = 0,025 A$$

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_s} = \frac{120 \times 0,7}{0,025 \times 31240} = 107 mH$$

- Nilai Kapasitor

$$\Delta V_o = 0,1\% \times 400 = 0,4 volt$$

$$C = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f_s} = \frac{0,7}{533,33 \left(\frac{0,4}{400} \right) 31240} \approx 42 \mu F$$

- Resistor dan Kapasitor *Snubber*

$$V_{off} = V_o = 400 \text{ volt}$$

$$I_{on} = I_o \times \frac{V_o}{V_s} = 0,75 \times \frac{400}{120} = 2,5 \text{ A}$$

$$C_{snubber} \approx \frac{I_{on} \times t_{fall}}{2 \times V_{off}}$$

$$C_{snubber} \approx \frac{2,5 \times (29 \times 10^{-9})}{2 \times 400}$$

$$C_{snubber} \approx 1 \text{ nF}$$

$$R_{snubber} < \frac{DT}{2 \times C_{snubber}}$$

$$R_{snubber} < \frac{0,7 \times \left(\frac{1}{31240}\right)}{2 \times (1 \times 10^{-9})}$$

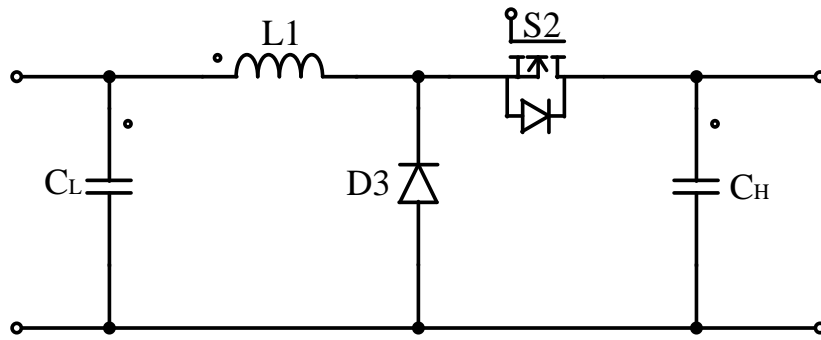
$$R_{snubber} < 11,217 \text{ k}\Omega$$

3.3.2 Mode *Buck*

Dalam perencanaan mode *buck* diperlukan beberapa parameter yang digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan nilai komponen yang sesuai seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.5 berikut ini. Pada Gambar 3.8 menunjukkan rangkaian ekuivalen konverter DC-DC *bidirectional* saat mode *buck*.

Tabel 3. 5 Spesifikasi Konverter *Bidirectional* saat Mode *Buck*.

Parameter	Nilai
V_{in}	400 volt
V_{out}	120 volt
I_o	2 ampere
Frekuensi Pensaklaran	31,24 kHz



Gambar 3. 8 Rangkaian Ekuivalein saat Mode *Buck*..

- Duty cycle

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{400}{120} = 0,3$$

- Nilai Resistor

$$R = \frac{V_{out}}{I_o} = \frac{120}{2} = 60 \Omega$$

- Nilai Induktor

- Mencari nilai $I_{L(avg)}$

$$I_{L(avg)} = \frac{V_{out}}{R} = I_o = 2A$$

- Mencari nilai ΔI_L

$$\Delta I_L = 1\% \times 2 = 0,02 A$$

$$L = \frac{V_{out} (1-D)}{\Delta I_L \cdot f_s} = \frac{120 \times (1-0,3)}{0,02 \times 31240} = 134 \text{ mH}$$

- Nilai Kapasitor

$$\Delta V_o = \pm 10\% \times 120 = 12 \text{ volt}$$

$$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) f_s^2} = \frac{1-0,3}{(8 \times 134 \text{ mH}) \left(\frac{12}{120}\right) 31240} \approx 16,7 \mu F$$

- Resistor dan Kapasitor *Snubber*

$$V_{off} = V_{in} = 400 \text{ volt}$$

$$I_{on} = I_o = 2 A$$

$$C_{snubber} \approx \frac{I_{on} \times t_{fall}}{2 \times V_{off}}$$

$$C_{snubber} \approx \frac{2 \times (29 \times 10^{-9})}{2 \times 400}$$

$$C_{snubber} \approx 1 \text{ nF}$$

$$R_{snubber} < \frac{DT}{2 \times C_{snubber}}$$

$$R_{snubber} < \frac{0,3 \times \left(\frac{1}{31240}\right)}{2 \times (1 \times 10^{-9})}$$

$$R_{snubber} < 4,807 \text{ k}\Omega$$

3.4 Parameter Baterai *Lead Acid*

Baterai dengan tipe *lead acid* sudah sering sekali digunakan terutama digunakan pada sistem energi terbarukan, seperti sistem turbin angin. Baterai lead acid yang digunakan pada penelitian kali ini adalah model Yuasa NP SERIES - NP7-12. Spesifikasi baterai ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Spesifikasi Baterai NP SERIES - NP7-12.

Parameter	Nilai
Tegangan	12 volt
Kapasitas Nominal	7Ah
Resistansi Internal	25mΩ

Pada sistem turbin angin saat kondisi stand-alone, tegangan baterai yang digunakan adalah 120 volt sehingga baterai disusun secara seri sebanyak 10 buah. Berdasarkan jenis baterai tersebut, dapat diketahui parameter-parameter yang digunakan untuk pemodelan baterai seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.7.

Tabel 3. 7 Parameter Baterai.

Parameter	Nilai
E_o	122,8002
A	8,2078
B	128,5714
K	0,48165
Q	7
R	0,25 Ω

3.5 Perancangan Algoritma Modified *Perturb and Observe*

Untuk mendapatkan daya maksimum dari sistem turbin angin dapat menggunakan berbagai metode algoritma MPPT, salah satunya dengan menggunakan algoritma *Perturb and Observe* (P&O). Metode P&O mempunyai kelebihan yaitu kecepatan *tracking*nya jauh lebih cepat dibandingkan dengan metode yang lainnya. Akan tetapi, metode ini memiliki kekurangan juga yaitu memiliki osilasi untuk mencapai kondisi *steady state*. Oleh karena itu, dengan melakukan modifikasi metode P&O diharapkan dapat mengurangi osilasi untuk mencapai kondisi *steady state*.

Menentukan beberapa parameter sebagai inisialisasi awal dan besar perubahan nilai *step size* (ΔD) yang tepat menjadi hal yang utama pada algoritma P&O sehingga kecepatan responnya lebih cepat dan dapat mengurangi osilasi di sekitar titik puncak daya maksimum. Selain itu, batasan *duty cycle* juga diperlukan dikarenakan untuk menjaga batas kemampuan dari konverter *boost*. Parameter yang digunakan pada metode *perturb and observe* ditunjukkan pada Tabel 3.8 berikut ini.

Tabel 3. 8 Parameter Algoritma *Perturb and Observe*.

Parameter	Nilai
<i>Step size</i> (ΔD)	0,1
<i>Duty cycle</i> awal (D0)	0.25
<i>Limiter duty cycle</i>	0,325 - 0,9

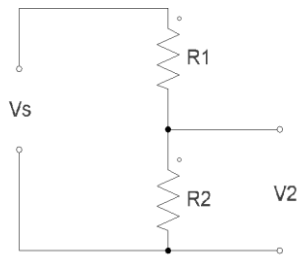
Pada algoritma modified *perturb and observe*, parameter nilai *step size* (ΔD) akan berubah secara otomatis mengikuti perubahan respon dari sistem. Perubahan tersebut ditentukan oleh nilai konstanta x_1 dan x_2 yang sudah ditentukan terlebih dahulu dan nilainya berada pada range 0,5 sampai dengan 1. Parameter yang digunakan pada metode *modified perturb and observe* ditunjukkan pada Tabel 3.9 berikut ini.

Tabel 3. 9 Parameter Algoritma *Perturb and Observe*.

Parameter	Nilai
<i>Step size</i> (ΔD)	0,15
<i>Duty cycle</i> awal (D0)	0.25
x_1	0,65
x_2	0,65
<i>Limiter duty cycle</i>	0,325 - 0,9

3.6 Sensor Tegangan

Sensor tegangan yang akan dibuat adalah sensor tegangan menggunakan teori pembagi tegangan. Rangkaian pembagi tegangan ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Rangkaian Sensor Tegangan.

Perhitungan nilai resistansi dapat dihitung menggunakan rumus pembagi tegangan yaitu:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in}$$

Sensor tegangan pada input mode *boost*:

$$V_s = 200 \text{ V}$$

$$V_2 = 2,5 \text{ V}$$

$$R_2 = 1 \text{ K}\Omega$$

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_s$$

$$2,5 \text{ V} = \frac{1 \text{ K}}{R_1 + 1 \text{ K}} \times 200 \text{ V}$$

$$\frac{2,5}{200} = \frac{1K}{R1 + 1K}$$

$$2,5R1 = 197,5K \rightarrow R1 = 79 K\Omega$$

Sensor tegangan pada input mode buck dan dc bus:

$$Vs = 500 V$$

$$V2 = 2,5V$$

$$R2 = 2K\Omega$$

$$V2 = \frac{R2}{R1 + R2} \times Vs$$

$$2,5V = \frac{2K}{R1 + 2K} \times 500$$

$$\frac{2,5}{500} = \frac{2K}{R1 + 2K}$$

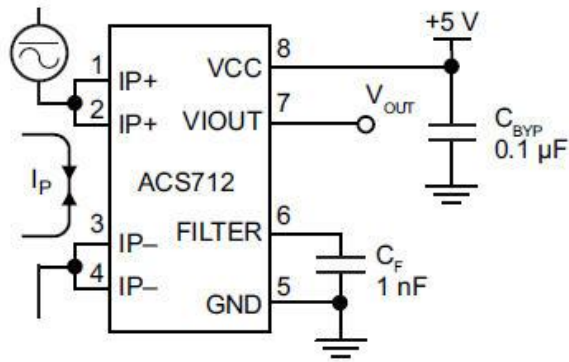
$$2,5R1 = 995K \rightarrow R1 = 398 K\Omega$$

3.7 Perancangan Sensor Arus

Perancangan sensor arus pada penelitian kali ini memiliki fungsi utama yaitu untuk memberikan informasi kepada *mikrokontroller* berupa nilai arus dari konverter *bidirectional*.

Sensor arus yang digunakan adalah sensor arus jenis IC ACS712. Sensor arus ini digunakan untuk membaca besarnya arus baik disisi input maupun output pada rangkaian *bidirectional dc-dc converter* dan pada DC BUS. Pada datasheet IC ACS 712 dapat dilihat bahwa hasil pembacaan dari sensor arus berupa tegangan DC dengan kondisi awal (arus input = 0) 1,5 volt dengan tegangan referensi 3 volt. Pada proyek akhir ini digunakan tipe sensor ACS-712ELCTR-05B-T yang memiliki rating pembacaan arus maksimal 5 Ampere. Hal ini dikarenakan rating transformator sisi sekunder adalah 5 A. Gambar rangkaian ACS712 ditunjukkan oleh Gambar 3.10. Pada sensor arus nilai ADC dapat dicari secara teori dengan cara sebagai berikut ini:

$$ADC(teori) = \left(\frac{2^n}{VR}\right) \times Vin$$



Gambar 3. 10 Rangkaian ACS 712.

Halaman ini sengaja dikosongkan

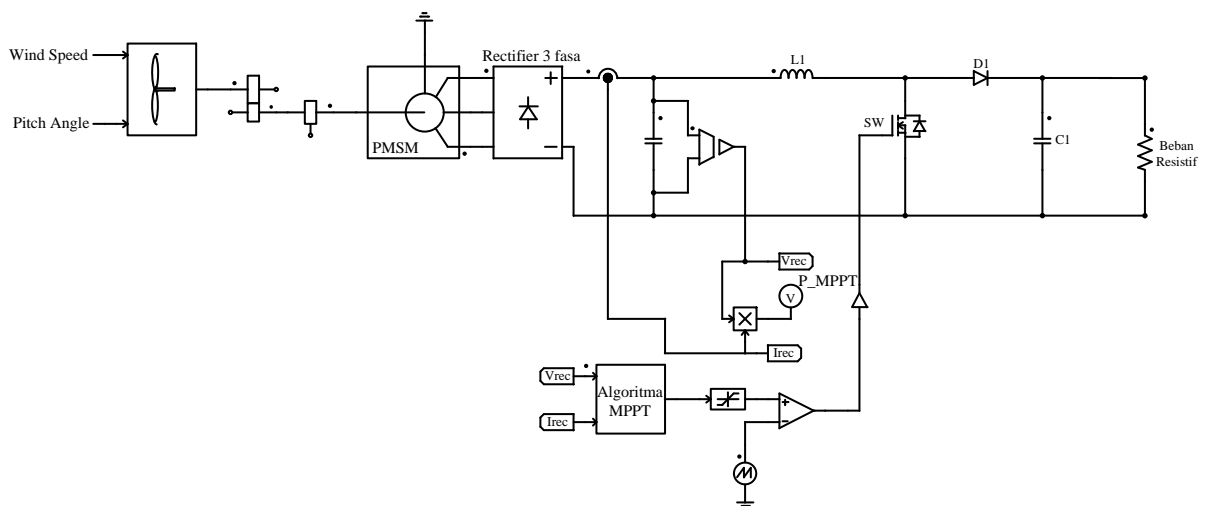
BAB 4

HASIL PENGUJIAN SIMULASI, PROTOTYPE, DAN ANALISIS DATA

Pada bab 4, akan dibahas mengenai kinerja sistem melalui pengujian simulasi dan prototype kemudian melakukan analisis data yang didapatkan dari kedua pengujian tersebut. Simulasi yang dilakukan antara lain adalah simulasi kinerja metode MPPT, simulasi sistem saat kondisi statis, dan simulasi sistem saat kondisi transien. Untuk pengujian perangkat pada perangkat keras antara lain pengujian metode MPPT pada kecepatan angin konstan dan pengujian kerja konverter *bidirectional*.

4.1 Pengujian Simulasi Kinerja Algoritma MPPT

Pengujian simulasi ini dilakukan untuk mengetahui kinerja metode MPPT yang digunakan pada sistem turbin angin. Dengan melakukan simulasi ini akan diketahui seberapa besar daya maksimum yang dikeluarkan oleh sistem turbin angin dengan bantuan kontrol MPPT pada konverter *boost*. Pengujian simulasi algoritma MPPT menggunakan dua metode, antara lain algoritma *Perturb and Observe* dan algoritma *Modified Perturb and Observe*. Desain rangkaian yang digunakan untuk pengujian simulasi MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Desain Rangkaian untuk Pengujian Simulasi MPPT.

4.1.1 Kinerja Metode MPPT pada Sistem Turbin Angin

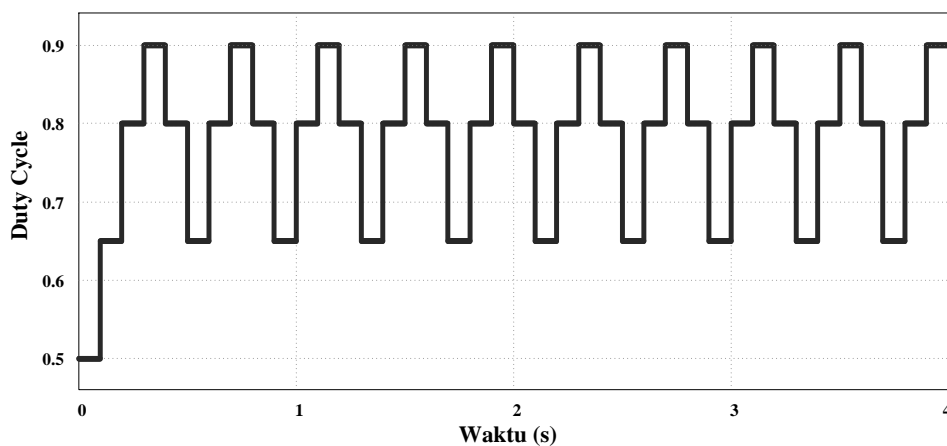
Pada pengujian simulasi mengenai kinerja MPPT pada sistem turbin akan dilakukan pada tiga kecepatan angin konstan, yaitu saat kecepatan 8 m/s, 10 m/s, dan 12 m/s. Pengujian simulasi ini akan dilakukan dengan menggunakan dua metode MPPT yang berbeda yaitu *Perturb and Observe* dan *Modified Perturb and Observe*.

4.1.1.1 Pengujian Metode MPPT berbasis *Perturb and Observe*.

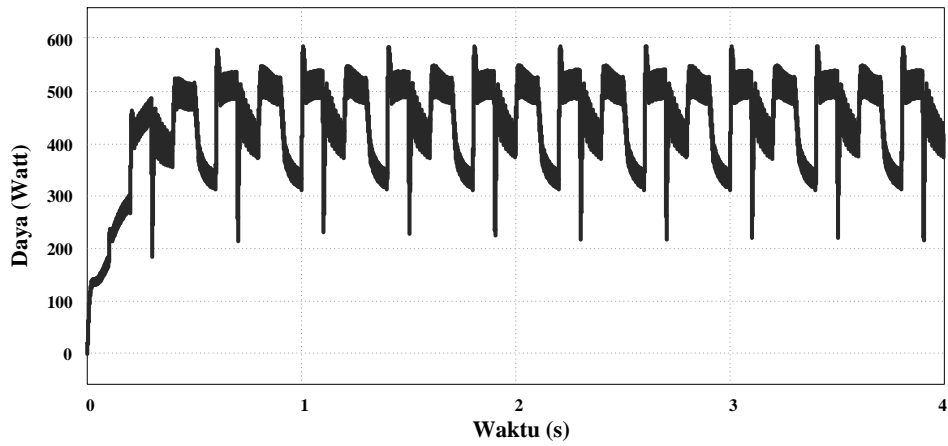
Pengujian simulasi metode MPPT berbasis *Perturb and Observe* pada sistem turbin angin dilakukan saat kecepatan angin 12 m/s dan 8 m/s.

A. Pengujian Saat Kecepatan Angin 12 m/s

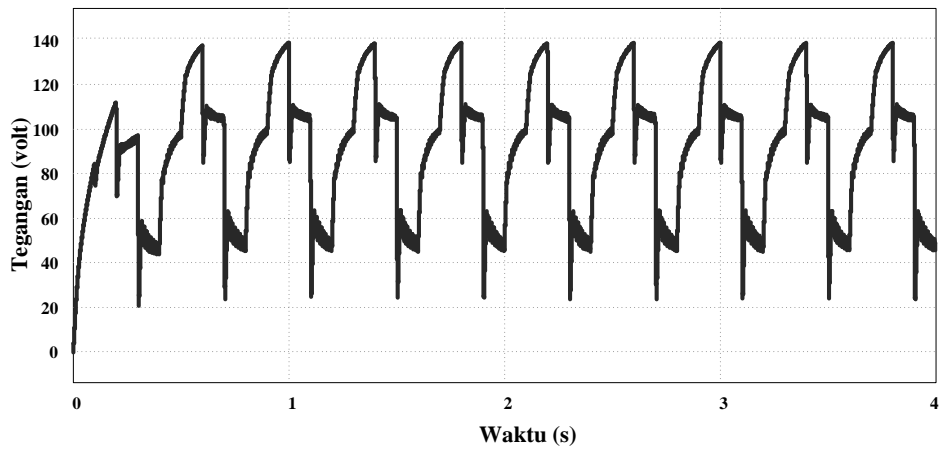
Pengujian simulasi metode MPPT berbasis *Perturb and Observe* pada sistem turbin angin dilakukan saat kecepatan angin 12 m/s ditunjukkan pada Gambar 4.2 sampai dengan Gambar 4.5 sebagai berikut ini.



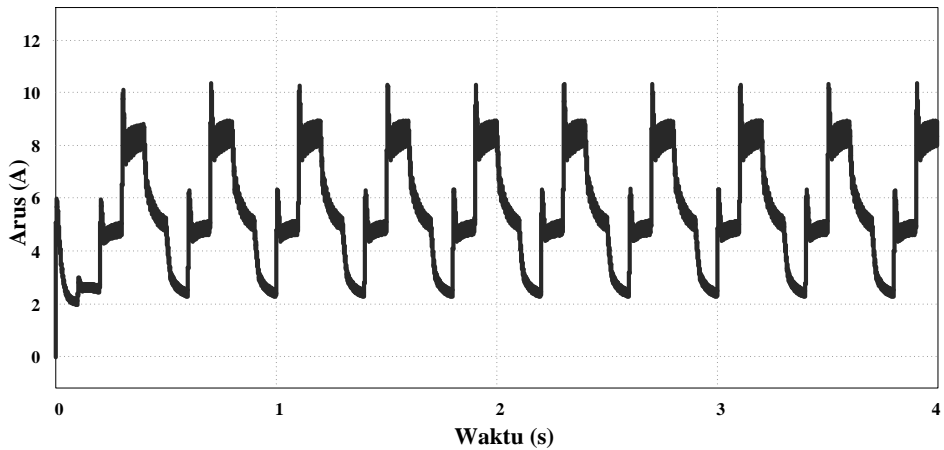
Gambar 4. 2 Respon Simulasi *Duty Cycle* dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 12 m/s.



Gambar 4. 3 Respon Simulasi Daya *Rectifier* dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 12 m/s.



Gambar 4. 4 Respon Simulasi Tegangan *Rectifier* dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 12 m/s.

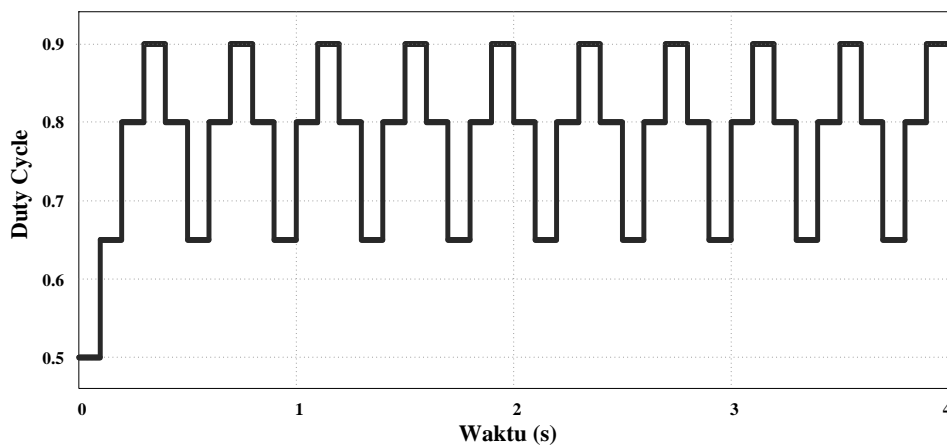


Gambar 4. 5 Respon Simulasi Arus *Rectifier* dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 12 m/s.

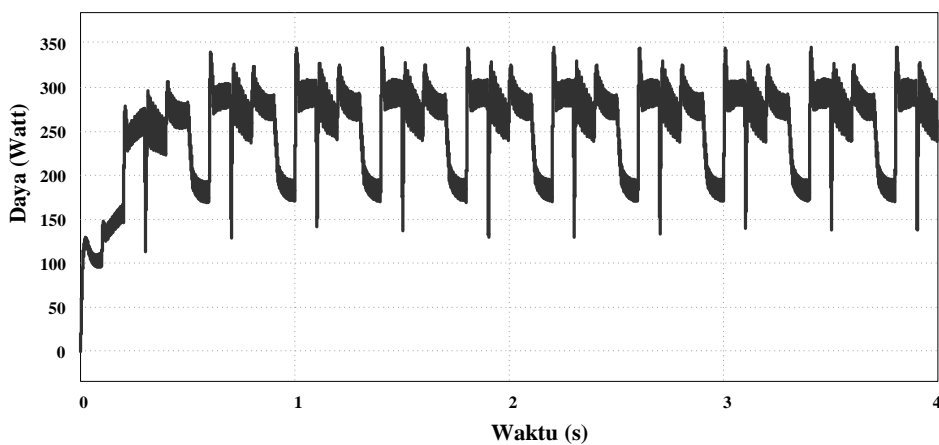
Dari hasil pengujian simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 sampai dengan Gambar 4.5 dapat diketahui bahwa pada kecepatan angin 12 m/s, algoritma P&O dapat mendeteksi daya maksimum pada 459,57 watt, yaitu saat tegangan rectifier 93,73 volt dan arus rectifier 5,53 ampere.

B. Saat Kecepatan Angin 8 m/s

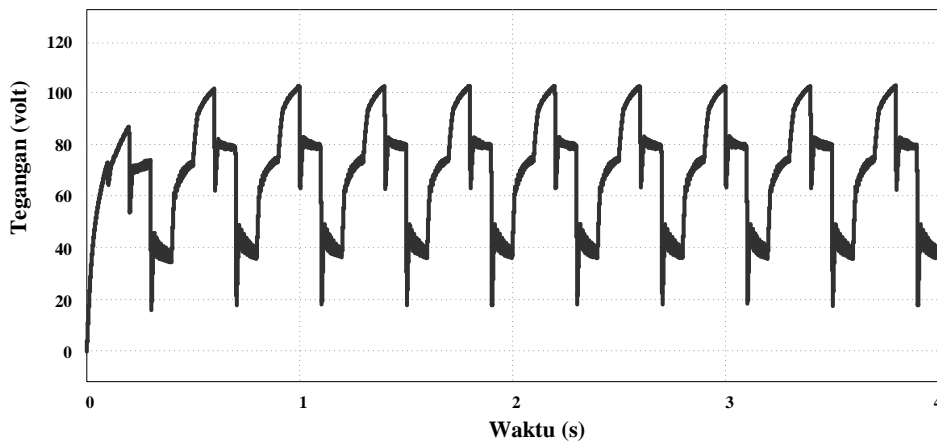
Pengujian simulasi metode MPPT berbasis *Perturb and Observe* pada sistem turbin angin dilakukan saat kecepatan angin 8 m/s ditunjukkan pada Gambar 4.6 sampai dengan Gambar 4.9 sebagai berikut ini.



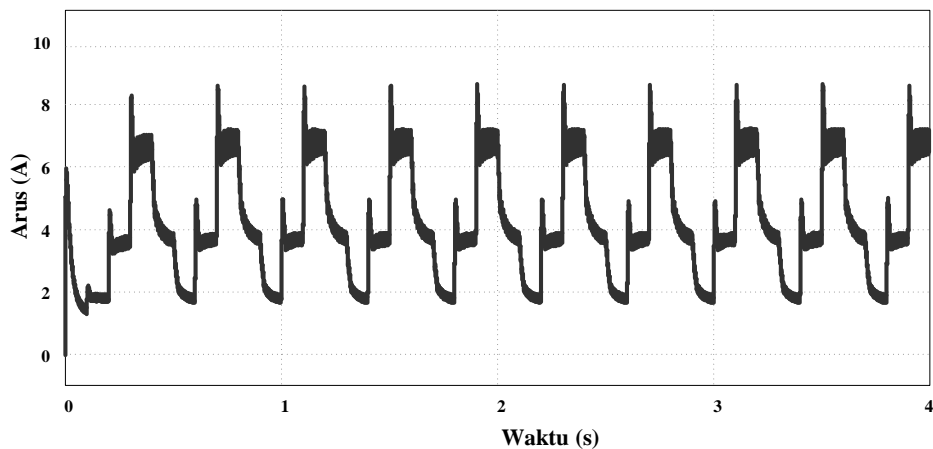
Gambar 4. 6 Respon Simulasi *Duty Cycle* dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 8 m/s.



Gambar 4. 7 Respon Simulasi Daya *Rectifier* dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 8 m/s.



Gambar 4. 8 Respon Simulasi Tegangan *Rectifier* dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 8 m/s.



Gambar 4. 9 Respon Simulasi Arus *Rectifier* dengan Algoritma P&O saat Kecepatan Angin 8 m/s.

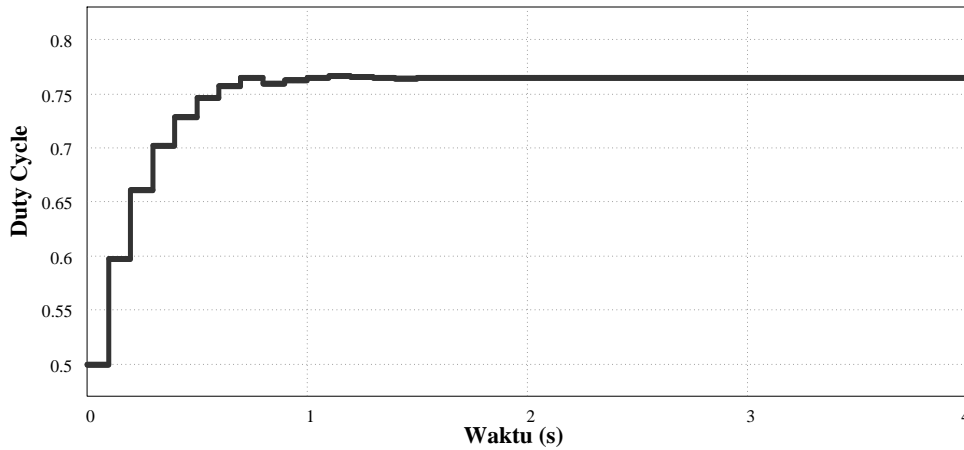
Dari hasil pengujian simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 sampai dengan Gambar 4.9 dapat diketahui bahwa pada kecepatan angin 12 m/s, algoritma P&O dapat mendeteksi daya maksimum pada 262,47 watt, yaitu saat tegangan rectifier 72,71 volt dan arus rectifier 4,581 ampere.

4.1.1.2 Pengujian Metode MPPT berbasis *Modified Perturb and Observe*.

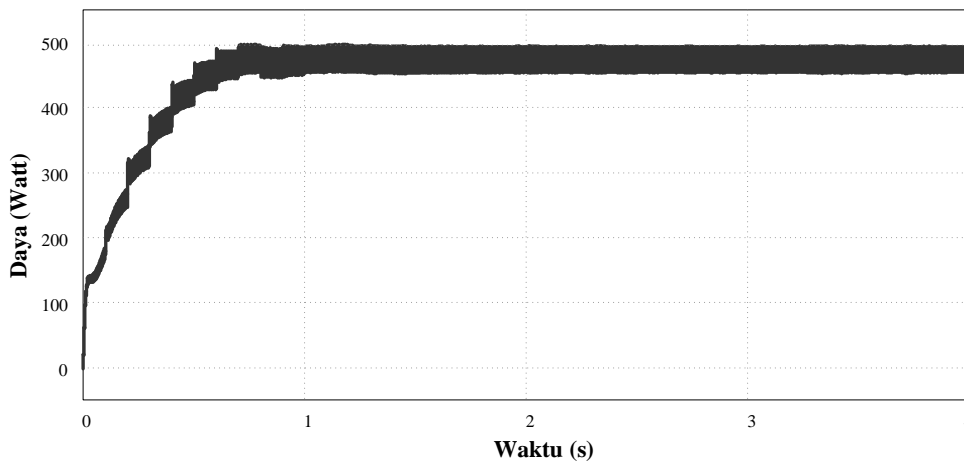
Pengujian simulasi metode MPPT berbasis *Modified Perturb and Observe* pada sistem turbin angin dilakukan saat kecepatan angin 12 m/s dan 8 m/s.

A. Saat Kecepatan Angin 12 m/s

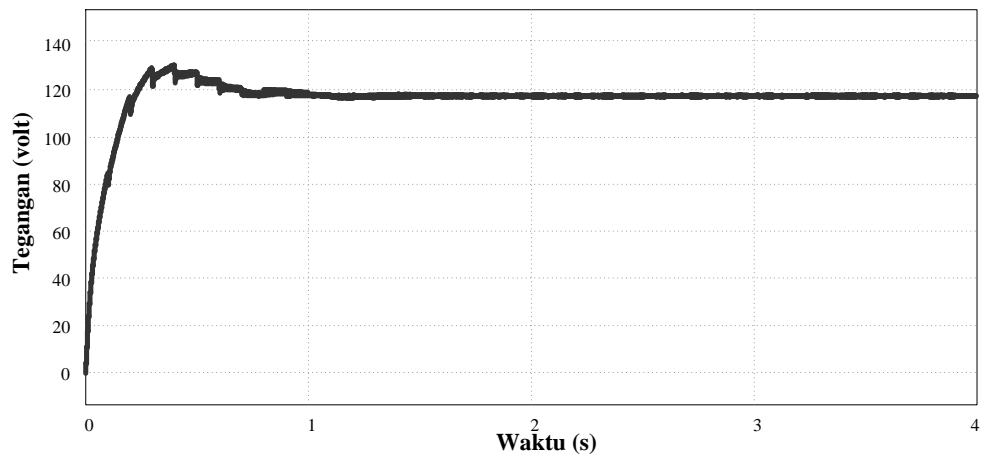
Pengujian simulasi metode MPPT berbasis *Modified Perturb and Observe* pada sistem turbin angin dilakukan saat kecepatan angin 12 m/s ditunjukkan pada Gambar 4.10 sampai dengan Gambar 4.13 sebagai berikut ini.



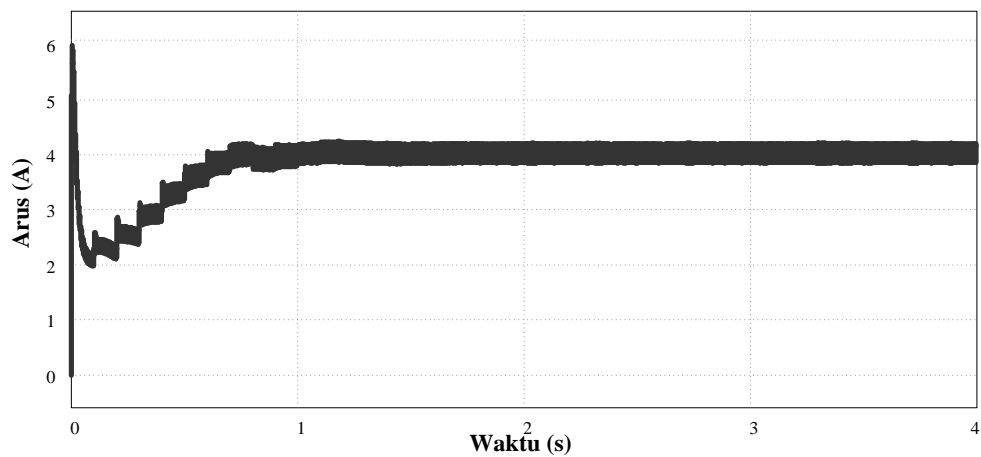
Gambar 4. 10 Respon Simulasi *Duty Cycle* dengan Algoritma *Modified P&O* saat Kecepatan Angin 12 m/s.



Gambar 4. 11 Respon Simulasi Daya *Rectifier* dengan Algoritma *Modified P&O* saat Kecepatan Angin 12 m/s.



Gambar 4. 12 Respon Simulasi Tegangan *Rectifier* dengan Algoritma *Modified P&O* saat Kecepatan Angin 12 m/s.

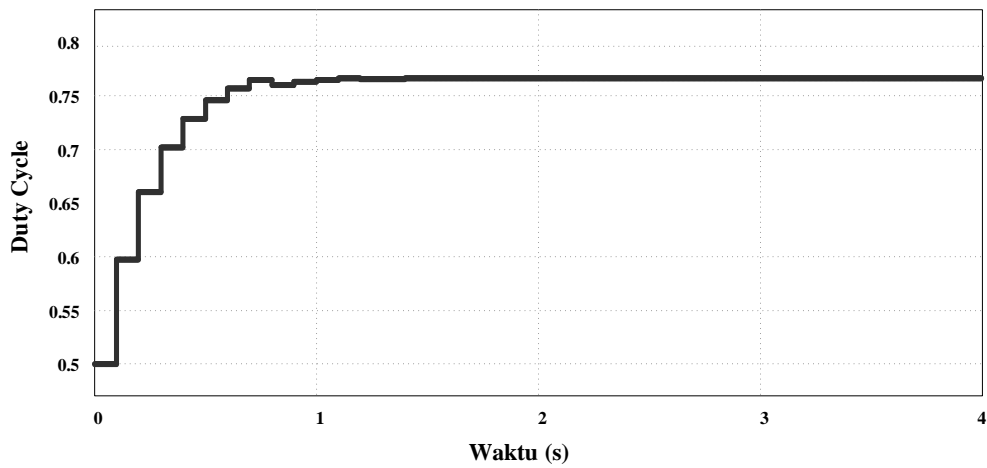


Gambar 4. 13 Respon Simulasi Arus *Rectifier* dengan Algoritma *Modified P&O* saat Kecepatan Angin 12 m/s.

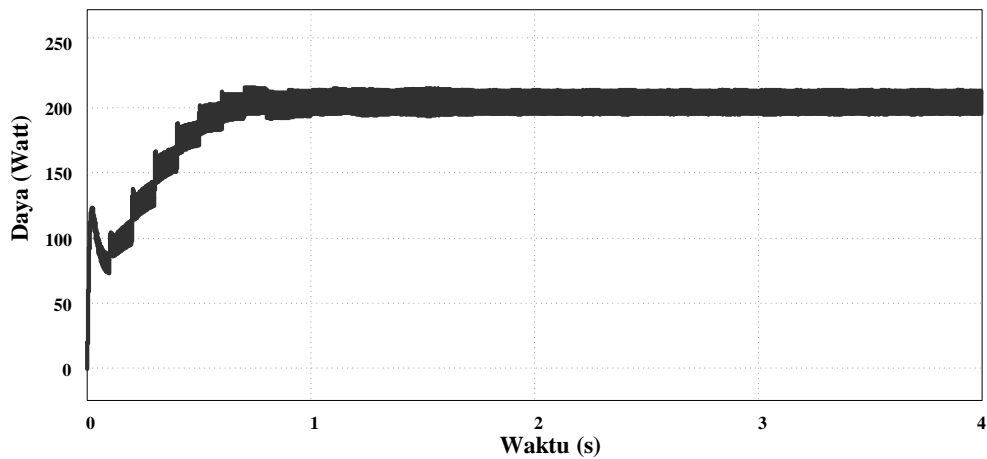
Dari hasil pengujian simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 sampai dengan Gambar 4.13 dapat diketahui bahwa pada kecepatan angin 12 m/s, algoritma *Modified P&O* dapat mendeteksi daya maksimum pada 479,96 watt, yaitu saat tegangan rectifier 117,63 volt dan arus rectifier 4,080 ampere.

B. Saat Kecepatan Angin 8 m/s

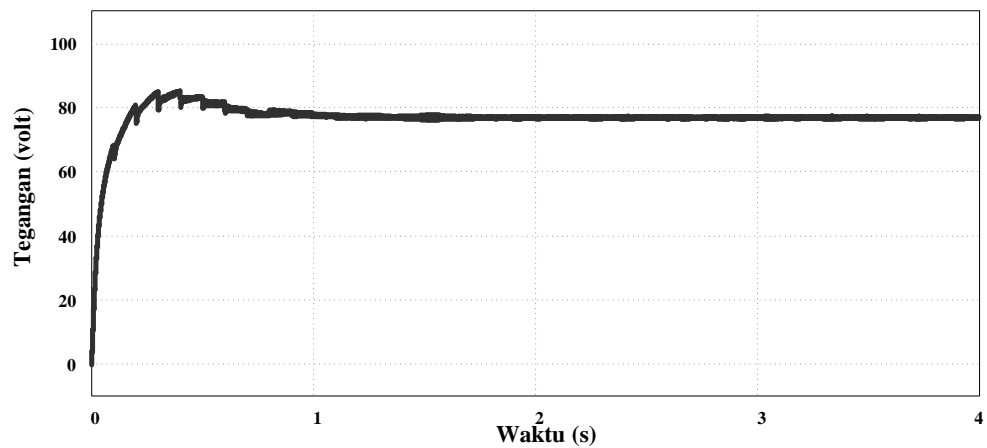
Pengujian simulasi metode MPPT berbasis *Modified Perturb and Observe* pada sistem turbin angin dilakukan saat kecepatan angin 8 m/s ditunjukkan pada Gambar 4.14 sampai dengan Gambar 4.17 sebagai berikut ini.



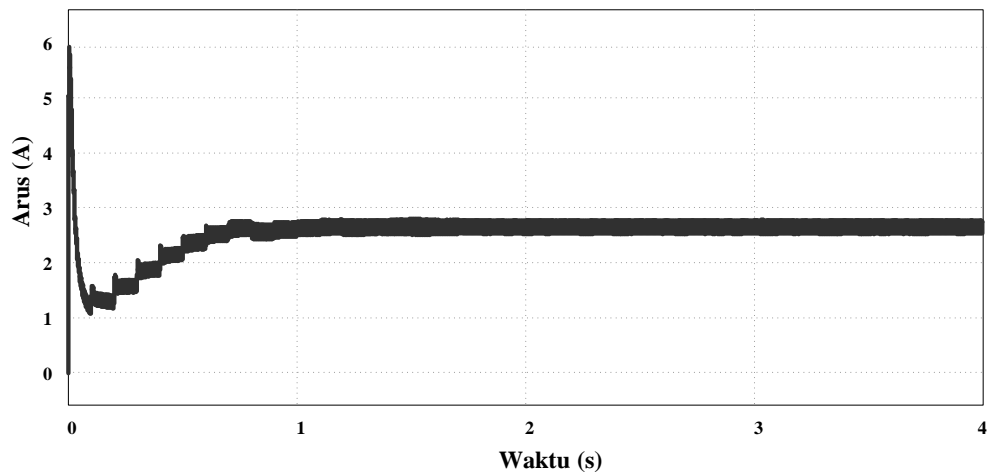
Gambar 4. 14 Respon Simulasi *Duty Cycle* dengan Algoritma *Modified P&O* saat Kecepatan Angin 8 m/s.



Gambar 4. 15 Respon Simulasi Daya *Rectifier* dengan Algoritma *Modified P&O* saat Kecepatan Angin 8 m/s.



Gambar 4. 16 Respon Simulasi Tegangan *Rectifier* dengan Algoritma *Modified P&O* saat Kecepatan Angin 8 m/s.

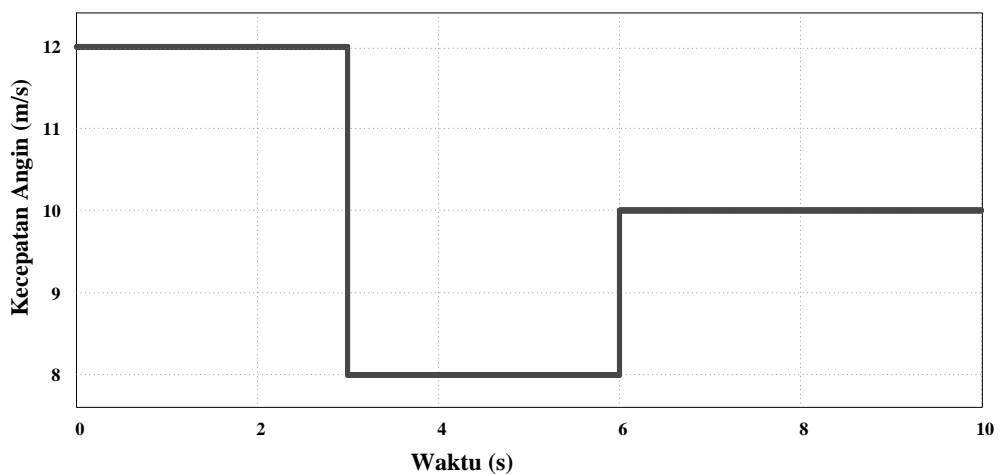


Gambar 4. 17 Respon Simulasi Arus *Rectifier* dengan Algoritma *Modified P&O* saat Kecepatan Angin 8 m/s.

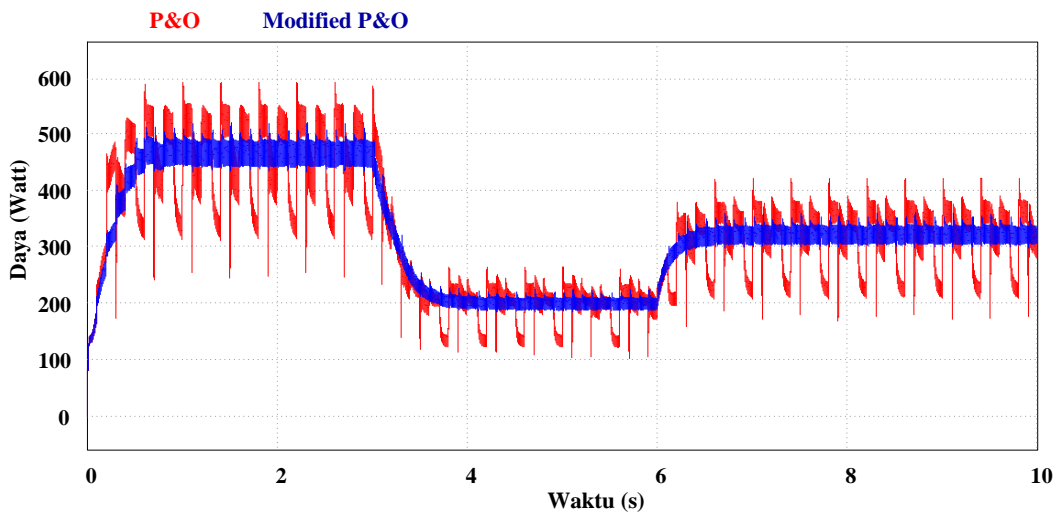
Dari hasil pengujian simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 sampai dengan Gambar 4.17 dapat diketahui bahwa pada kecepatan angin 12 m/s, algoritma *Modified P&O* dapat mendeteksi daya maksimum pada 212,78 watt, yaitu saat tegangan rectifier 78,97 volt dan arus rectifier 2,79 ampere.

4.1.1.3 Perbandingan Hasil Simulasi Pengujian Kinerja MPPT

Untuk mengetahui kinerja dua metode MPPT yang berbeda, maka simulasi dilakukan dengan cara memvariasikan kecepatan angin dalam satu waktu. Kecepatan angin akan divariasikan saat 12 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s. Grafik variasi kecepatan angin yang digunakan pada simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 4.18.



Gambar 4. 18 Variasi Kecepatan Angin.

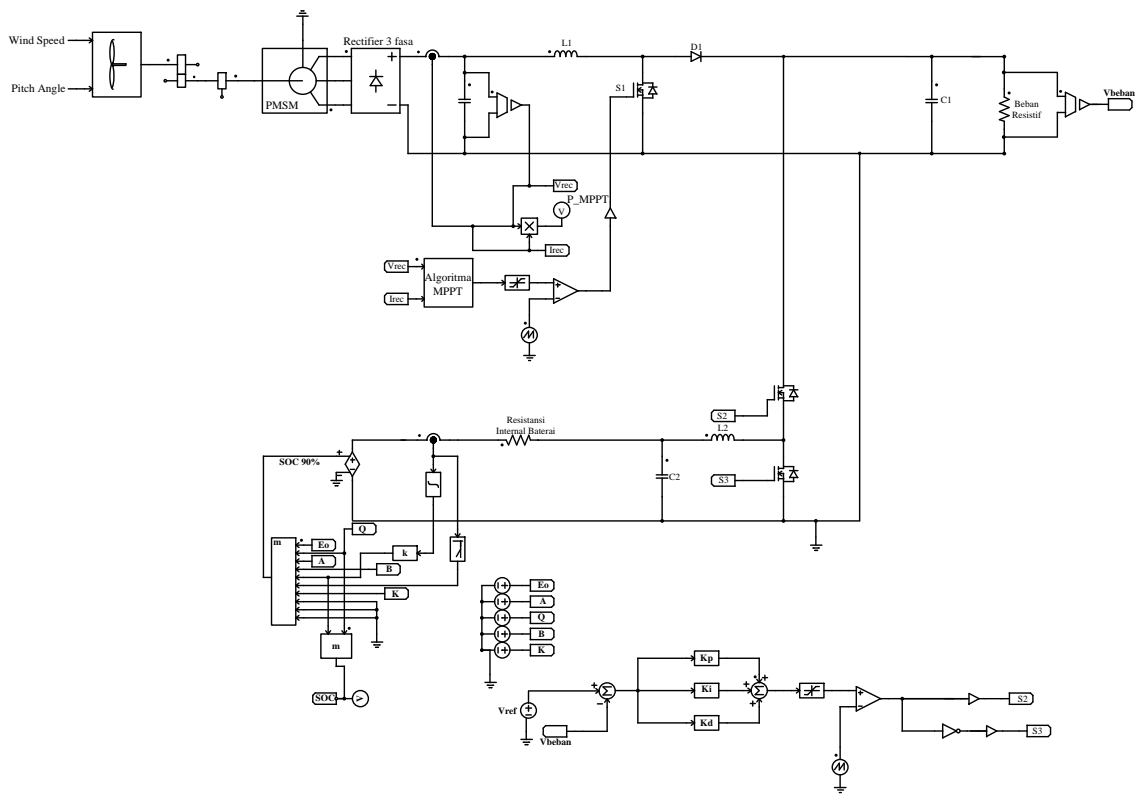


Gambar 4. 19 Respon Hasil Simulasi Perbandingan Kinerja MPPT dengan Variasi Kecepatan Angin.

Dari Gambar 4.19, terlihat bahwa kontrol MPPT dapat bekerja dengan baik mengikuti perubahan kecepatan angin. Dari hasil pengujian simulasi diatas, dapat disimpulkan bahwa dengan memodifikasi algoritma P&O dapat mengurangi osilasi selama proses pencarian titik maksimum daya dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi *steady state*-nya lebih cepat.

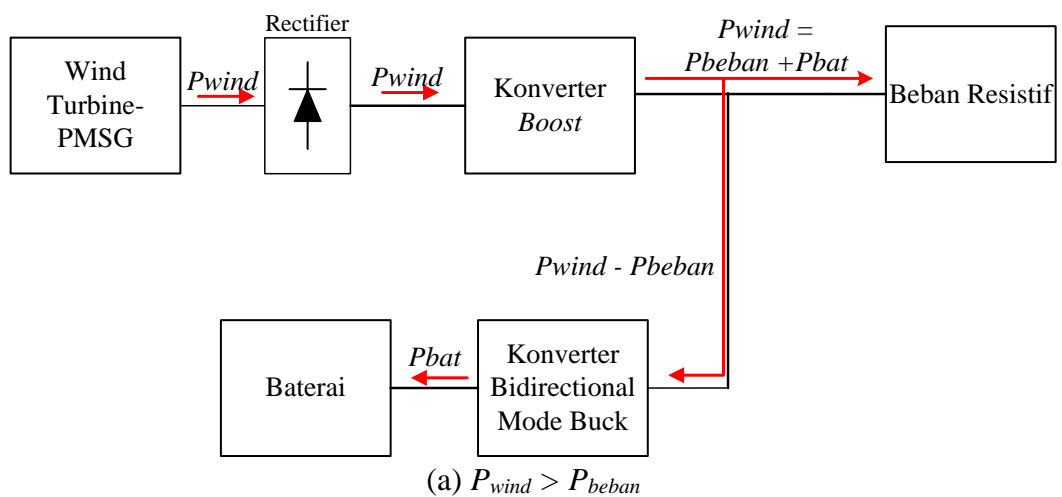
4.2 Pengujian Simulasi Sistem Turbin Angin saat Kondisi Statis

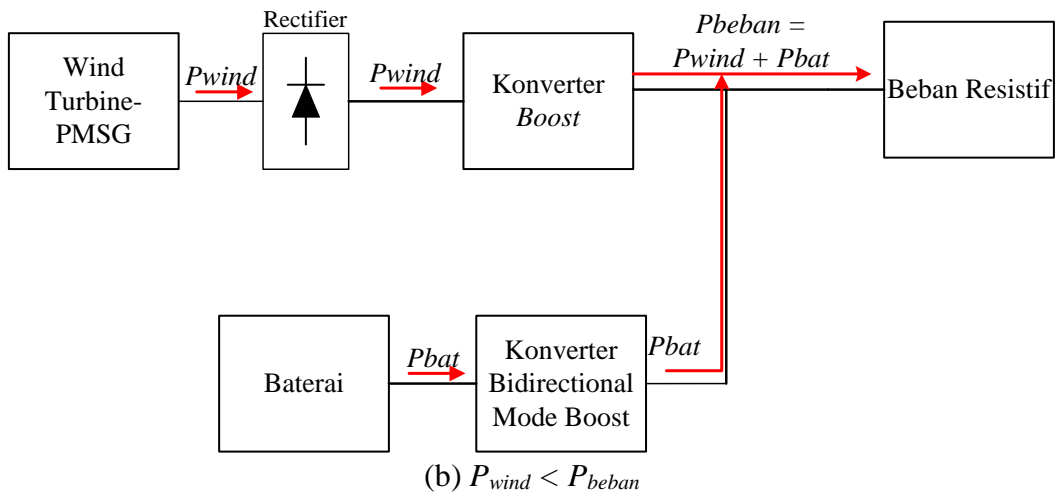
Pengujian simulasi ini bertujuan untuk mengetahui kinerja sistem turbin angin sesuai dengan kondisi kecepatan angin, kapasitas baterai, dan kebutuhan beban. Pada Gambar 4.20 menunjukkan desain rangkaian untuk pengujian simulasi saat kondisi statis.



Gambar 4. 20 Desain Rangkaian Untuk Pengujian Simulasi Sistem Saat Kondisi Statis.

Pada pengujian simulasi kali ini terdapat dua kondisi, yaitu kondisi saat daya maksimum dari sistem turbin angin melebihi kebutuhan beban dan kondisi kebutuhan beban melebihi daya maksimum dari sistem turbin angin. Gambar 4.21 menunjukkan ilustrasi dari aliran daya pada setiap kondisi saat melakukan pengujian simulasi.





Gambar 4. 21 Aliran Daya pada setiap Kondisi.

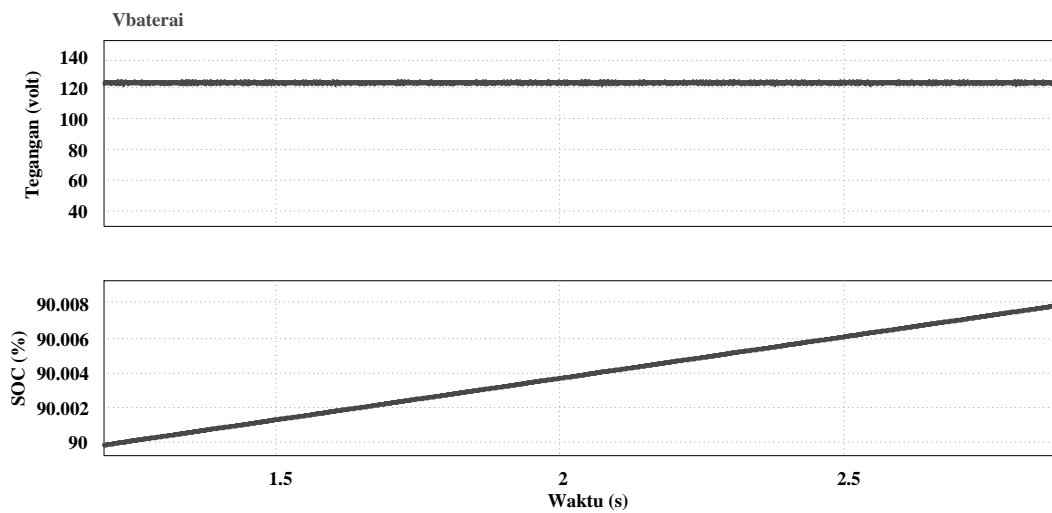
4.2.1 Kondisi Saat Daya Sistem Turbin Angin melebihi Daya Beban ($P_{wind} > P_{beban}$)

Pengujian pada simulasi ini dilakukan dengan menggunakan beban 300 Watt dan diasumsikan pada kondisi kecepatan angin 12 m/s. Sedangkan baterai dikondisikan dalam keadaan baterai telah terisi 90%. Hasil simulasi dilihat saat sistem telah bekerja dalam kondisi *steady state*.

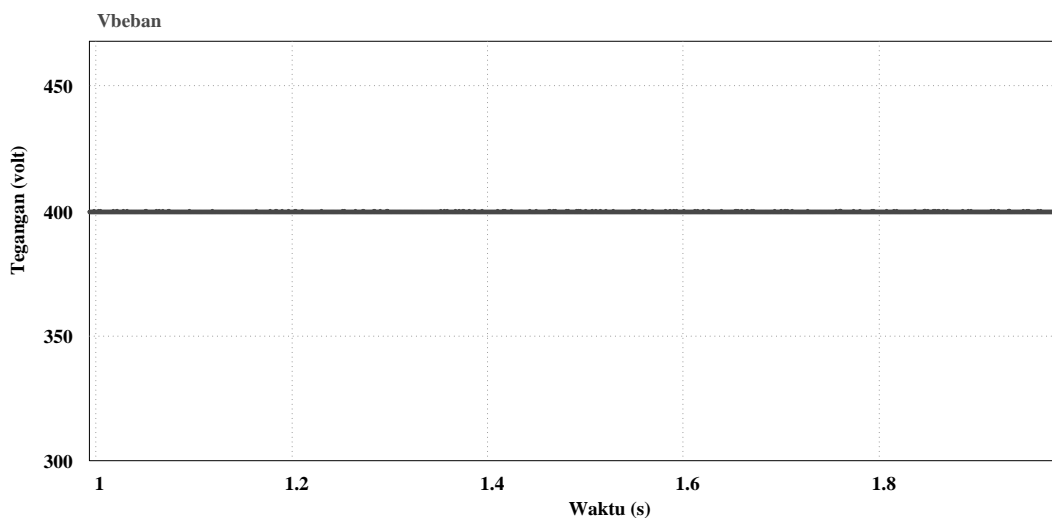
Sistem turbin angin menghasilkan daya maksimum lebih besar daripada daya yang dibutuhkan beban. Pada Gambar 4.22 SOC baterai mengalami kenaikan dan tegangan pada baterai diatas 120 volt yang artinya bahwa baterai pada kondisi pengisian. Untuk Gambar 4.23 menunjukkan bahwa tegangan bus DC terjaga konstan pada 400 volt. Kelebihan daya pada sistem turbin angin sebesar 179,27 watt dialirkan menuju baterai melalui konverter *bidirectional* dengan mode pengisian baterai, maka dari itu pada Tabel 4.1 menunjukkan polaritas negatif pada pembacaan daya di sisi baterai dikarenakan aliran daya datang menuju ke baterai.

Tabel 4. 1 Aliran Daya pada Sistem saat Kondisi $P_{wind} > P_{beban}$ pada Kondisi Kecepatan Angin 12 m/s.

	Daya (Watt)
Turbin Angin	477,31
Baterai	-179,27
Beban	300,00



Gambar 4. 22 Tegangan dan SOC Baterai saat Kondisi $P_{wind} > P_{beban}$.



Gambar 4. 23 Tegangan Bus DC saat Kondisi $P_{wind} > P_{beban}$.

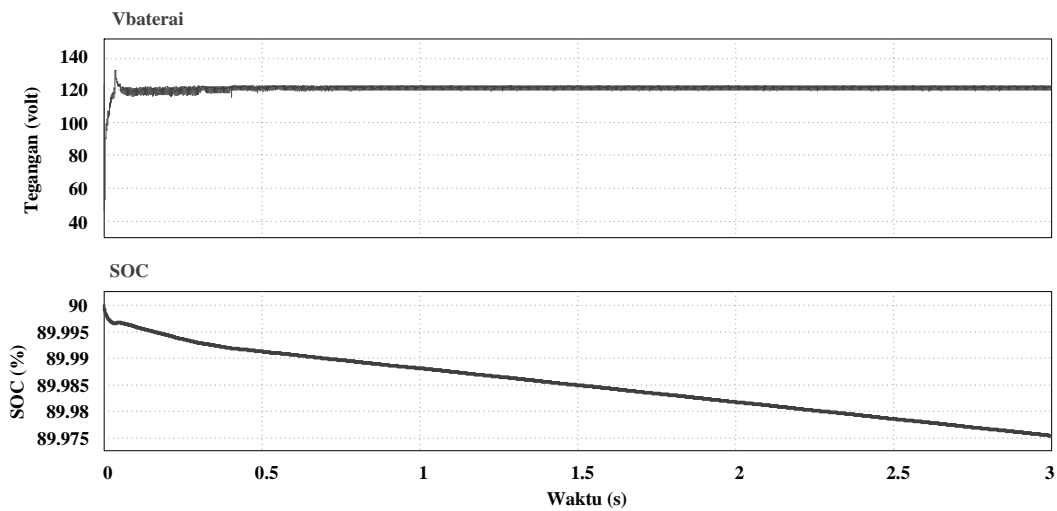
4.2.2 Kondisi Saat Daya Beban melebihi Daya Sistem Turbin Angin ($P_{beban} > P_{wind}$)

Pengujian pada simulasi ini dilakukan dengan menggunakan beban 500 Watt dan simulasi akan dilakukan pada kecepatan 10 m/s. Sedangkan baterai dikondisikan dalam keadaan terisi penuh atau dengan kata lain SOC baterai 90%.

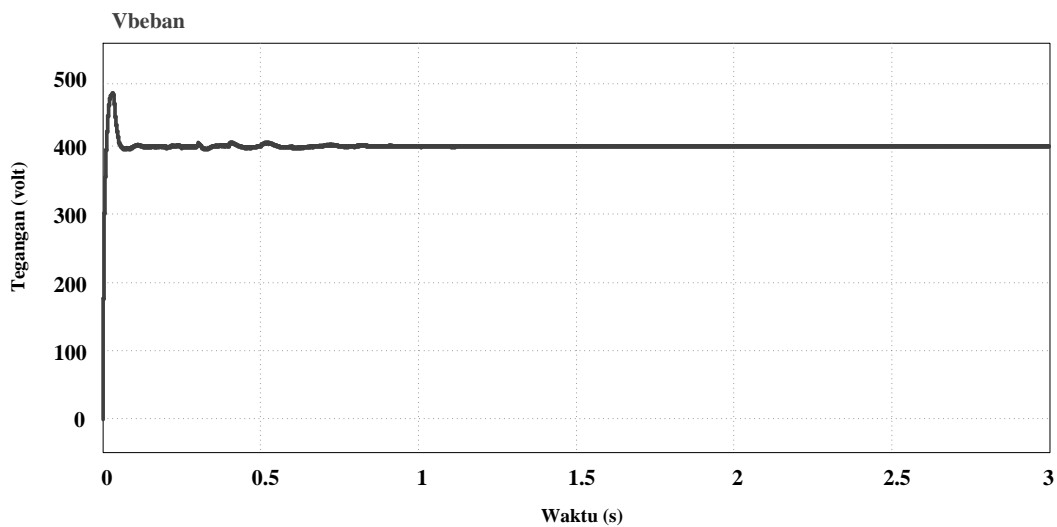
Pada Tabel 4.2 menunjukkan hasil simulasi besar aliran daya pada sistem. Daya maksimum dari sistem turbin angin sebesar 323,61 Watt. Sehingga kekurangan daya pada beban akan disuplai oleh baterai sebesar 193,29 Watt.

Tabel 4. 2 Aliran Daya pada Sistem saat Kondisi $P_{beban} > P_{wind}$ pada Kondisi Kecepatan Angin 10 m/s

	Daya (Watt)
Turbin Angin	323,61
Baterai	193,29
Beban	500,00



Gambar 4. 24 Tegangan dan SOC Baterai saat Kondisi $P_{beban} > P_{wind}$ saat Kecepatan Angin 10 m/s.

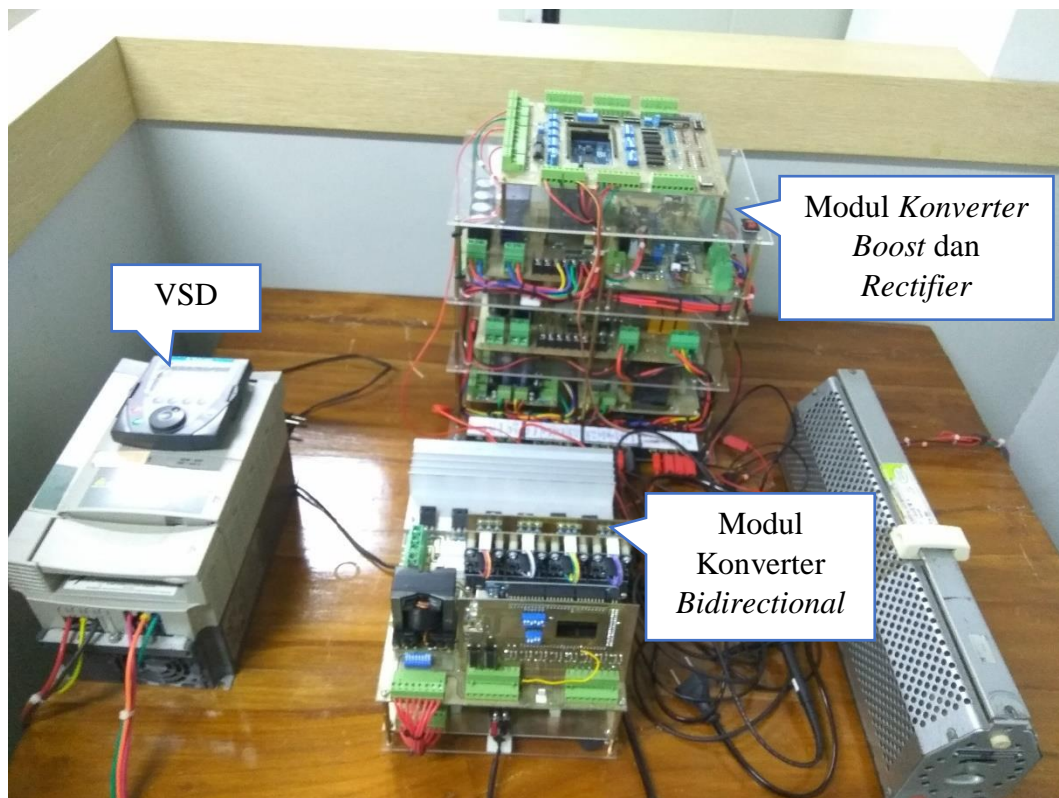


Gambar 4. 25 Tegangan Bus DC saat Kondisi $P_{beban} > P_{wind}$ pada Kecepatan Angin 10 m/s.

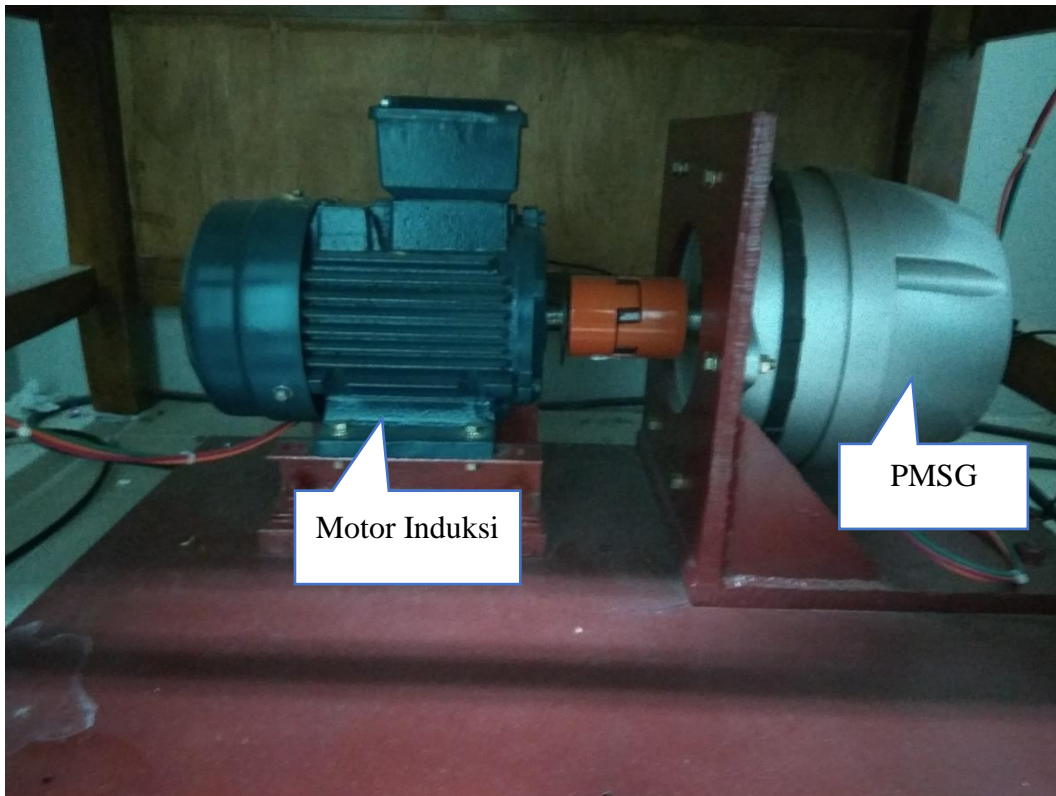
Dari hasil simulasi diatas dapat dianalisa bahwa baterai menyuplai daya sebesar 38,65 % dari total kebutuhan beban. Pada Gambar 4.24 menunjukkan SOC pada baterai mengalami penurunan sehingga itu menandakan bahwa baterai berada pada kondisi pengosongan baterai atau discharging dan tegangan baterai mengalami penurunan dibawah 120 volt. Dari Gambar 4.25 menunjukkan bahwa tegangan di bus DC terjaga konstan 400 volt.

4.3 Hasil Pengujian Hardware MPPT

Hasil dari penelitian ini antara lain pengujian algoritma MPPT pada perangkat keras dan pengujian konverter *bidirectional*. Modul perangkat keras yang digunakan untuk pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.26 dan Gambar 4.27 menunjukkan emulator berbasis laboratorium turbin angin dan PMSG.

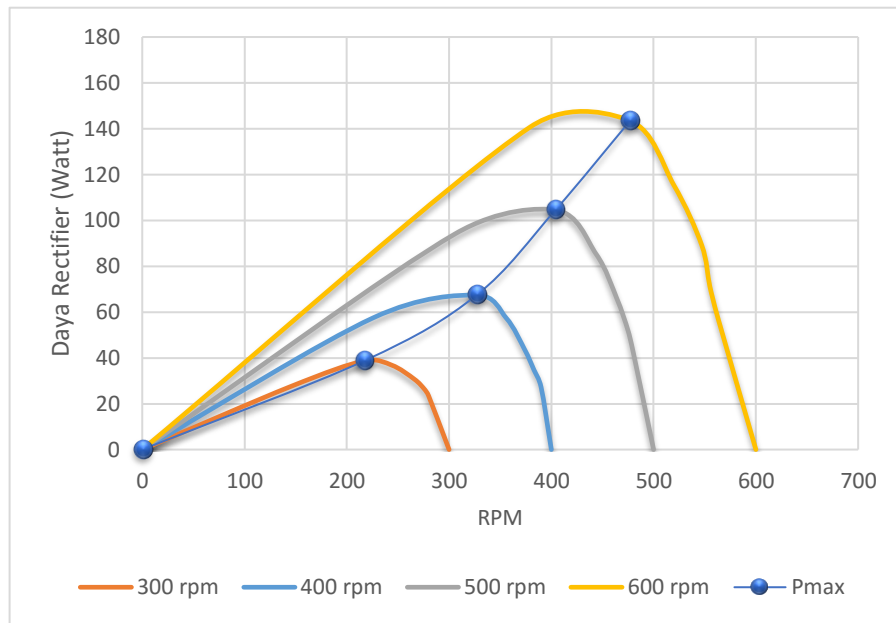


Gambar 4. 26 Modul Perangkat Keras yang Digunakan untuk Pengujian.

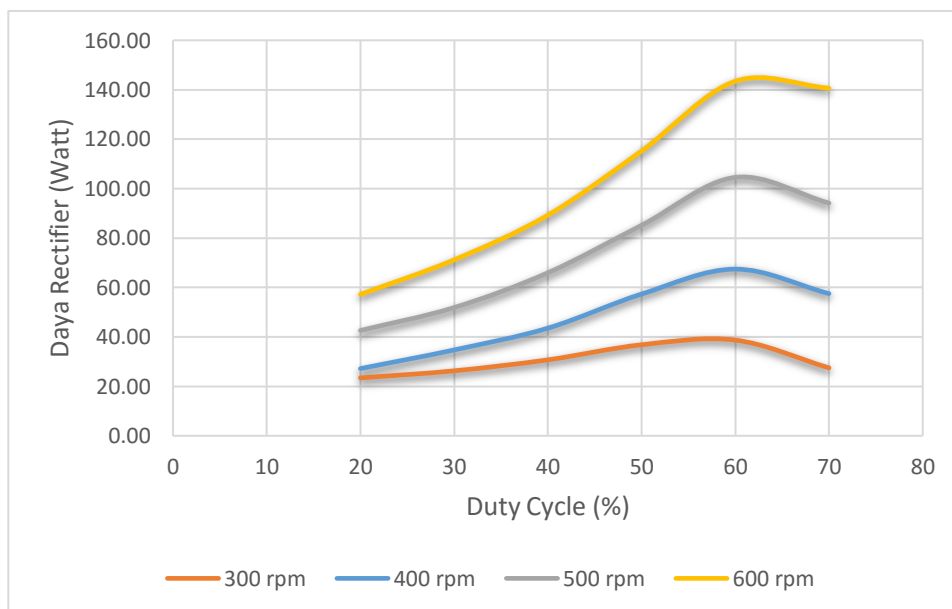


Gambar 4. 27 Emulator Berbasis Laboratorium Turbin Angin dan PMSG.

Pada penelitian ini, motor induksi digunakan untuk memodelkan kecepatan dan karakteristik dari turbin angin. VSD atau *Variable Speed Drive* digunakan untuk mengendalikan kecepatan dan torsi pada motor induksi. Generator PMSG yang terkopel dengan motor induksi digunakan untuk menghasilkan daya listrik. Untuk modul *rectifier* dan konverter *boost* digunakan untuk menguji kinerja algoritma MPPT dengan mengekstrak daya maksimum. Sedangkan modul konverter *bidirectional* digunakan untuk melakukan operasi dua arah yaitu proses pengisian dan pengosongan baterai. Pengujian kinerja algoritma MPPT dilakukan pada kecepatan konstan 300 RPM, 400 RPM, 500 RPM, dan 600 RPM. Pengujian MPPT akan menggunakan dua algoritma yang berbeda, yaitu P&O dan *Modified P&O*.



Gambar 4. 28 Kurva Karakteristik Daya *Rectifier* terhadap RPM.

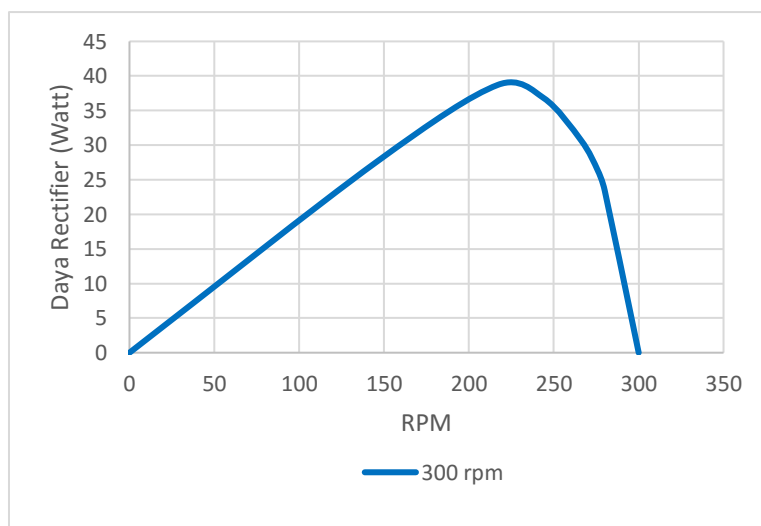


Gambar 4. 29 Kurva Karakteristik Daya *Rectifier* terhadap *Duty Cycle*.

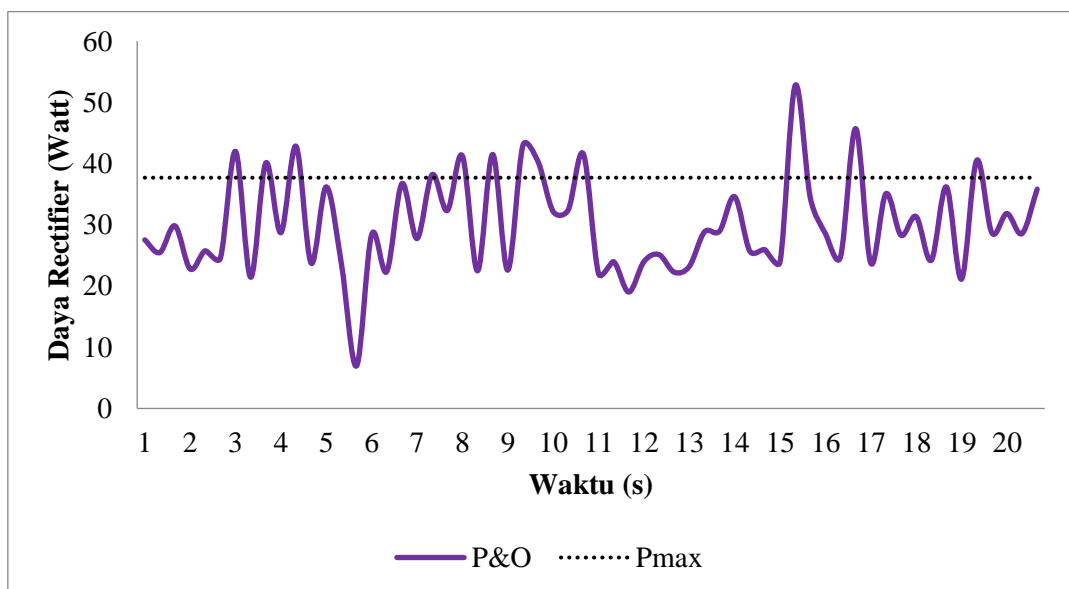
Hasil dari kurva karakteristik daya *rectifier* terhadap RPM pada Gambar 4.28, menunjukkan bahwa motor induksi sebagai emulator turbin angin dapat menghasilkan kurva dengan titik puncak di kecepatan tertentu. Dengan demikian, pemodelan motor induksi sebagai emulator turbin angin dapat digunakan untuk pengujian algoritma MPPT untuk skala emulator laboratorium.

Kurva karakteristik antara daya *rectifier* terhadap perubahan *duty cycle* ditunjukkan pada Gambar 4.29. Kenaikan *duty cycle* sangat berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan dengan mengatur *duty cycle* maka titik puncak disetiap perubahan kecepatan motor induksi akan mencapai titik optimum. Oleh karena itu, inisialisasi *duty cycle* awal dan nilai *step size* pada algoritma MPPT sangatlah penting untuk menghasilkan daya optimum di setiap kecepatannya.

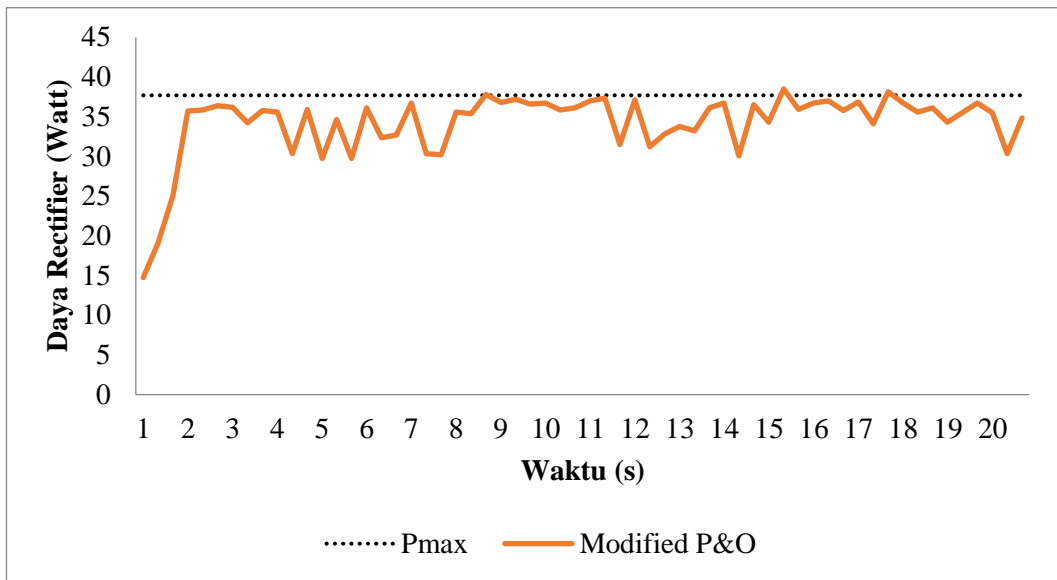
4.3.1 Pengujian Algoritma pada Kecepatan 300 RPM



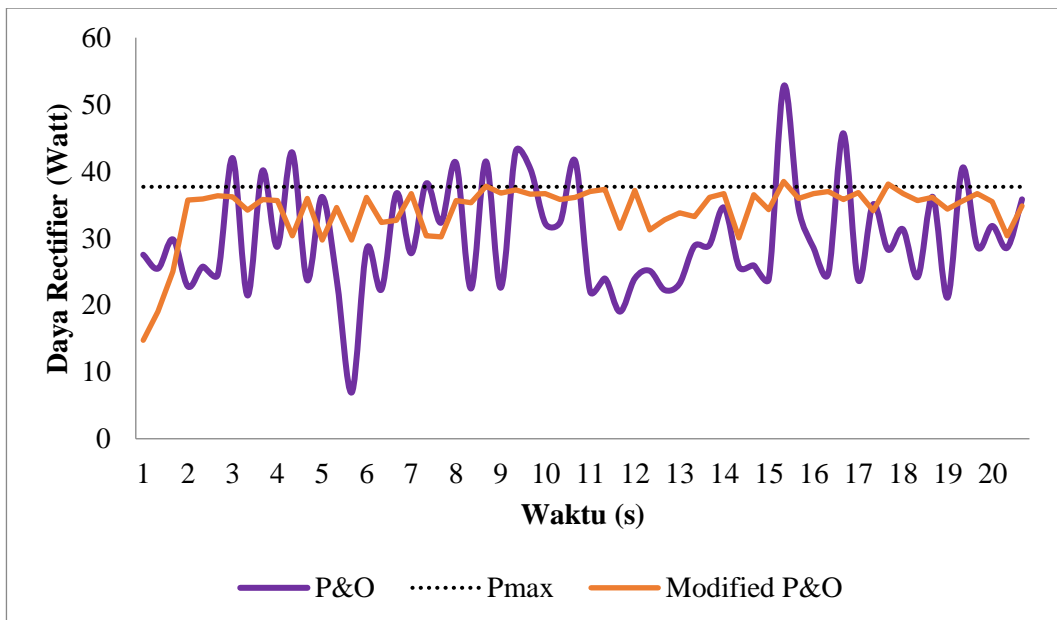
Gambar 4. 30 Kurva *Daya Rectifier* saat Kecepatan 300 RPM.



Gambar 4. 31 Kurva Hasil Pengujian *Daya Rectifier* dengan Metode P&O.



Gambar 4. 32 Kurva Hasil Pengujian *Daya Rectifier* dengan Metode *Modified P&O*.



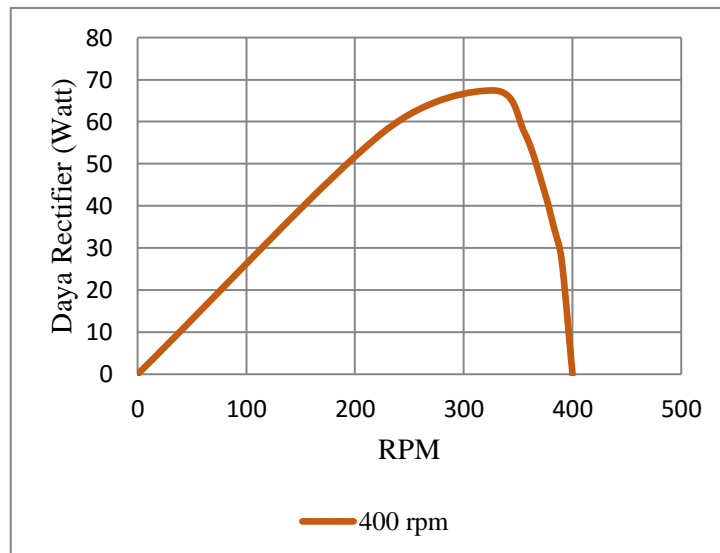
Gambar 4. 33 Kurva Hasil Pengujian *Daya Rectifier* dengan Metode *P&O* dan *Modified P&O*.

Pada Gambar 4.30 menunjukkan daya maksimum pada kecepatan 300 RPM adalah 37,69 Watt. Kurva hasil pengujian perangkat keras dengan menggunakan algoritma *P&O* dan *modified P&O* ditunjukkan pada Gambar 4.33 Hasil pengujian

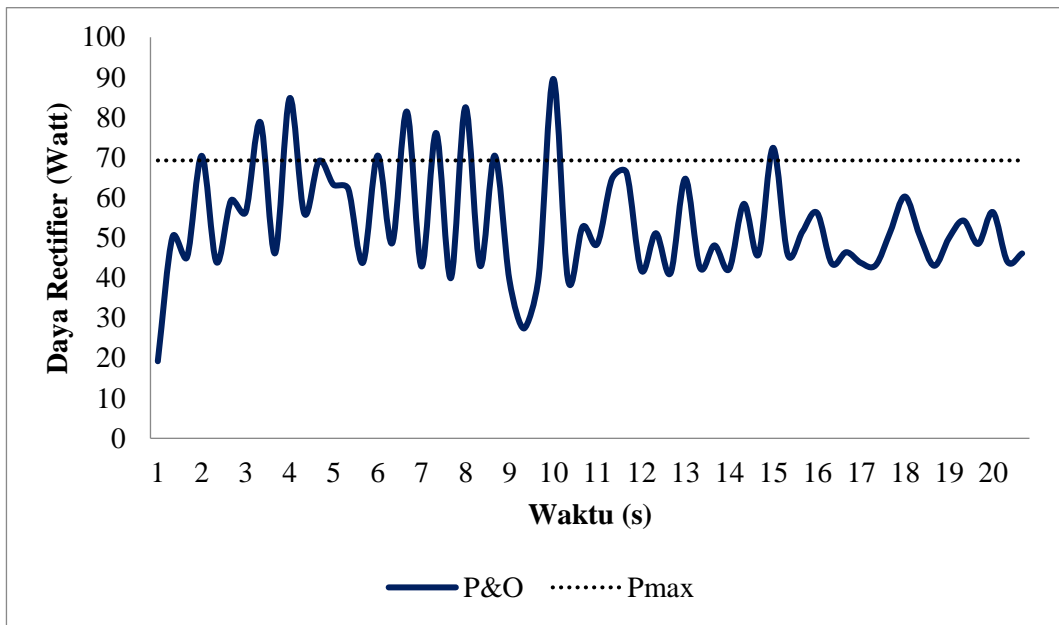
dengan menggunakan algoritma P&O, daya maksimum yang dihasilkan ketika kondisi *steady state* adalah 30,06 Watt. Sedangkan daya maksimum yang dihasilkan dengan menggunakan algoritma *modified* P&O ketika kondisi *steady state* adalah 34,19 Watt.

4.3.2 Pengujian Algoritma pada Kecepatan 400 RPM

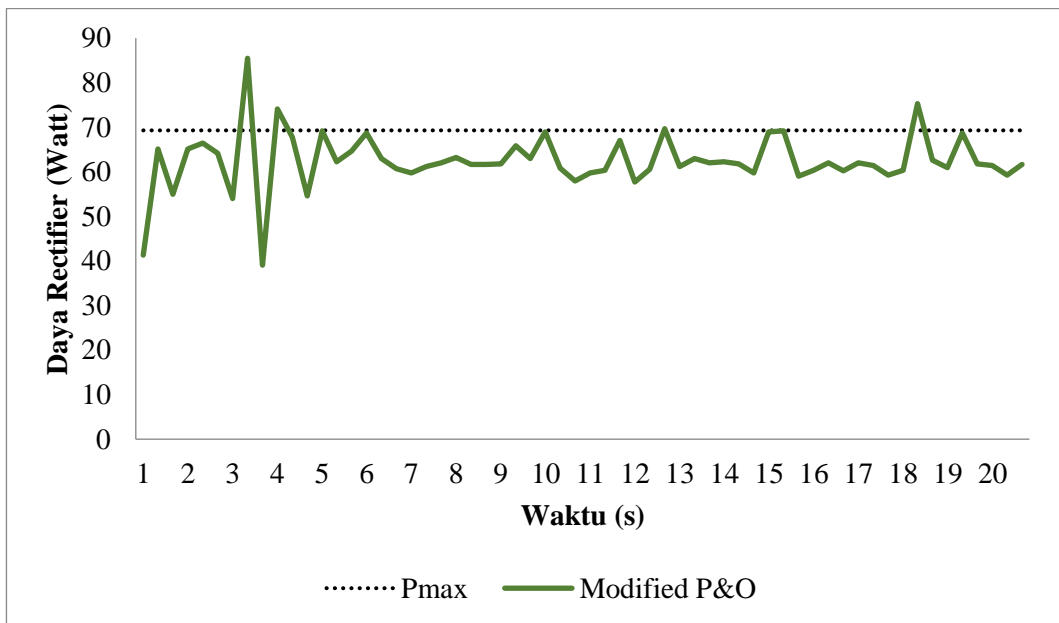
Pada Gambar 4.34 menunjukkan daya maksimum pada kecepatan 400 RPM adalah 69,29 Watt. Kurva hasil pengujian perangkat keras dengan menggunakan algoritma P&O dan *modified* P&O ditunjukkan pada Gambar 4.37. Hasil pengujian dengan menggunakan algoritma P&O, daya maksimum yang dihasilkan ketika kondisi *steady state* adalah 53,61 Watt. Sedangkan daya maksimum yang dihasilkan dengan menggunakan algoritma *modified* P&O ketika kondisi *steady state* adalah 62,46 Watt.



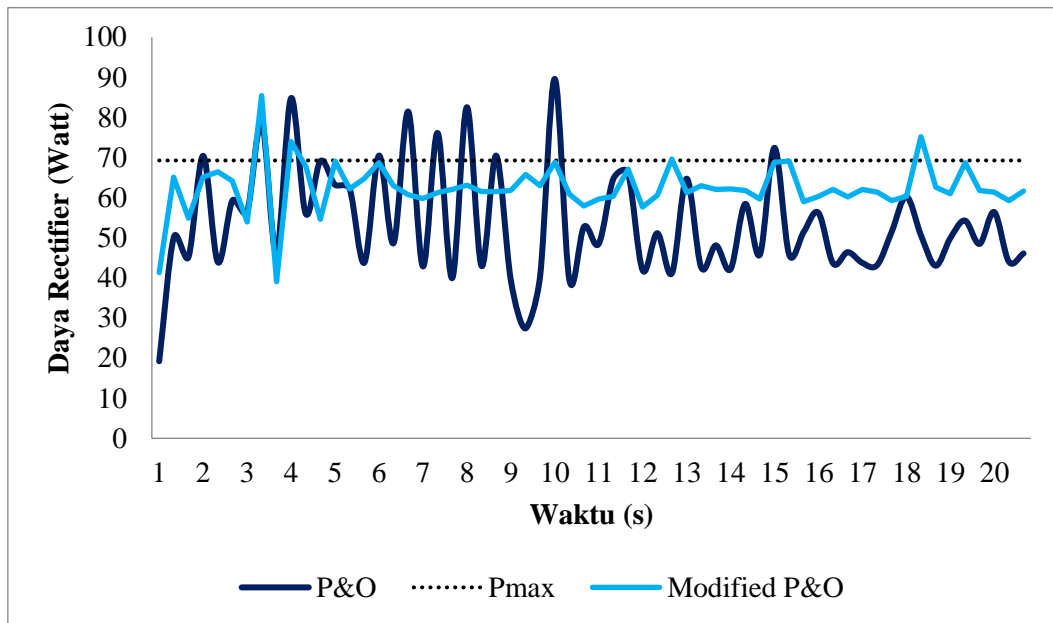
Gambar 4. 34 Kurva *Daya Rectifier* saat Kecepatan 400 RPM.



Gambar 4. 35 Kurva Hasil Pengujian *Daya Rectifier* dengan Metode P&O.



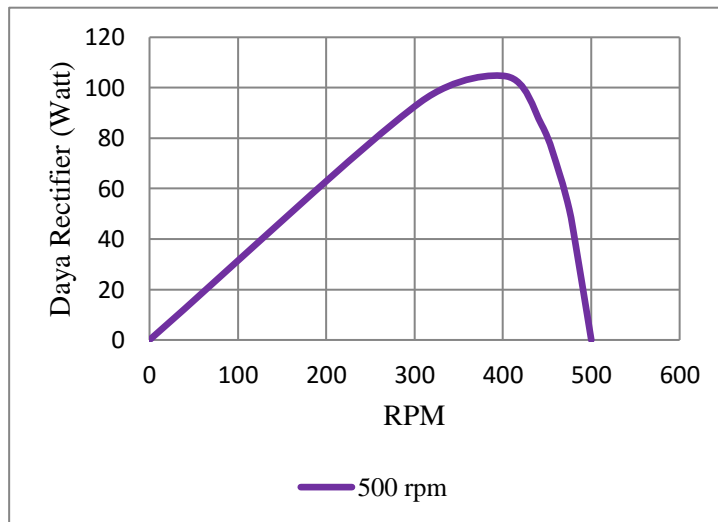
Gambar 4. 36 Kurva Hasil Pengujian *Daya Rectifier* dengan Metode *Modified P&O*.



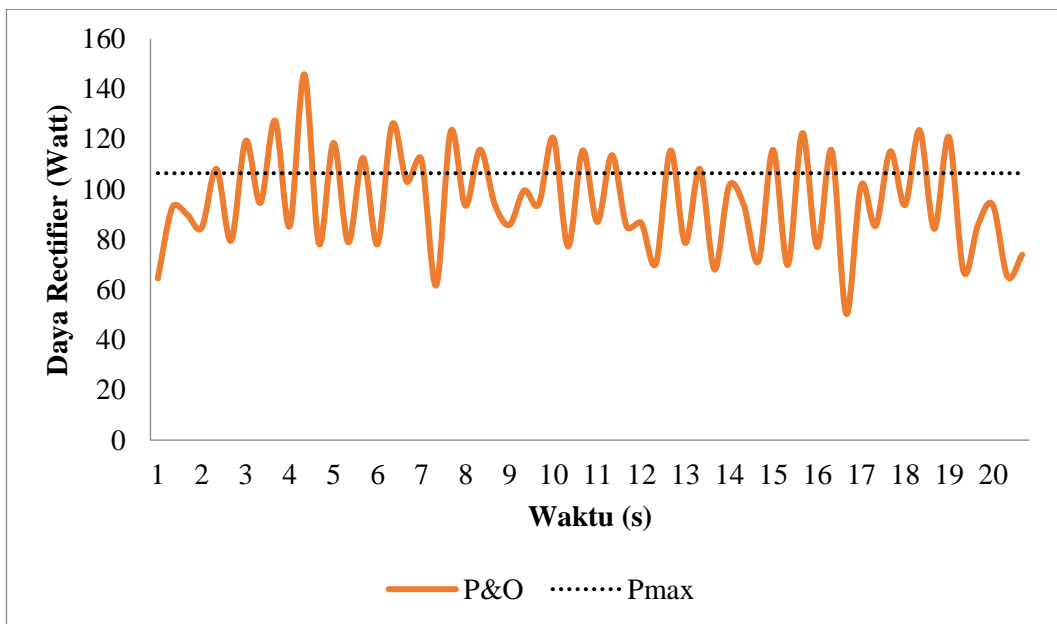
Gambar 4. 37 Kurva Hasil Pengujian *Daya Rectifier* dengan Metode P&O dan *Modified P&O*.

4.3.3 Pengujian Algoritma pada Kecepatan 500 RPM

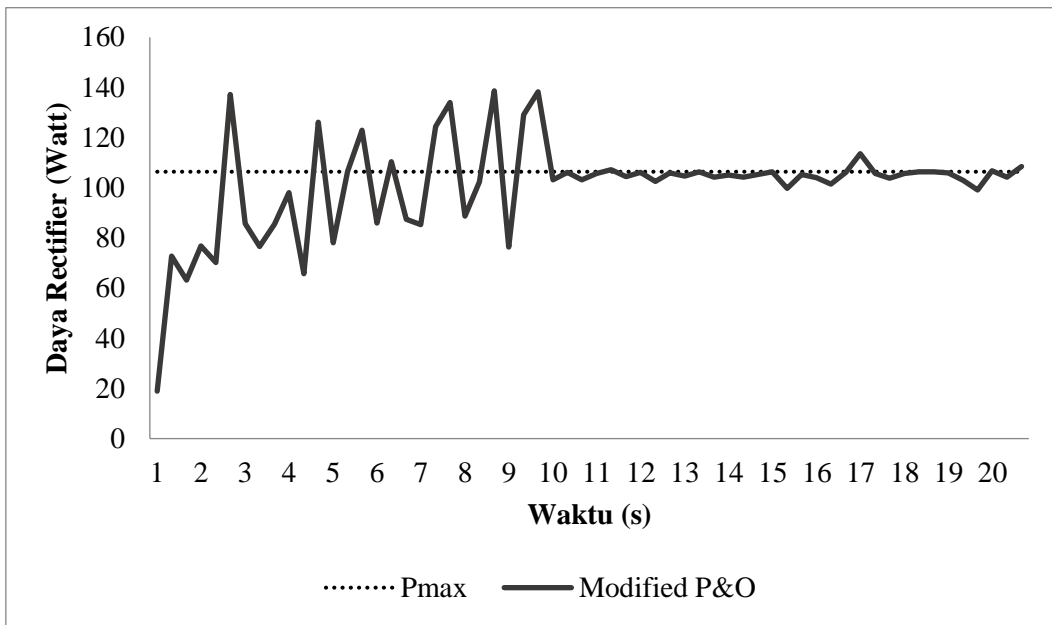
Pada Gambar 4.38 menunjukkan daya maksimum pada kecepatan 500 RPM adalah 106,4 Watt. Kurva hasil pengujian perangkat keras dengan menggunakan algoritma P&O dan *modified P&O* ditunjukkan pada Gambar 4.41 Hasil pengujian dengan menggunakan algoritma P&O, daya maksimum yang dihasilkan ketika kondisi *steady state* adalah 95,34 watt. Sedangkan daya maksimum yang dihasilkan dengan menggunakan algoritma *modified P&O* ketika kondisi *steady state* adalah 100,88 watt.



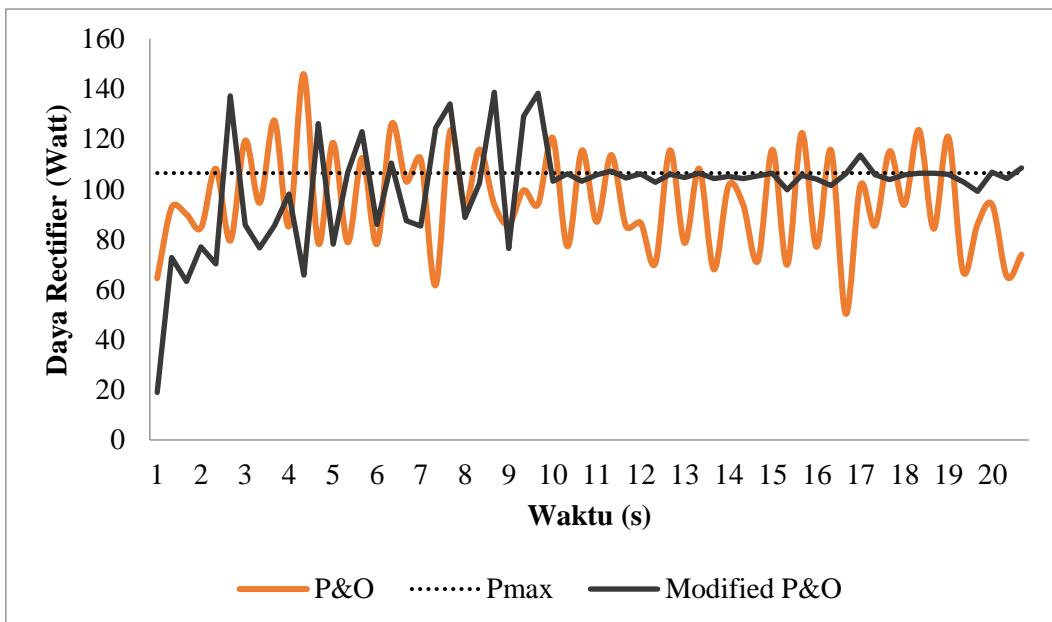
Gambar 4. 38 Kurva *daya rectifier* saat kecepatan 500 RPM.



Gambar 4. 39 Kurva Hasil Pengujian *Daya Rectifier* dengan Metode P&O.

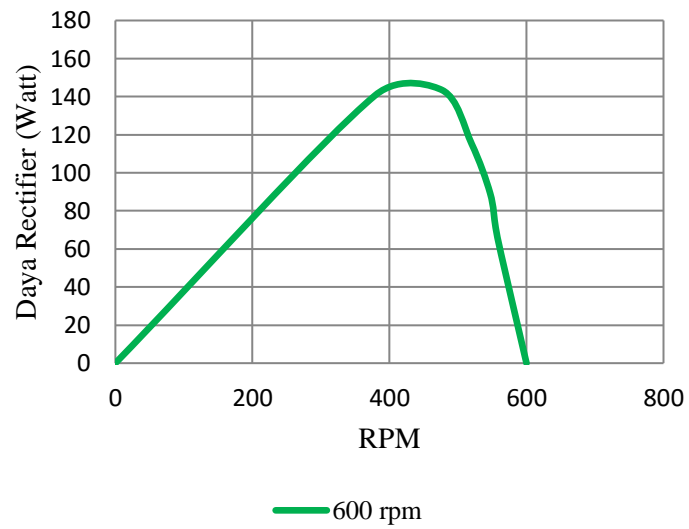


Gambar 4. 40 Kurva Hasil Pengujian *Daya Rectifier* dengan Metode *Modified P&O*.

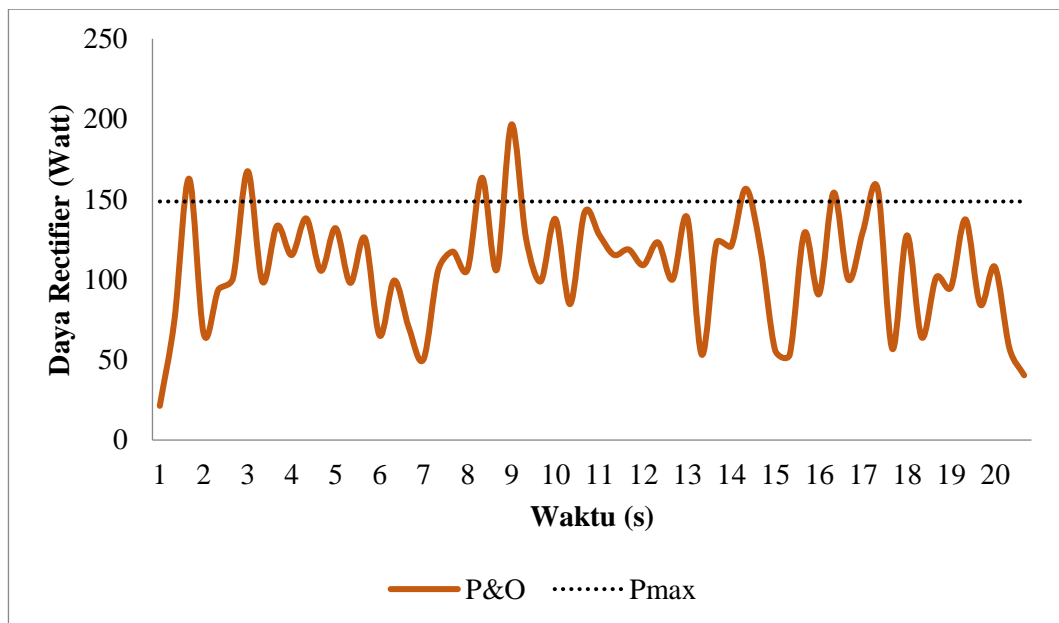


Gambar 4. 41 Kurva hasil pengujian *daya rectifier* dengan metode *P&O* dan *Modified P&O*.

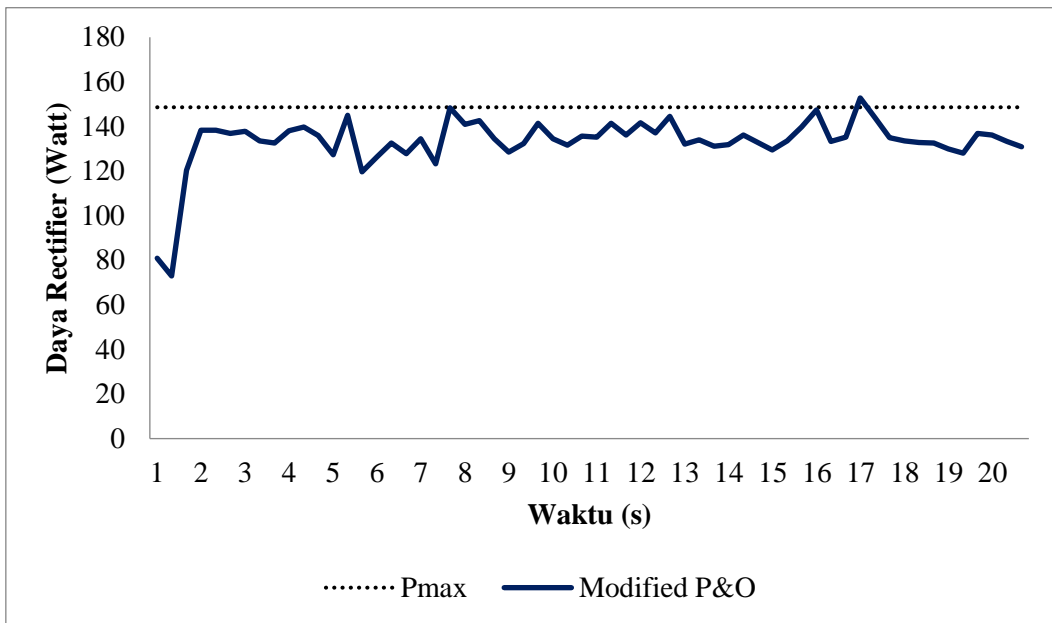
4.3.4 Pengujian Algoritma pada Kecepatan 600 RPM



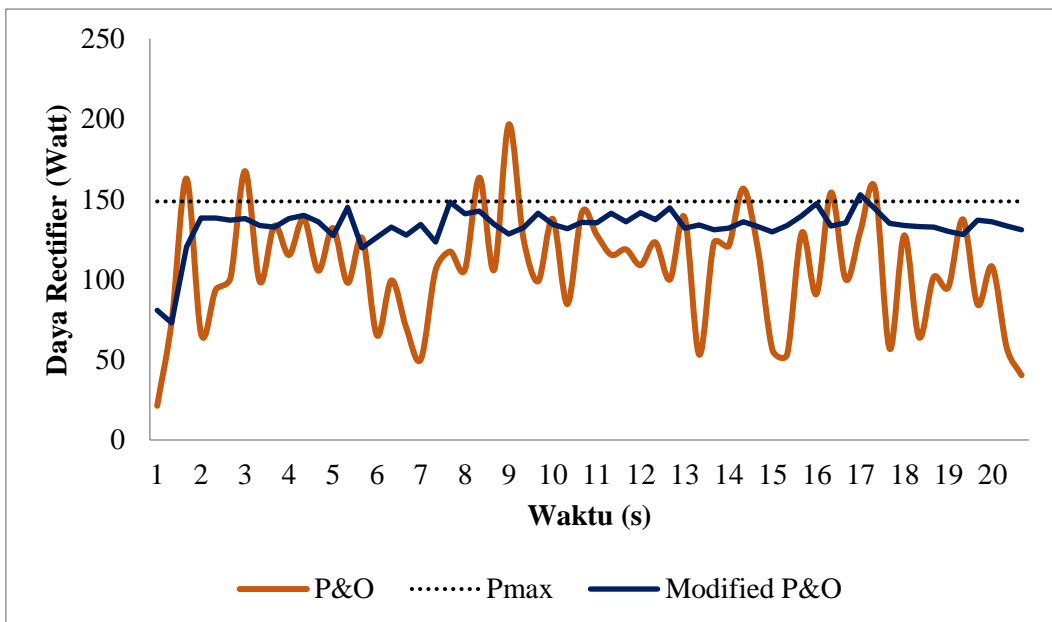
Gambar 4. 42 Kurva *daya rectifier* saat kecepatan 600 RPM.



Gambar 4. 43 Kurva Hasil Pengujian *Daya Rectifier* dengan Metode P&O.



Gambar 4. 44 Kurva Hasil Pengujian *Daya Rectifier* dengan Metode *Modified P&O*.



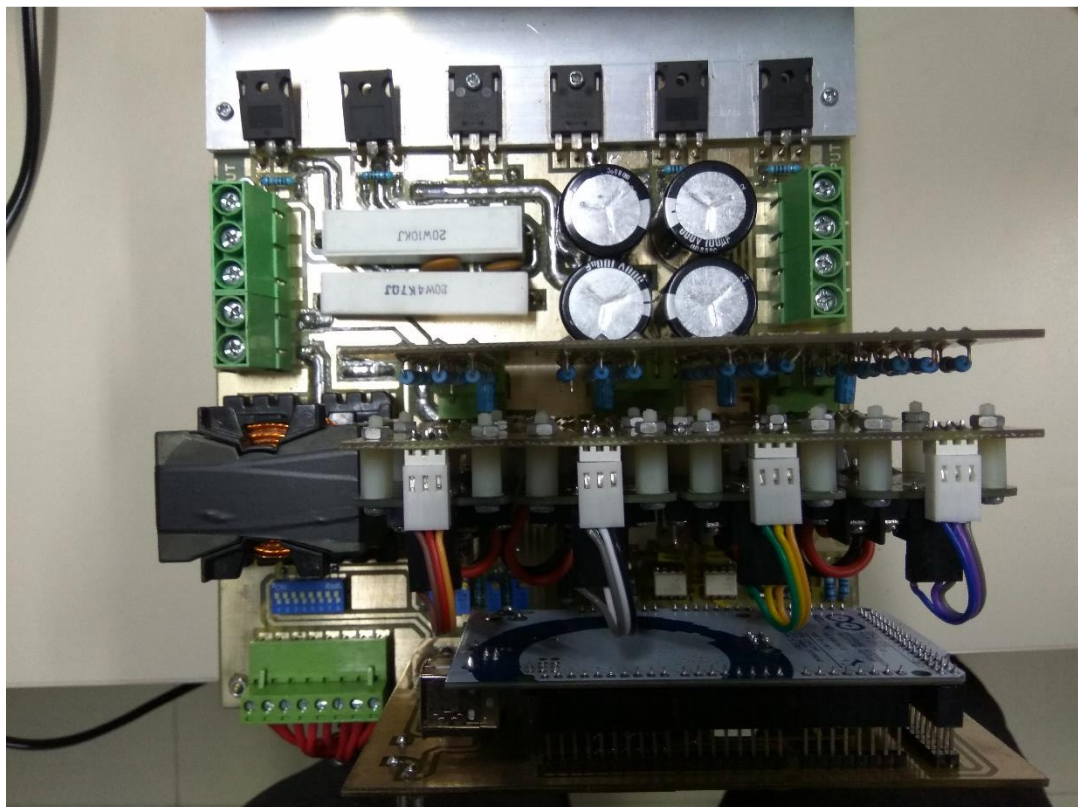
Gambar 4. 45 Kurva hasil pengujian *daya rectifier* dengan metode P&O dan *Modified P&O*.

Pada Gambar 4.42 menunjukkan daya maksimum pada kecepatan 300 RPM adalah 148,6 Watt. Kurva hasil pengujian perangkat keras dengan menggunakan algoritma P&O dan *modified P&O* ditunjukkan pada Gambar 4.45. Hasil pengujian dengan menggunakan algoritma P&O, daya maksimum yang dihasilkan ketika

kondisi *steady state* adalah 107,48 watt. Sedangkan daya maksimum yang dihasilkan dengan menggunakan algoritma *modified P&O* ketika *kondisi steady state* adalah 133,15 watt.

4.4 Hasil Pengujian Konverter *Bidirectional*

Rangkaian konverter *bidirectional buck-boost* ini berfungsi sebagai konverter DC-DC dua arah yang dapat bertindak sebagai konverter buck dan konverter *boost* secara otomatis pada kondisi yang ditentukan. Rangkaian konverter *bidirectional* ditunjukkan pada Gambar 4.46. Pengujian konverter *bidirectional* bertujuan untuk melihat kemampuan dan kinerja hardware dapat bekerja dengan baik. Pengujian dilakukan dengan rangkaian *open loop* menggunakan *variac* sebagai masukan dari konverter dan menggunakan beban resistansi. Dengan melakukan pengujian ini diharapkan konverter *bidirectional* mampu menaikkan dan menurunkan tegangan sesuai dengan kondisi yang ditentukan.



Gambar 4. 46 Modul Rangkaian Konverter *Bidirectional*.

4.5 Hasil Pengujian Integrasi

Pada pengujian integrasi dilakukan pengujian secara menyeluruh yaitu pada modul turbin angin MPPT dengan sistem *bidirectional*. Adapun pengujian integrasi yang dilakukan dalam penelitian kali ini, antara lain:

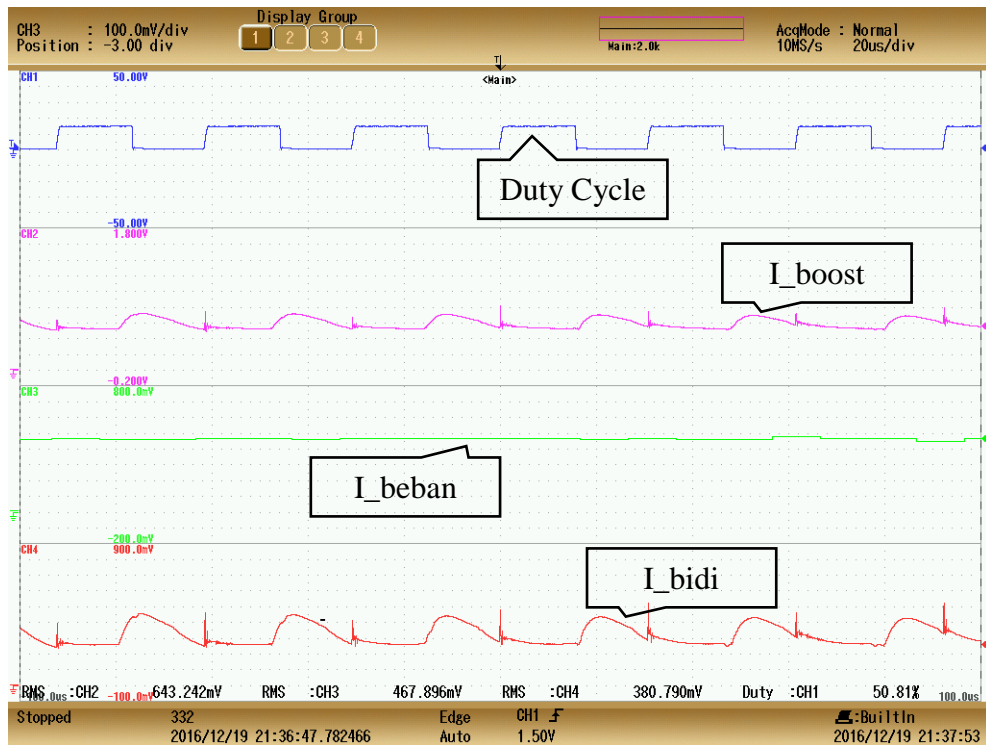
1. Pengujian saat mode buck (charging)
2. Pengujian saat mode *boost* (load sharing)

4.5.1 Pengujian Modul Turbin Angin - *Bidirectional* saat Mode *Buck* (*Charging*)

Pada pengujian ini, konverter *bidirectional* bekerja pada mode buck dimana input daya maksimum yang dihasilkan dari sistem turbin angin lebih besar daripada kebutuhan daya pada beban. Pada pengujian kali ini, tegangan masukan pada konverter dc-dc *bidirectional* yang berasal dari tegangan keluaran konverter *boost* 120V yang kemudian tegangan akan diturunkan untuk charging baterai 60V. Pada Gambar 4.47 menunjukkan hasil pengujian saat mode buck dilihat dari aliran arusnya.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Integrasi saat Mode Konverter Buck untuk *Charging* Baterai.

V_rec (V)	I_rec (A)	V_boost (V)	I_boost (A)	V_bidi (V)	I_bidi (A)	V_beban (V)	I_beban (A)	V_bat (V)	I_bat (A)
55,5	1,15	122,4	0,643	123,4	0,381	122.3	0,467	63,48	0,416

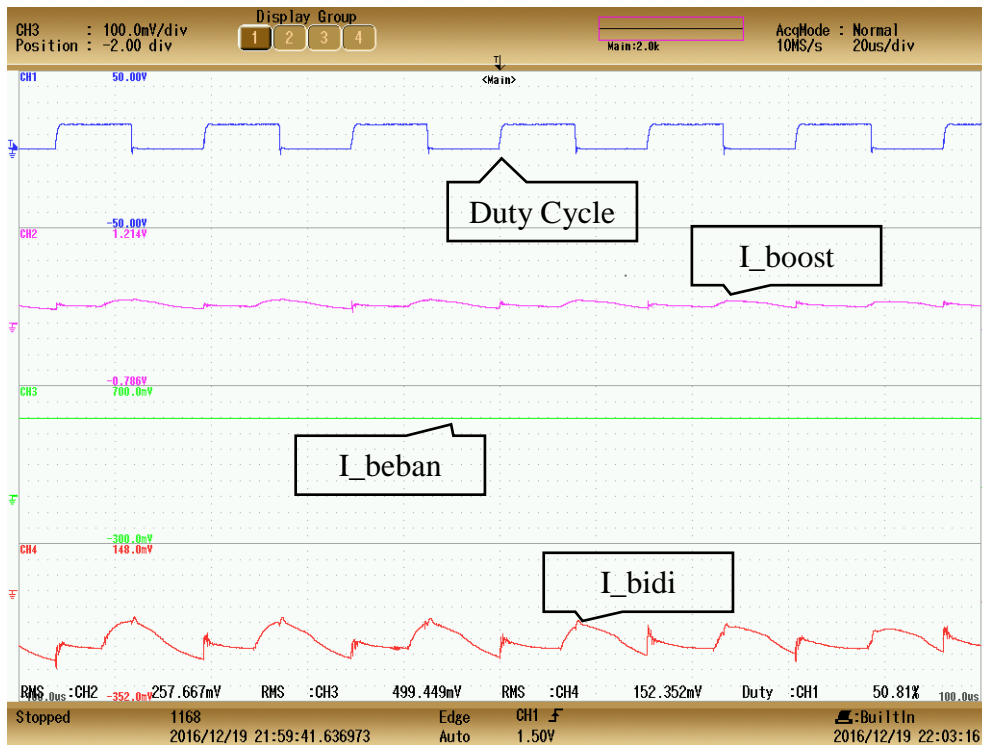


Gambar 4. 47 Hasil Pengujian Integrasi saat Mode Konverter *Buck* (*Charging* Baterai).

Dari data pengujian tersebut dapat dilihat bahwa konverter *bidirectional* dapat bekerja pada mode *buck* dengan baik. Hal ini dapat dibuktikan dengan aliran arus yang mengalir dari konverter *boost* menuju beban dan baterai melalui konverter *bidirectional* untuk melakukan pengisian baterai.

4.5.2 Pengujian Konverter *Boost-Bidirectional* saat Mode *Boost* (*Discharging*)

Pada pengujian ini, konverter *bidirectional* bekerja pada mode *boost* dimana input daya maksimum yang dihasilkan dari sistem turbin angin kurang dari daripada kebutuhan daya pada beban. Pada pengujian kali ini, tegangan masukan pada konverter dc-dc *bidirectional* yang berasal dari baterai 60V yang kemudian tegangan akan dinaikkan untuk untuk load sharing pada DC Bus. Pada Gambar 4.48 menunjukkan hasil pengujian integrasi saat mode *boost* (*discharging* baterai).



Gambar 4. 48 Hasil Pengujian Integrasi saat Mode *Boost* (*Discharging* Baterai).

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Integrasi saat Mode Konverter *Boost* untuk Proses Load Sharing pada DC Bus.

V_rec (V)	I_rec (A)	V_boost (V)	I_boost (A)	V_bidi (V)	I_bidi (A)	V_beban (V)	I_beban (A)	V_bat (V)	I_bat (A)
44,2	0,82	122,9	0,258	123,9	0,152	122,7	0,499	62,5	0,424

Dari data pengujian tersebut dapat dilihat bahwa konverter *bidirectional* dapat bekerja pada mode *boost* dengan baik. Hal ini dapat dibuktikan dengan aliran arus yang mengalir dari konverter *boost* dan dari baterai menuju ke beban sehingga baterai akan mengalami proses pengosongan.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa :

1. Penggunaan metode MPPT dengan menggunakan algoritma *modified* P&O jauh lebih baik dibandingkan dengan menggunakan algoritma P&O. Hal ini dibuktikan dengan hasil dari simulasi dan pengujian *hardware* yang membuktikan bahwa dengan menggunakan metode P&O masih terlalu banyak osilasi untuk menemukan titik puncak daya maksimum sehingga waktu yang diperlukan untuk mencapai *steady state* pun lama. Lain halnya dengan menggunakan metode *modified* P&O sudah dapat mengurangi osilasi dan waktu yang diperlukan untuk mencapai *steady state*-nya lebih cepat.
2. Hasil dari pengujian *hardware* diperoleh bahwa rata-rata daya maksimum yang dapat dicapai oleh metode *modified* P&O lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan metode P&O, yaitu pada kecepatan 300 RPM dengan metode P&O adalah 30,06 watt dan dengan *modified* P&O adalah 34,19 watt. Pada kecepatan 400 RPM dengan metode P&O adalah 53,61 watt dan dengan *modified* P&O adalah 62,46 watt. Pada kecepatan 500 RPM dengan metode P&O adalah 95,34 watt dan dengan *modified* P&O adalah 100,88 watt. Pada kecepatan 600 RPM dengan metode P&O adalah 107,48 watt dan dengan *modified* P&O adalah 133,15 watt.
3. Konverter *bidirectional* mampu mengatur proses pengisian dan pengosongan baterai dengan baik. Hal ini dapat dilihat dari aliran dayanya sesuai dengan dua kondisi, yaitu saat kondisi daya dari sistem turbin angin lebih besar dari kebutuhan daya pada beban dan saat kondisi kebutuhan daya pada beban lebih besar dari daya maksimum pada sistem turbin angin.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Pada pembuatan rangkaian konverter *bidirectional* DC-DC perlu diperhatikan *switch buck* dan *switch boost* harus berbeda *ground* dan pada pembuatan program perlu diperhatikan pengaturan *switching* pada kedua *switch* tersebut agar tidak bekerja bersamaan.
2. Pada desain PCB konverter *bidirectional* DC-Dperlu diperhatikan penempatan sensor arus ACS712 untuk tidak saling berdekatan antar sensor arus ACS712 dan tidak dekat dengan induktor. Hal tersebut dapat menyebabkan pembacaan sensor arus yang tidak akurat karena pengaruh medan elektromagnet dari induktor maupun sesama sensor ACS712.
3. Perlu dilakukan pengujian simulasi dengan parameter turbin angin dan PMSG yang sebenarnya sehingga hasilnya akan lebih baik lagi dan sesuai dengan kondisi kenyataannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahmad Hemami, “Wind Turbine Technology”, Cengage Learning, 2012, hal 1-11.
- [2] Huynh Quang Minh, Nollet Frédéric, Essounbouli Najib, Hamzaoui Abdelaziz, “Control of permanent magnet synchronous generator wind turbine for stand-alone system using fuzzy logic”, *EUSFLAT-LFA, published by Atlantis Press*, 2011, hal 720-727.
- [3] C. N. Bhende, S. Mishra, dan Siva Ganesh Malla, “Permanent Magnet Synchronous Generator-Based Standalone Wind Energy Supply System”, *IEEE Transactions On Sustainable Energy*, vol. 2, no. 4, 2011, hal 361-373
- [4] Zakariya M. Dalala, Zaka Ullah Zahid, Wensong Yu, Younghoon Cho, dan Jih-Sheng (Jason) Lai, “Design and Analysis of an MPPT Technique for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems”, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, vol. 28, no. 3, 2013, hal 756-767.
- [5] Abdullah M.A., Yatim A.H.M., Tan C.W., Saidur R., “A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, hal 3220-3227.
- [6] Muralidhar Killi dan Susovon Samanta, “Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol. 62, no. 9, 2015, hal 5549-5559.
- [7] Mochamad Ashari, “Sistem Konverter DC, Desain Rangkaian Elektronika Daya”. ITS Press, 2012, hal 90-112.
- [8] Daniel W. Hart, “Power Electronic”, Mac Graw Hill, 2010, hal 196-220.
- [9] G. Chen, D. Xu, and Y.-S. Lee, “A Family of Soft-Switching Phase-Shift Bidirectional DC-DC Converters: Synthesis, Analysis, and Experiment,” *Proc. the Power Conversion Conference, Osaka, Japan*, vol. 1, 2002, hal. 122 – 127.
- [10] Fei Ding, Peng Li, Bibin Huang, Fei Gao, Chengdi Ding, Chengshan Wang, “Modeling and Simulation of Grid-connected Hybrid Photovoltaic/Battery

Distributed Generation System”, *China International Conference on Electricity Distribution*, 2010, hal 1-10.

- [11] Yacine Daili, Jean-Paul Gaubert, Lazhar Rahmani, “Implementation of a New Maximum Power Point Tracking Control Strategy for Small Wind Energy Conversion Systems without Mechanical Sensors”, *Energy Conversion and Management*, 2015, hal. 298-306.

LAMPIRAN

1. LISTING PROGRAM ALGORITMA P&O

```
byte dutyPin = 9;
int val;
int val2;
int val3;
int val4;
int tempPin = 0;
int tempPin2 = 1;
int tempPin3 = 2;
int tempPin4 = 3;
int outVal;
static float Do,Dn,Po,Pn,dP,dD,c,y1,Vo,Vn,dV;

void setup()
{
  pinMode(dutyPin, OUTPUT);
  c=0.15;
  Po=0;
  Do=0.2;
  Vo=0;
  Dn=Do+c;
  y1=dutyPin;

  Serial.begin(9600);
  TCCR2B = TCCR2B & B11111000 | B00000001;
}
```

```

void loop ()
{
  val = analogRead(tempPin);
  float x1 = (val/1024.0)*200;
  val2 = analogRead(tempPin2);
  float x2 = abs(25*(((val2/1024.0)*5)-2.55));
  val3 = analogRead(tempPin3);
  float x3 =(val3/1024.0)*500;
  val4 = analogRead(tempPin4);
  float x4 = abs(25*(((val4/1024.0)*5)-2.54));

  c=0.15;
  Vn=x1;
  Pn=x1*x2;
  dP=Pn-Po;
  dV=Vn-Vo;

  if(dP>0)
  {

    if(dV>0)
    {
      y1=Dn;
      Do=Dn;
      Po=Pn;
      Dn=Do+c;
    }
    else if (dV<0)
    {
      y1=Dn;
      Do=Dn;
      Po=Pn;
    }
  }
}

```

```

    Dn=Do-c;
  }
}

else if (dP<0)
{
  if(dV>0)
  {
    y1=Dn;
    Do=Dn;
    Po=Pn;
    Dn=Do-c;
  }
  else if (dV<0)
  {
    y1=Dn;
    Do=Dn;
    Po=Pn;
    Dn=Do+c;
  }
}

if(Dn>0.8)
{
  Dn=0.8;
}
else if(Dn<0.30)
{
  Dn=0.30;
}
y1=Dn;
outVal=Dn*255;

```



```
analogWrite(dutyPin,outVal);
```

```
Serial.print(x1);
```

```
Serial.print(" \t");
```

```
Serial.print(x2);
```

```
Serial.print(" \t");
```

```
Serial.print(x3);
```

```
Serial.print(" \t");
```

```
Serial.print(x4);
```

```
Serial.print(" \t");
```

```
Serial.print(Pn);
```

```
Serial.print(" \t");
```

```
Serial.print(Dn);
```

```
Serial.println();
```

```
delay(500);
```

```
}
```

2. LISTING PROGRAM ALGORITMA MODIFIED P&O

```
byte dutyPin = 9;
//float x1; //Tegangan sensor
//float x2; //Arus sensor
int val;
int val2;
int val3;
int val4;
int tempPin = 0;
int tempPin2 = 1;
int tempPin3 = 2;
int tempPin4 = 3;
int outVal;

void setup()
{
  pinMode(dutyPin, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  TCCR2B = TCCR2B & B11111000 | B00000001;
}

void loop ()
{
  val = analogRead(tempPin);
  float x1 = (val/1024.0)*200;
  val2 = analogRead(tempPin2);
  float x2 = abs(25*(((val2/1024.0)*5)-2.55));
  val3 = analogRead(tempPin3);
  float x3 =(val3/1024.0)*500;
  val4 = analogRead(tempPin4);
```

```
float x4 = abs(25*(((val4/1024.0)*5)-2.54));  
static float Do,Dn,Po,Pn,dP,dD,dx1,dx2,c,y1,waktu,delay;
```

```
if (millis()<1)
```

```
{
```

```
    c=0.15;
```

```
    dx1=0.65;
```

```
    dx2=0.65;
```

```
    Po=0;
```

```
    Do=0.2;
```

```
    Dn=Do+c;
```

```
    waktu=millis();
```

```
    delay=500;
```

```
}
```

```
if((millis()-waktu)<=delay)
```

```
{
```

```
    y1=Dn*255;
```

```
    Pn=x1*x2;
```

```
}
```

```
if((millis()-waktu)>=delay)
```

```
{
```

```
    if(Dn>Do && Pn>Po)
```

```
    {
```

```
        y1=Dn;
```

```
        Do=Dn;
```

```
        Po=Pn;
```

```
        c=c*dx1;
```

```
        Dn=Dn+c;
```

```
        waktu=millis();
```

```
    }
```

```
if(Dn>Do && Pn<Po)
```

```
{  
  y1=Dn;  
  Do=Dn;  
  Po=Pn;  
  c=c*dx2;  
  Dn=Dn-c;  
  waktu=millis();  
}
```

```
if(Dn<Do && Pn>Po)
```

```
{  
  y1=Dn;  
  Do=Dn;  
  Po=Pn;  
  c=c*dx1;  
  Dn=Dn-c;  
  waktu=millis();  
}
```

```
if(Dn<Do && Pn<Po)
```

```
{  
  y1=Dn;  
  Do=Dn;  
  Po=Pn;  
  c=c*dx2;  
  Dn=Dn+c;  
  waktu=millis();  
}
```

```
if(Dn>0.85)
```

```
{
  Dn=0.85;
}
else if(Dn<0.3)
{
  Dn=0.3;
}

y1=Dn*255;
outVal=y1;
analogWrite(dutyPin,outVal);

Serial.print(x1);
Serial.print(" \t");
Serial.print(x2);
Serial.print(" \t");
Serial.print(x3);
Serial.print(" \t");
Serial.print(x4);
Serial.print(" \t");
Serial.print(Pn);
Serial.print(" \t");
Serial.print(Dn);
Serial.println();
}
}
```

BIODATA PENULIS



Rachma Prilian Eviningsih, putri pertama dari dua bersaudara dari pasangan Epyk Sunarno, S.ST., M.T dan Dra. Suratiningsih. Penulis biasa dipanggil dengan nama Evin. Penulis lahir dikota Sidoarjo pada tanggal 1 April 1993. Penulis memulai pendidikannya dari TK. Trisula Sidoarjokemudian melanjutkan studi di SDN Pucang III Sidoarjo, SMP Negeri 1 Sidoarjo, dan SMA Negeri 1 Sidoarjo. Setelah lulus dari SMA pada tahun 2011, penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Elektro, program studi Teknik Sistem Tenaga, Fakultas

Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan lulus pada September 2015. Kemudian penulis melanjutkan studi S2 di di Jurusan Teknik Elektro, program studi Teknik Sistem Tenaga, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga saat ini. Penulis selama kuliah S2 menjadi member di Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST). Penulis dapat dihubungi melalui alamat email prilianrachma@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan