



TUGAS AKHIR - TF 181801

**EKSTRAKSI DAYA MAKSIMUM DENGAN  
*SENSORLESS SUPERVISORY CONTROL*  
BERBASIS ALGORITMA *EXTREMUM*  
*SEEKING* PADA TURBIN ANGIN**

NUSANTARA JAYA SAKTI  
NRP. 023114 40000 084

Dosen Pembimbing  
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T.,M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Intsitut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020

“Halaman ini memang dikosongkan”



***FINAL PROJECT - TF 181801***

***MAXIMUM POWER EXTRACTION WITH  
SENSORLESS SUPERVISORY CONTROL  
BASED ON EXTREMUM SEEKING  
ALGORITHM IN WIND TURBINE***

***NUSANTARA JAYA SAKTI  
NRP. 023114 40000 084***

***Supervisor  
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T.,M.T.***

***DEPARTMENT of ENGINEERING PHYSICS  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Intsitut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020***

“Halaman ini memang dikosongkan”

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Nusantara Jaya Sakti  
NRP : 02311440000084  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika/S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri dan  
Rekayasa Sistem  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Ekstraksi Daya Maksimum dengan *Sensorless Supervisory Control* Berbasis Algoritma *Extremum Seeking* pada Turbin Angin" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 22 Januari 2020

Yang membuat  
pernyataan,



Nusantara Jaya Sakti  
NRP. 02311440000084

“Halaman ini memang dikosongkan”

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

**EKSTRAKSI DAYA MAKSIMUM DENGAN  
*SENSORLESS SUPERVISORY CONTROL* BERBASIS  
*ALGORITMA EXTREMUM SEEKING*  
PADA TURBIN ANGIN**


**Oleh:**

**Nusantara Jaya Sakti  
NRP. 0231144000084**

**Surabaya, 22 Januari 2020**

**Menyetujui,  
Dosen Pembimbing**

  
**Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.  
NIPN. 19690507 199512 1 001**

**Mengetahui,  
Kepala Departemen  
Teknik Fisika FTIRS-ITS**  
  
**Dr. Suvanto, S.T., M.T.  
NIPN 19711113 199512 1 002**

“Halaman ini memang dikosongkan”



**EKSTRAKSI DAYA MAKSIMUM DENGAN  
SENSORLESS SUPERVISORY CONTROL BERBASIS  
ALGORITMA EXTREMUM SEEKING  
PADA TURBIN ANGIN**





**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**NUSANTARA JAYA SAKTI**  
**NRP. 0231 14 40000 084**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Bambang Lelono W. , S.T.,M.T.  ..... (Pembimbing)
2. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  ..... (Ketua Penguji)
3. Ir. Sarwono, M.M.  ..... (Penguji I)
4. M. Kamalul Wafi S.T., M.Eng.  ..... (Penguji II)

**SURABAYA  
JANUARI, 2020**

“Halaman ini memang dikosongkan”

**EKSTRAKSI DAYA MAKSIMUM DENGAN  
SENSORLESS SUPERVISORY CONTROL BERBASIS  
ALGORITMA EXTREMUM SEEKING  
PADA TURBIN ANGIN**

Nama Mahasiswa : NUSANTARA JAYA SAKTI  
NRP : 02311440000084  
Departemen : Teknik Fisika FTIRS-ITS  
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Lelono W., S.T.,M.T.

**Abstrak**

Indonesia memiliki potensi angin yang cukup besar. Tetapi kinerja turbin angin untuk mengekstraksi potensi angin secara signifikan dipengaruhi oleh sifat stokastik angin yang menyebabkan ketidakpastian dalam penangkapan energi sehingga dapat menyebabkan besar produksi daya berubah-ubah. Oleh karena itu, penelitian terbaru tentang kontrol turbin angin ini diutamakan berfokus pada ekstraksi daya maksimum. Salah satu cara maksimalisasi daya yaitu dengan menggunakan *supervisory control* yaitu sistem kontrol yang dapat menentukan set pointnya secara mandiri dan algoritma yang dapat digunakan adalah *extremum seeking*. Dilakukan penelitian mengenai bagaimana hasil daya dari sistem turbin angin menggunakan *supervisory control* berbasis algoritma *extremum seeking control* (ESC) dibandingkan dengan sistem turbin angin tanpa kontroler dan dengan algoritma *perturbation and observation* (P&O). Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa algoritma *extremum seeking control* lebih baik digunakan daripada tanpa adanya kontroler dan algoritma *perturbation and observation* khususnya pada kecepatan angin rendah (4 dan 7 m/s) karena nilai daya yang dihasilkan lebih tinggi, tetapi masih lebih rendah daripada tanpa adanya kontroler dan algoritma *perturbation and observation* pada kecepatan angin tinggi (11m/s)

Kata kunci : ekstraksi daya maksimum, *extremum seeking control*, *perturbation and observation*, *supervisory control*, turbin angin.

“Halaman ini memang dikosongkan”

# **MAXIMUM POWER EXTRACTION WITH SENSORLESS SUPERVISORY CONTROL BASED ON EXTREMUM SEEKING ALGORITHM IN WIND TURBINE**

Name : NUSANTARA JAYA SAKTI  
NRP : 0231144000084  
Department : Engineering Physics FTIRS-ITS  
Supervisor lecture : Dr. Bambang Lelono W., S.T.,M.T.

## **ABSTRACT**

*Indonesia has a considerable potential for wind. But the performance of wind turbines to extract wind potential is significantly influenced by the stochastic nature of the wind which causes uncertainty in energy capture so that it can cause power production fluctuate. Therefore, the latest research on this wind turbine control is preferred focusing on maximum power extraction. One of the ways to maximize power is to use supervisory control which is a control system that can determine the set of the point independently and the algorithm that can be used is extremum seeking. A study conducted on how the power from the wind turbine system uses the supervisory control-based extremum seeking control algorithm compared to a system of wind-less turbine-turbines and with the perturbation and observation (P&O) algorithm. From the research that has been done, the extremum seeking control algorithm is better used than without the control and perturbation and observation algorithms, especially at low wind speeds (<7 m/s) due to the higher value of power generated, but still lower than the perturbation and observation algorithms at the above 7 m/s wind speed.*

*Keywords: maximum power extraction, extremum seeking control, perturbation and observation, supervisory control, wind turbine.*

“Halaman ini memang dikosongkan”

## KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **“EKSTRAKSI DAYA MAKSIMUM DENGAN *SENSORLESS SUPERVISORY CONTROL* BERBASIS ALGORITMA *EXTREMUM SEEKING* PADA TURBIN ANGIN”**

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, mengucapkan terima kasih kepada:

- a. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
- b. Bapak Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah sabar memberi petunjuk, ilmu, nasihat dan bimbingan yang sangat bermanfaat
- c. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Fisika Rekayasa yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, bimbingan serta kemudahan perizinan.
- d. Kedua orang tua (Bapak Andrias Tantular Wicaksono dan Ibu Corry Ruswati). Terima kasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
- e. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terima kasih atas segala bantuan dan kerja samanya.
- f. Rekan-rekan dari Laboratorium Fisika Rekayasa Teknik Fisika-ITS
- g. Rekan-rekan UKM IFLS yang telah memberikan semangat lebih dalam menuntut ilmu dan menyelesaikan tugas akhir
- h. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terima kasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 22 Januari 2020

Penulis



## DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME.....	v
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	vii
ABSTRAK.....	xi
<i>ABSTRACT</i> .....	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Sistem Turbin Angin.....	5
2.2 <i>Sensorless Control</i> .....	11
2.3 <i>Extremum Seeking Control (ESC)</i> .....	11
2.4 <i>Supervisory Control</i> .....	13
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	15
3.1 Prosedur Umum Penelitian.....	15
3.2 Pemodelan Sistem Turbin Angin.....	17
3.3 Perancangan dan Pengujian Sistem Kontrol PI ( <i>Cascade Control</i> ).....	21
3.4 Perancangan Algoritma <i>Extremum Seeking Control</i> (ESC) untuk <i>Supervisory Control</i> .....	22

3.5	Perancangan Algoritma <i>Perturbation and Observation</i> (P&O) Sebagai Pembanding .....	23
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	25
4.1	Analisa Data Hasil Karakteristik Sistem Turbin Angin .....	25
4.2	Analisa Data Sistem Kontrol PI ( <i>Cascade Control</i> ) ..	28
4.3	Analisa Data Hasil Daya dari Algoritma <i>Extremum Seeking Control</i> .....	30
4.4	Analisa Data Hasil Daya dari Sistem Turbin Angin Tanpa Kontrol .....	31
4.5	Analisa Data Hasil Daya dari Sistem Turbin Angin dengan Algoritma <i>Perturbation and Observation</i> (P&O).....	33
4.6	Pembahasan.....	34
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	37
5.1.	Kesimpulan .....	37
5.2.	Saran .....	38
DAFTAR PUSTAKA	.....	39
LAMPIRAN 1	.....	41
LAMPIRAN 2	.....	47
LAMPIRAN 3	.....	51
BIODATA PENULIS	.....	53

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Konfigurasi sistem pembangkit tenaga angin dengan MPPT.....	5
Gambar 2. 2	Kurva koefisien daya dibandingkan dengan tip speed ratio .....	6
Gambar 2. 3	<i>Bridge rectifier</i> tiga fasa .....	9
Gambar 2. 4	Bentuk gelombang tegangan dan arus dari bridge rectifier tiga fasa .....	9
Gambar 2. 5	Rangkaian <i>boost converter</i> .....	10
Gambar 2. 6	Bentuk Gelombang <i>boost converter</i> .....	10
Gambar 2. 7	Diagram blok skema <i>extremum seeking control</i> .....	12
Gambar 2. 8	Struktur <i>supervisory control</i> pada proses produksi.....	13
Gambar 3. 1	Diagram alir penelitian.....	15
Gambar 3. 2	Diagram blok sistem turbin angin .....	18
Gambar 3. 3	<i>Duty cycle</i> yang digunakan pada uji karakteristik sistem sistem turbin angin.....	21
Gambar 3. 4	Diagram blok sistem kontrol PI <i>cascade</i> .....	22
Gambar 3. 5	Diagram blok <i>supervisory control</i> yang didalamnya terdapat algoritma ESC.....	23
Gambar 3. 6	Diagram blok sistem turbin angin dengan algoritma <i>perturbation and observation</i> (P&O) .....	24
Gambar 3. 7	Diagram alir algoritma P&O.....	24
Gambar 4. 1	Grafik hubungan tegangan dan kecepatan rotor .....	27
Gambar 4. 2	Grafik karakteristik daya terhadap tegangan di berbagai kecepatan angin .....	28
Gambar 4. 3	Hasil uji sistem kontrol PI pada sinyal step naik .....	29
Gambar 4. 4	Hasil uji sistem kontrol PI pada sinyal step turun .....	29
Gambar 4. 5	Grafik daya terhadap waktu pada kecepatan angin 4, 11 dan 7 m/s di sistem turbin angin dengan algoritma ESC .....	31

Gambar 4. 6	Grafik daya terhadap waktu pada kecepatan angin 4, 11 dan 7 m/s di sistem turbin angin tanpa kontroller .....	32
Gambar 4. 7	Grafik daya terhadap waktu pada kecepatan angin 4, 11 dan 7 m/s di sistem turbin angin dengan ESC dibandingkan terhadap sistem turbin angin tanpa kontroller .....	32
Gambar 4. 8	Grafik daya terhadap waktu pada kecepatan angin 4, 11 dan 7 m/s di sistem turbin angin dengan algoritma P&O .....	33
Gambar 4. 9	Grafik daya terhadap waktu pada kecepatan angin 4, 11 dan 7 m/s di sistem turbin angin dengan ESC dibandingkan terhadap sistem turbin angin dengan P&O .....	34

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Spesifikasi turbin angin AF1-24v-0125.....	17
Tabel 3. 2	Parameter pada Wind Turbine .....	18
Tabel 3. 3	Data Kecepatan Angin dari BMKG stasiun Juanda Surabaya .....	19
Tabel 3. 4	Parameter PMSG .....	19
Tabel 3. 5	Konfigurasi PMSG .....	19
Tabel 3. 6	Parameter Rectifier .....	20
Tabel 3. 7	Parameter boost converter .....	20
Tabel 3. 8	Parameter baterai .....	20
Tabel 3. 9	Parameter algoritma extremum seeking control	23
Tabel 4. 1	Karakteristik turbin angin pada berbagai duty cycle dengan kecepatan angin 5 m/s.....	25
Tabel 4. 2	Karakteristik turbin angin pada berbagai duty cycle dengan kecepatan angin 7,5 m/s.....	26
Tabel 4. 3	Karakteristik turbin angin pada berbagai duty cycle dengan kecepatan angin 10 m/s.....	26
Tabel 4. 4	Karakteristik turbin angin pada berbagai duty cycle dengan kecepatan angin 12,5 m/s.....	27
Tabel 4. 5	Hasil analisa respon step naik pada uji sistem kontrol PI .....	30
Tabel 4. 6	Hasil analisa respon step turun pada uji sistem kontrol PI .....	30
Tabel 4. 7	Data daya sistem turbin angin dengan algoritma extremum seeking pada berbagai kecepatan angin .....	30
Tabel 4. 8	Data daya sistem turbin angin tanpa kontroller pada berbagai kecepatan angin .....	31
Tabel 4. 9	Data daya sistem turbin angin dengan algoritma P&O pada berbagai kecepatan angin .....	33

“Halaman ini memang dikosongkan”

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi angin memiliki potensi pembangkit energi tinggi dan tidak menghasilkan efek samping yang berbahaya. Karena itu. Energi angin menjadi solusi yang menjanjikan untuk meningkatnya kebutuhan energi global. Di dunia, energi angin sendiri mengalami peningkatan kapasitas yang sangat signifikan. Pada tahun 2014 hingga 2018 kapasitas pembangkit listrik tenaga angin di dunia mengalami peningkatan sebesar 50 GW per tahunnya. [1] Indonesia sendiri memiliki potensi angin yang cukup besar, yaitu sebesar 60.647 MW untuk kecepatan angin  $>4$  m/s. [2] Sehingga diperlukan pembangunan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang dapat memaksimalkan potensi angin dengan komponen utama yang diperlukan adalah turbin angin.

Turbin angin adalah alat pengubah sumber energi angin yang ramah lingkungan dengan prinsip mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik (rotasi) yang selanjutnya digunakan untuk penggerak generator listrik. [3] Kinerja turbin angin secara signifikan dipengaruhi oleh sifat stokastik angin yang menyebabkan ketidakpastian dalam penangkapan energi dan beban struktural, khususnya pada ladang angin daerah II seperti di Indonesia dengan kecepatan angin antara, sehingga dapat menyebabkan besar produksi daya berubah-ubah. Oleh karena itu penelitian terbaru tentang kontrol turbin angin ini diutamakan berfokus pada maksimalisasi daya [4] [5]

Maksimalisasi daya pada turbin angin dapat pula disebut dengan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), yaitu metode-metode yang dapat digunakan dalam memaksimalkan daya pada turbin angin dikarenakan sistem turbin angin yang memiliki persamaan non linear. Algoritma ekstraksi daya maksimum yang telah diteliti dapat diklasifikasikan dalam 3 metode kontrol utama, yaitu kontrol *tip speed ratio* (TSR), kontrol *power signal feedback* (PSF), dan kontrol *hill-climb search* (HCS). [5]

*Supervisory control* merupakan sebuah sistem kontrol dengan supervisi yang mengacu pada peninjauan menyeluruh operasi, perencanaan, koordinasi dan eksekusi aksi yang memperbaiki performansi, dan keandalan. *Supervisory control* ditujukan untuk kompensasi faktor-faktor yang tidak dipertimbangkan secara eksplisit dalam desain kontroler. Selain itu *supervisory control* dapat memonitor kegagalan atau degradasi untuk alat dan/atau mesin. Informasi dari sensor-sensor yang terkait dapat digabungkan untuk meningkatkan keandalan dan kualitas dari pencitraan informasi. [6] Dengan adanya kompensasi pada *supervisory control*, maka suatu sistem akan dapat menghasilkan setpoint secara otomatis dari data hasil tinjauan seluruh operasi. Salah satu algoritma yang dapat digunakan untuk *supervisory control* adalah *extremum seeking control* (ESC).

*Extremum seeking control* adalah metode optimasi waktu nyata yang menyelesaikan masalah mengenai maksimalisasi fungsi objektif yang menggambarkan performansi sistem dalam mode statis dengan asumsi sistem dinamik dan fungsi objektifnya tidak diketahui. Metode yang digunakan terdiri dari merangsang sistem dengan sinyal periodik dan mengobservasi perilaku keluaran dari sistem pada mode statis untuk memperkirakan dan mengendalikan gradien pada fungsi objektif menjadi bernilai nol. [7] Pada penelitian ini, perilaku sistem turbin angin yang diobservasi adalah daya, yang nantinya akan dicari titik optimal atau maksimumnya dan sinyal periodik yang dirangsang ke sistem berupa setpoint tegangan yang seharusnya dapat merepresentasikan *tip speed ratio* (TSR). Sehingga sistem turbin angin yang akan digunakan pada penelitian ini tidak memerlukan sensor kecepatan (*sensorless*) yang nantinya akan dapat mereduksi biaya dan kompleksitas hardware, dan meningkatkan robustness mekanik dan keandalan. [8]



## 1.2 Perumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah diuraikan, maka didapatkan permasalahan dalam tugas akhir ini antara lain:

- a. Bagaimana mengimplementasikan algoritma *extremum Seeking* pada sistem turbin angin untuk mendapatkan daya maksimum?
- b. Bagaimana membuat sistem *sensorless supervisory control* pada sistem turbin angin?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Dari masalah yang telah dirumuskan, muncul tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini antara lain:

- a. Mampu mengimplementasikan algoritma *extremum Seeking* pada sistem turbin angin untuk mendapatkan daya maksimum.
- b. Mampu membuat sistem *sensorless supervisory control* pada sistem turbin angin.

## 1.4 Batasan Masalah

Dalam proses ekstraksi daya maksimum dengan *sensorless supervisory control* berbasis algoritma *extremum seeking* pada turbin angin terdapat batasan-batasan masalah, antara lain.

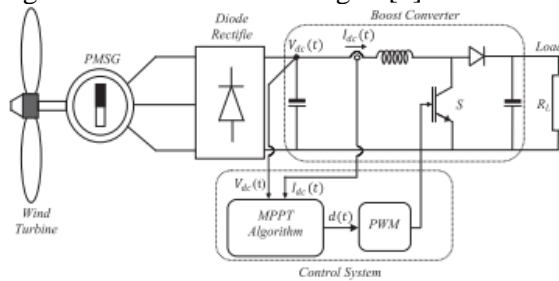
- a. *Converter* yang digunakan pada sistem ini adalah *boost converter*.
- b. Sistem turbin angin tanpa controller menggunakan *boost converter* dengan *duty cycle* 50%
- c. Kecepatan angin yang digunakan adalah 4-11 m/s
- d. Beban yang digunakan pada sistem ini adalah baterai
- e. Pokok bahasan dalam penelitian ini adalah daya, tegangan dan arus

“Halaman ini memang dikosongkan”

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Turbin Angin

Gambar 2.1 mengilustrasikan konfigurasi dari sistem Turbin angin. *Permanent magnet synchronous generator (PMSG)* digabungkan secara langsung dengan turbin angin sumbu horizontal tiga bilah. Dioda tiga fasa digunakan untuk menyearahkan tegangan yang dihasilkan. *Boost converter* digunakan untuk merealisasikan operasi MPPT, dimana hanya satu perangkat saklar daya aktif yang diperlukan yang mengurangi biaya dan menyederhanakan kendali dari sistem. Untuk lebih sederhana, beban resistor  $R_L$  disambungkan secara langsung ke keluaran *boost converter* untuk mengkonsumsi daya yang dihasilkan oleh turbin angin. [9]



Gambar 2. 1 Konfigurasi sistem pembangkit tenaga angin dengan MPPT [9]

#### 2.1.1 Pemodelan turbin angin

Daya mekanik yang dapat diekstrak dari angin dapat dirumuskan dalam (2.1) [9]

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 C_p \quad (2.1)$$

Dimana  $R$  adalah radius turbin (m),  $\rho$  adalah kepadatan udara ( $kg/m^3$ ),  $V_w$  adalah kecepatan angin (m/s) dan  $C_p$  adalah koefisien daya turbin, yang biasanya disediakan oleh manufaktur turbin angin. Torsi dari sumbu turbin angin dapat dihitung dari (2.2) [9]

$$T_w = \frac{P_w}{\Omega_m} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \frac{V_w^3}{\Omega_m} C_P \quad (2.2)$$

Dimana  $\Omega_m$  adalah kecepatan rotasi dari turbin angin. Nilai koefisien daya yang digunakan pada penelitian ini terdapat pada (2.3) [9]

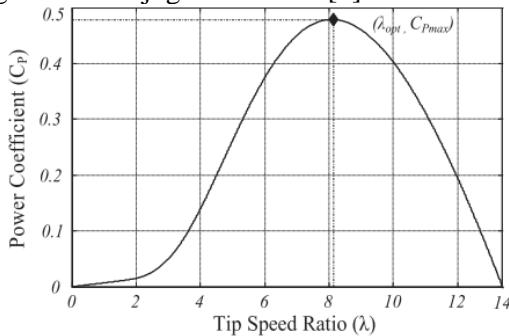
$$C_P = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.055}{\beta^3 + 1} \quad (2.4)$$

Dimana  $\beta$  adalah sudut dari bilah (rad), dimana ini dianggap 0 dan  $\lambda$  adalah *tip speed ratio* (TSR), yang direpresentasikan dalam (2.5). [9]

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

Gambar 2.2 menunjukkan kurva koefisien daya dibandingkan TSR. Dapat dilihat bahwa terdapat TSR optimum  $\lambda_{opt}$  dimana koefisien dayanya maksimum  $C_{Pmax}$ . Sehingga daya yang dihasilkan juga maksimal. [9]



Gambar 2.2 Kurva koefisien daya dibandingkan dengan *tip speed ratio* [9]

Jika sistem bekerja pada titik optimal, maka persamaan daya dapat ditentukan dengan mensubstitusi (2.5) ke (2.1) sehingga didapatkan (2.6) [9]

$$P_{w \max} = K \Omega_m^3 \text{opt} \quad (2.6)$$

Dimana  $\Omega_m \text{opt}$  adalah kecepatan rotasi optimum yang dihasilkan pada kecepatan angin tertentu dan K adalah gain daya optimal yang didapatkan dari (2.7). [9]

$$K = \frac{\frac{1}{2} \rho \pi R^5 C_{P \max}}{\lambda_{\text{opt}}^3} \quad (2.7)$$

Hubungan pada (2.6) dapat digunakan untuk merealisasikan kontrol MPPT. Kecepatan rotasi optimum dihitung dari daya keluaran, dengan mengendalikan turbin angin agar bekerja pada kecepatan rotor optimum, dipastikan daya yang diekstrak maksimum dari angin. [9]

### 2.1.2 Pemodelan *Permanent Magnent Synchrons Generator (PMSG)*

Persamaan dinamik PMSG dinyatakan dalam *d-q refrence frame*, dimana mengeliminasi semua induktansi variasi-waktu, menghasilkan (2.8) [9]

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s - L_d s & \omega_e L_d \\ -\omega_e L_q & -R_s - L_q s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \phi_m \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Dimana :

$R_s$  : resistansi stator per fase ( $\Omega$ )

$L_d, L_q$  : induktansi stator pada sumbu direct dan quadrature (H)

$V_{sd}, V_{sq}$  : tegangan mesin dua sumbu (V)

$i_{sd}, i_{sq}$  : arus mesin dua sumbu (A)

$s$  : operator laplace

$\omega_e$  : kecepatan elektrik dari tegangan stator (rad/s)

$\phi_m$  : amplitudo dari flux linkage yang dihasilkan dari permanen magnet (Wb)

Hubungan antara kecepatan elektrik dan kecepatan mekanik dapat dinyatakan dalam (2.9). [9]

$$\omega_e = \frac{P}{2} \Omega_m \quad (2.9)$$

Dimana P adalah jumlah pole dari PMSG. Persamaan dari torsi elektromekanik terdapat pada (2.10) [9]

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) \left( (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + \phi_m i_{sq} \right) \quad (2.10)$$

Induktansi stator di sumbu d dan q diperkirakan sama untuk PMSG *non-saline-pole*. Sehingga persamaan torsi elektromekanik (2.10) dapat disederhanakan menjadi persamaan (2.11). [9]

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\phi_m i_{sq}) \quad (2.11)$$

Akhirnya, persamaan dinamik mekanik dijabarkan pada(2.12). [9]

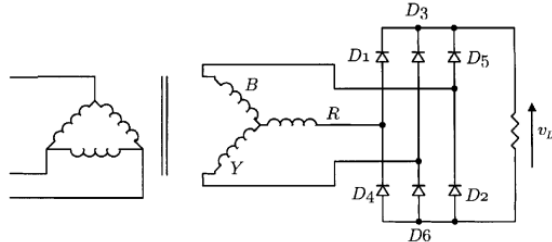
$$\frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_m - T_e) \quad (2.12)$$

Dimana J total momen inersia (mesin dan turbin angin) (kg m<sup>2</sup>)

### 2.1.3 Dioda Penyearah Tiga Fasa

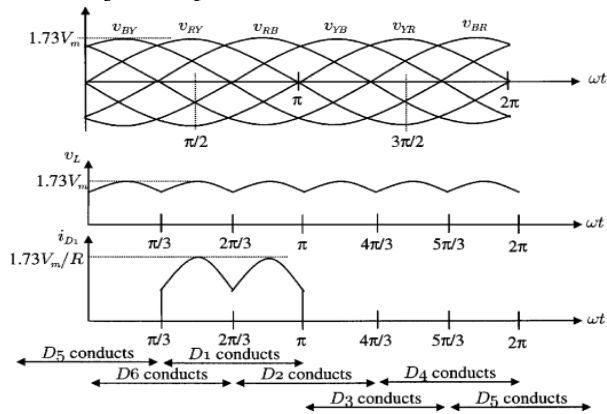
Terdapat 2 macam dioda penyearah untuk tegangan AC tiga fasa menuju tegangan DC antara lain *star rectifier* dan *bridge rectifier*. Pada penelitian ini digunakan susunan *bridge rectifier*. *Bridge rectifier* tiga fasa pada umumnya digunakan

pada aplikasi daya tinggi karena memiliki factor penggunaan transformer tertinggi pada sistem tiga fasa. Rangkaian untuk *bridge rectifier* tiga fasa terdapat pada Gambar 2.3. [10]



Gambar 2. 3 Bridge *rectifier* tiga fasa [10]

Dioda diberi angka sesuai dengan urutan konduktansinya dan sudut konduktansi masing-masing dioda adalah  $2\pi/3$ . Urutan konduktansi untuk dioda adalah 12, 23, 34, 45, 56, dan 61. Bentuk gelombang tegangan dan arus pada *bridge rectifier* tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 2.4 [10]



Gambar 2. 4 Bentuk gelombang tegangan dan arus dari *bridge rectifier* tiga fasa [10]

. Besar tegangan yang telah disearahkan adalah 1,73 kali tegangan fasa dari sumber tiga fasa. Tegangan rata-rata yang dapat dihasilkan dapat dirumuskan dalam (2.13) dan (2.14). [10]

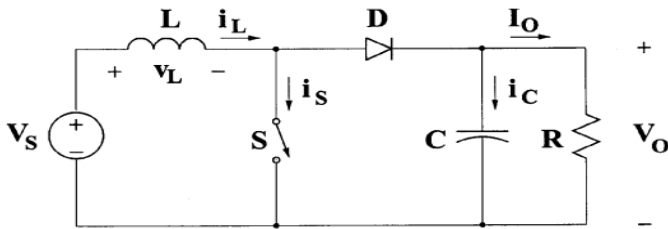
$$V_{dc} = \frac{6\pi}{2} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{3} V_m \sin\theta \, d\theta \quad (2.13)$$

Atau

$$V_{dc} = V_m \frac{3\sqrt{3}}{\pi} = 1.654 V_m \quad (2.14)$$

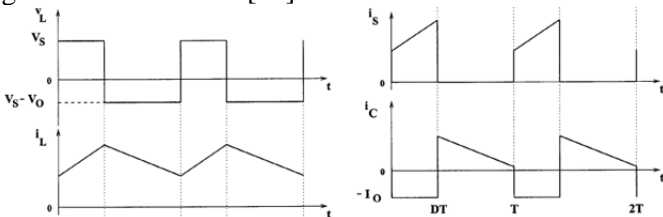
### 2.1.4 Boost Converter

Gambar 2.5 merupakan rangkaian dari *step-up* atau *PWM boost converter*. *Boost converter* terdiri dari tegangan input DC ( $V_s$ ), induktor *boost* (L), saklar yang dapat dikontrol (S), dioda (D), kapasitor filter (C), dan beban resistansi (R). [11]



Gambar 2. 5 Rangkaian *boost converter* [11]

Bentuk gelombang *converter* pada *continuous-conduction mode (CCM)* ditunjukkan pada Gambar 2.6. Ketika saklar S dalam keadaan menyala (on), arus pada induktor *boost* meningkat secara linear dan dioda akan mati pada saat itu. Ketika saklar S dalam keadaan mati (off), maka energi yang tersimpan pada induktor akan dilepaskan melalui dioda ke rangkaian RC keluaran. [11]



Gambar 2. 6 Bentuk Gelombang *boost converter* [11]



Menggunakan hukum faraday untuk *boost converter* akan menghasilkan (2.15). [11]

$$V_s D T = (V_o - V_s)(1 - D)T \quad (2.15)$$

Dimana fungsi transfer dari tegangan DC akan menjadi (2.16). [11]

$$M_V \equiv \frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.16)$$

Sesuai dengan nama dari *converter* ini, tegangan output akan selalu lebih besar daripada tegangan input. Dari Gambar 2.6, arus yang disuplai ke rangkaian RC keluaran tidaklah kontinyu. Sehingga diperlukan kapasitor filter yang besar dibandingkan dengan *buck-derived converter* untuk membatasi *ripple* tegangan output. Kapasitor filter harus menyediakan arus dc keluaran untuk beban ketika dioda D mati (off). [11]

## 2.2 *Sensorless Control*

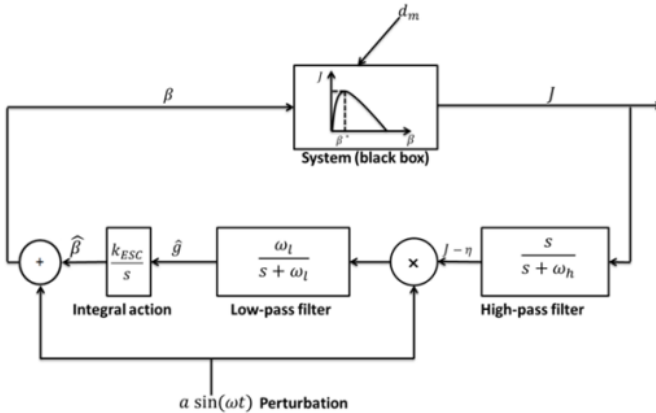
*Sensorless control* merupakan suatu kontrol dimana sensor tidak digunakan pada suatu sistem, tetapi menggunakan variabel lain yang diketahui dan terukur untuk mengestimasi variabel sensor tersebut. Alasan utama pengembangan *sensorless control* antara lain: reduksi kompleksitas *hardware* dan biaya, meningkatnya kekokohan mekanik, keandalan [8]. Pada penelitian ini digunakan variabel tegangan dan arus sebagai variabel yang diketahui.

Metode estimasi kecepatan bisa diklasifikasikan menjadi metode konvensional, berbasis model matematis dari motor elektrik, dan berbasis kecerdasan buatan. Esensi dari metode berbasis model adalah menggunakan algoritma tertentu untuk mengukur kecepatan dan posisi motor dari variabel yang terukur dan diketahui seperti arus motor dan tegangan. [8]

## 2.3 *Extremum Seeking Control (ESC)*

*Extremum seeking control* adalah metode optimasi waktu nyata yang menyelesaikan masalah mengenai maksimalisasi fungsi objektif yang menggambarkan performansi sistem dalam

mode statis dengan asumsi sistem dinamik dan fungsi objektifnya tidak diketahui. Metode yang digunakan terdiri dari merangsang sistem dengan sinyal periodik dan mengobservasi perilaku keluaran dari sistem pada mode statis untuk memperkirakan dan mengendalikan gradien pada fungsi objektif menjadi bernilai nol. *Extremum seeking control* secara umum menggunakan sinyal perturbation, *low-pass filter*, *high-pass filter* dan integrator. ESC memiliki struktur yang dapat diperlihatkan pada Gambar 2.7 [7]



Gambar 2. 7 Diagram blok skema *Extremum seeking control* [7]

Berdasarkan Gambar 2.7 maka didapatkan persamaan yang untuk ESC yaitu (2.17) hingga (2.20). [7]

$$\beta = \hat{\beta} + a \sin(\omega t) \quad (2.17)$$

$$\dot{\hat{\beta}} = k_{ESC} \hat{g} \quad (2.18)$$

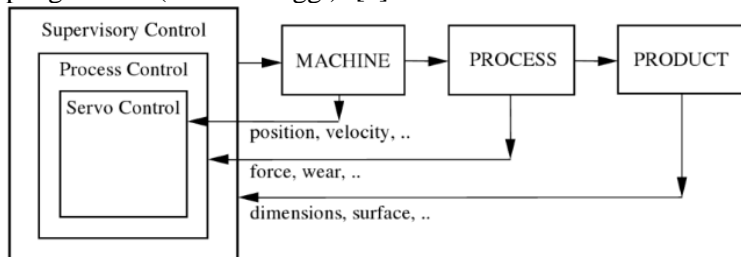
$$\hat{g} = -\omega_l \hat{g} + \omega_l (J - \eta) a \sin(\omega t) \quad (2.19)$$

$$\dot{\eta} = \omega_h \eta + \omega_h J \quad \eta = -\omega_h \eta + \omega_h J \quad (2.20)$$

Di mana  $a \in (a_{min} a_{max})$  adalah amplitudo dari sinyal rangsangan yang pada kebanyakan kasus, berbentuk sinyal sinusoidal.  $\omega$  adalah besarnya frekuensi dari sinyal rangsangan,  $a_{min}$  dan  $a_{max}$  adalah konstanta positif kecil dengan  $a_{min} = \varepsilon a_{max}$ ,  $\varepsilon \in R$ , dan  $\varepsilon > 1$ ,  $\omega_h$  adalah nilai cutoff frekuensi dari high-pass filter digunakan untuk mengeliminasi nilai konstan dari  $\eta$  dari  $J$ , sedangkan  $J$  adalah fungsi objektif.  $\omega_l$  adalah nilai cutoff dari lowpass filter yang digunakan untuk memperoleh nilai rata-rata dari hubungan fungsi objektif  $J$  dan sinyal rangsangan.  $k_{ESC}$  adalah integral controller gain yang digunakan untuk mendorong nilai gradien  $\hat{g}$  untuk mencapai nilai nol [7]

## 2.4 Supervisory Control

Istilah supervisory control digunakan untuk mendefinisikan sebuah sistem kontrol dengan supervisi yang mengacu pada peninjauan menyeluruh operasi, perencanaan, koordinasi dan eksekusi aksi yang memperbaiki performansi, ekonomis, dan kehandalan. Beberapa fungsi yang tergolong supervisor control adalah pemilihan strategi kontrol, penggabungan sensor, pembangkitan sinyal referensi, monitoring kerusakan, deteksi gangguan, dan monitoring mesin. Gambar 2.8 mengilustrasikan sebuah kontroler pada proses produksi yang terdiri atas tiga level kontrol yaitu level kontrol mesin, level kontrol proses, dan level kontrol pengawasan (level tertinggi). [6]



Gambar 2. 8 Struktur supervisory control pada proses produksi [6]

Strategi di level pengawasan ditujukan untuk menkompensasi faktor-faktor yang belum diperhitungkan secara eksplisit dalam desain kontrol nominal. Selain itu, level pengawasan dapat memonitor kegagalan dan/atau kerusakan komponen. Informasi dari sensor-sensor terkait dapat digabungkan untuk meningkatkan keandalan dan kualitas informasi. Seluruh informasi kemudian dapat digunakan untuk tujuan optimasi proses [6]

*Pada suatu studi, supervisory Control (SC) merupakan suatu sistem kontrol kecepatan angin. SC memiliki supervisory level dalam melakukan optimisasi pada kecepatan generator sebagai setpoint untuk menentukan sudut pitch blade yang tepat. Sudut akan dikendalikan dengan kontrol PI sehingga menghasilkan daya keluaran optimum dari turbin angin tanpa melebihi batas kecepatan pada rotor. [12]*

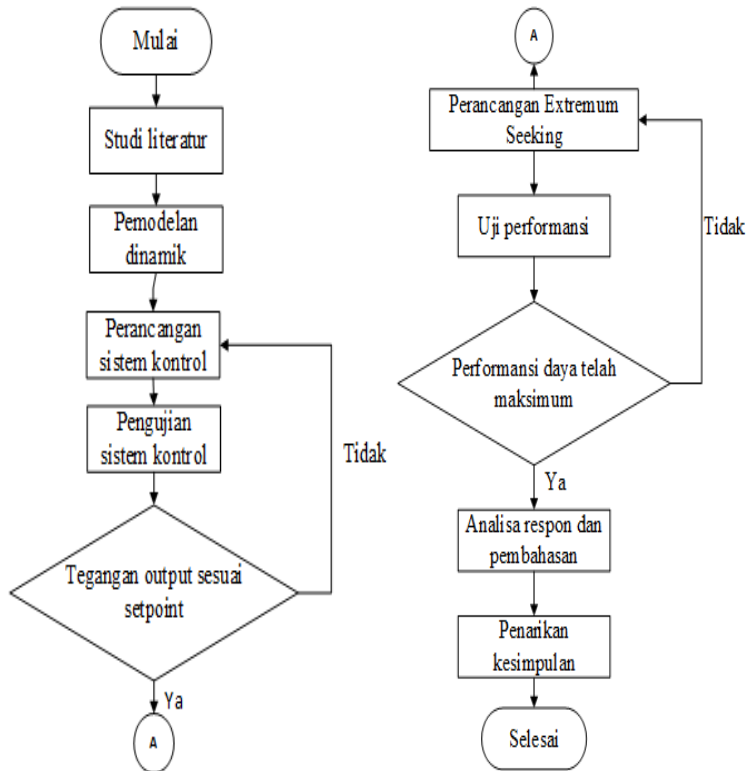
Pada level abstraksi yang tertinggi, tujuan utama supervisory control adalah mengoptimalkan produk. Dua tugas dasar perlu dilakukan untuk memenuhi tujuan ini [6]:

- a. Meningkatkan performansi sistem (misalkan menambah penghematan bahan bakar atau mengurangi biaya pembangkitan)
  - b. Menjaga parameter operasional (frekuensi dan tegangan, beban pada mesin diesel, dan lain-lain) dalam batasannya
- Aksi kontrol yang digunakan untuk melakukan tugas tersebut adalah [6]:
- a. Komponen switching on/off, yaitu mengubah model operasi system
  - b. Mengubah set point operasi dari beberapa komponen

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Prosedur Umum Penelitian

Pada bab ini, dijelaskan prosedur penelitian tugas akhir dalam mendesain *supervisory control* dengan algoritma *extremum seeking control* untuk mengekstraksi daya maksimum turbin angin untuk mencapai tujuan penelitian. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini sesuai dengan diagram alir yang terdapat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

Penelitian dimulai dengan melakukan studi literatur. Studi literatur merupakan suatu langkah dilakukannya studi terhadap beberapa literatur dari referensi buku, jurnal-jurnal ilmiah yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan. Dari studi literatur ini, diharapkan penulis dapat terbantu dalam menyusun langkah-langkah dan pola pikir yang akan dijadikan acuan dalam menyelesaikan permasalahan pada penelitian ini. Materi-materi yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini yaitu tentang sistem turbin angin secara umum, *maxiumum power point tracker (MPPT)*, algoritma *extremum seeking control*, *supervisory control*, turbin angin *sensorless* yang terdapat pada bab 2 laporan ini.

Selanjutnya dilaksanakan pemodelan secara matematis dari sistem turbin angin dan selanjutnya disimulasikan paramater-parameter dari sistem pada Simulink yang terdapat pada *software* Matlab sehingga dapat divariasikan dan diketahui nilai-nilai dari variabel yang dikendalikan.

Setelah dibuat model dari sistem turbin angin, dilakukan penentuan nilai kontrol PI pada *cascade control* sistem turbin angin agar output tegangan yang dikeluarkan dari sistem sesuai dengan setpoint yang telah ditentukan dan dilakukan pengujian terhadap sistem kontrolnya. Apabila telah sesuai dengan setpoint yang diharapkan maka dilanjut ke tahap berikutnya, dan apabila belum dilakukan kembali perancangan sistem kontrol.

Setelah dibuat sistem kontrol PI yang sesuai, dilakukan pembuatan algoritma *extremum seeking control(ESC)* untuk mengekstraksi daya secara maksimal dari turbin angin, di mana algoritma tersebut mengambil data berupa daya yang merupakan perkalian dari tegangan dan arus untuk dioptimasi dan menghasilkan keluaran berupa setpoint tegangan yang akan masuk ke sistem kontrol PI sebelumnya. Selanjutnya dilakukan pengujian terhadap algoritma ini apakah telah mencapai daya maksimum yang diinginkan. Apabila telah mencapai daya maksimum akan dilanjutkan dengan langkah selanjutnya dan

apabila belum akan dilakukan perancangan kembali algoritma ESC.

Setelah didapatkan data daya optimal dari turbin angin hasil keluaran algoritma *extremum seeking control*, data tersebut akan dianalisis dengan cara membandingkan data tersebut dengan data daya dari sistem turbin angin tanpa sistem kontrol dan dengan sistem kontrol lain yaitu MPPT dengan algoritma *perturbation and observation (P&O)* serta dilakukan pembahasan mengenai data tersebut.

Setelah melalui proses yang panjang, dibuat kesimpulan dari keseluruhan penelitian yang telah dilakukan untuk menjawab rumusan masalah berdasarkan analisa data dan pembahasan yang telah dilaksanakan.

### 3.2 Pemodelan Sistem Turbin Angin

Pada langkah ini, dilakukan pembuatan model dari turbin angin tipe *horizontal axis wind turbine (HAWT)* dengan model turbin AF1-24v-0125 (406 PMG). Turbin angin tersebut memiliki parameter-parameter yang dapat digunakan sebagai pemodelan sistem turbin angin. Tabel 3.1 merupakan spesifikasi dari turbin angin yang didapatkan dari *data sheet* turbin angin AF1-24v-0125 (406 PMG). [13] [14]

Tabel 3. 1 Spesifikasi turbin angin AF1-24v-0125 [13] [14]

Daya output	1000 W (for 12,5m/s) 500 W (for 9 m/s)
Blade turbine	3
Kecepatan angin <i>startup</i>	2 m/s
<i>charging initiation wind speed</i>	3 m/s
<i>charging initiation RPM</i>	258
Kecepatan rotor (RPM)	200-800
Diameter rotor	1,8 m
Tipe generator	3-Phase AC Permanent Magnet
Tipe output	3-Phase AC
Berat total	19 kg

Sistem turbin angin akan dimodelkan dengan tool bernama Simulink yang ada pada software Matlab. Simulasi dilakukan dengan susunan rangkaian sesuai diagram blok pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Diagram blok sistem turbin angin

### 3.2.1 Pembuatan Model Turbin Angin dan *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*

Dilakukan pembuatan model turbin angin dengan parameter-parameter yang diperlukan didapatkan dari [15] sehingga dapat dituliskan pada Tabel 3.2

Tabel 3. 2 Parameter pada Wind Turbine [15]

Parameter	Nilai	Satuan
Daya output mekanik	500/0.9	Watt
Daya dasar	500	Watt
Kecepatan angin dasar	9	m/s
Daya maksimum saat kecepatan angin dasar	1	Pu
Kecepatan rotasi dasar	0.8	Pu
Sudut <i>pitch</i>	0	deg

Turbin angin memiliki 3 input dan 1 output. Input pertama adalah kecepatan angin yang didapatkan dari data BMKG stasiun juanda pada bulan November sesuai Tabel 3.3. Input kedua merupakan sudut pitch yang dianggap konstan bernilai 0 agar tidak mempengaruhi hasil. Input ketiga merupakan kecepatan generator yang didapatkan dari kecepatan motor pada generator. Output dari turbin angin berupa torsi mekanik yang akan menggerakkan generator PMSG.



Tabel 3. 3 Data Kecepatan Angin dari BMKG stasiun Juanda Surabaya [16]

Tanggal	Kecepatan angin maksimum (m/s)
14-11-2019	4
15-11-2019	11
16-11-2019	7

Selanjutnya dilakukan pembuatan PMSG dengan parameter-parameter yang digunakan pada Tabel 3.4 dan konfigurasi pada Tabel 3.5

Tabel 3. 4 Parameter PMSG [15]

Parameter	Nilai	Satuan
Stator phase resistance ( $R_s$ )	0.18	Ohm
Induktansi armatur	0.000835	H
<i>Flux linkage</i>	0.07147	Vs
<i>Inertia (J)</i>	0.00062	Kg.m <sup>2</sup>
<i>Viscous damping (F)</i>	0.0003035	N.m.s
<i>Pole pairs (p)</i>	4	-
<i>Static friction (Tf)</i>	0	N.m
<i>Initial condition mekanik</i>	0	Rad/s
<i>Initial condition mekanik</i>	0	Deg
<i>Initial condition arus a</i>	0	A
<i>Initial condition arus b</i>	0	A

Tabel 3. 5 Konfigurasi PMSG [15]

Parameter	Konfigurasi
Jumlah Fasa	3
Bentuk gelombang EMF	<i>Sinusoidal</i>
Tipe rotor	<i>round</i>
Input mekanik	<i>Torque Tm</i>
<i>Model preset</i>	No.

PMSG memiliki satu input dan satu output. Input PMSG berupa torsi mekanik dari turbin angin. Output dari PMSG merupakan tegangan ac tiga fasa, yaitu tegangan yang memiliki beda sudut fasa sebesar 120°.

### 3.2.2 Pembuatan Dioda Rectifier

Pada Tabel 3.6 merupakan parameter-parameter dari rectifier/penyearah yang digunakan pada sistem turbin angin ini. Rangkaian dioda penyearah sesuai dengan subbab 2.1.3 digunakan untuk menyearahkan tegangan ac 3 fasa menjadi tegangan dc.

Tabel 3. 6 Parameter Rectifier [15]

Parameter	Nilai	Satuan
Jumlah <i>bridge arms</i>	3	-
Resistansi <i>Snubber (Rs)</i>	100	Ohm
Kapasitansi <i>Snubber (Cs)</i>	$0.1 \times 10^{-6}$	F
$R_{on}$	$1 \times 10^{-3}$	Ohm
$L_{on}$	0	H
Tegangan <i>Forward Vf</i>	0.8	V

### 3.2.3 Perancangan *Boost Converter*

Perancangan *boost converter* dilakukan dengan menentukan besar komponen aktif dan pasif dan parameter-parameter yang digunakan pada sistem turbin angin dijabarkan dalam Tabel 3.7 dan parameter baterai pada Tabel 3.8

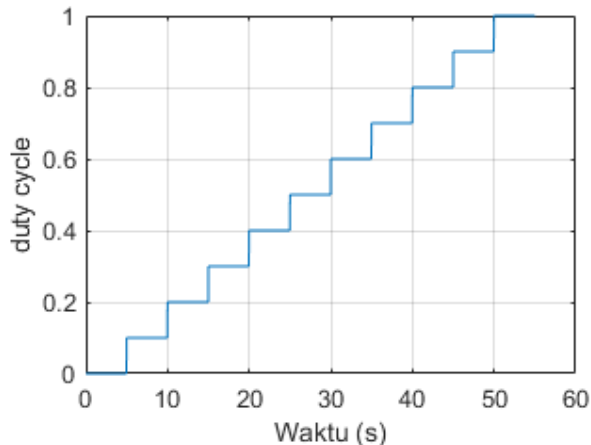
Tabel 3. 7 Parameter *boost converter* [15]

Parameter	Nilai	Satuan
Kapasitor sebelum boost	$10e-3$	F
Induktansi (L)	$6e-4$	H
Kapasitansi boost	$6e-4$	F
Resistansi (R)	1	Ohm
Resistansi ( $R_{on}$ ) dioda	0.001	Ohm
Tegangan forward (Vf) dioda	0.8	V

Tabel 3. 8 Parameter baterai

Tipe baterai	<i>Lead-Acid</i>
Tegangan nominal	12 V
<i>Rated capacity</i>	6.5 Ah
<i>Initial state-of-charge</i>	0%
Waktu respon baterai	30 s

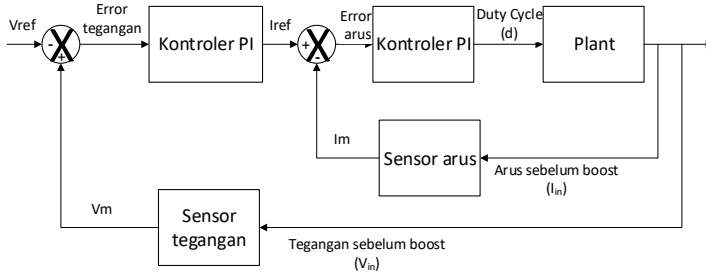
Setelah dirangkai, sistem turbin angin akan diuji karakteristik dari tegangan, arus dan daya pada *duty cycle* dari 0 hingga 1 setiap kelipatan 0,1 di kecepatan angin 5, 7,5, 10, dan 12,5 m/s sehingga dapat diketahui pada tegangan daya berapa, daya akan maksimal. Sinyal uji yang digunakan digambarkan pada Gambar 3.3



Gambar 3. 3 Duty cycle yang digunakan pada uji karakteristik sistem sistem turbin angin

### 3.3 Perancangan dan Pengujian Sistem Kontrol PI (*Cascade Control*)

Pada langkah ini dilakukan perancangan sistem kontrol secara *cascade* untuk tegangan dan arus pada sistem turbin angin dimana diberikan setpoint pada sistem kontrol PI tegangan sehingga menghasilkan sinyal kontrol yang menjadi setpoint untuk sistem kontrol PI arus dan menghasilkan sinyal kontrol berupa duty cycle yang merupakan masukan dari boost converter. Dari penjelasan tersebut dapat dibentuk dalam diagram blok seperti pada Gambar 3.4.

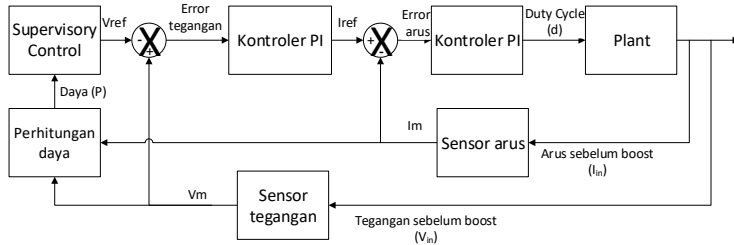


Gambar 3. 4 Diagram blok sistem kontrol PI *cascade*

Penentuan pengurangan dan penjumlahan dengan tegangan atau arus terukur dari sistem kontrol pada diagram blok didapatkan dari karakteristik sistem turbin angin dimana tegangan akan berbanding terbalik dengan arus. Parameter-parameter atau nilai  $K_p$  dan  $K_i$  dari kontroler arus dan tegangan yang didapatkan dari hasil “*trial and error*” yaitu untuk kontroler tegangan nilai  $K_p = 0.001$  dan  $K_i = 0.01$  serta untuk kontroler PI arus nilai  $K_p = 20$  dan  $K_i = 10$

### 3.4 Perancangan Algoritma *Extremum Seeking Control (ESC)* untuk *Supervisory Control*

Pada tahapan penelitian ini, dilakukan perancangan algoritma *extremum seeking control* dimana algoritma ini memerlukan masukan berupa sistem non-linear yang memiliki puncak sehingga data berupa daya sangat tepat untuk dijadikan masukan yang dioptimalkan pada algoritma ini. Untuk keluaran dari algoritma ini merupakan setpoint dari sistem kontrol PI cascade yang telah dirancang sebelumnya. Dari penjelasan mengenai *extremum seeking control* yang telah dijabarkan, dapat dibentuk dalam diagram blok pada Gambar 3.5



Gambar 3. 5 Diagram blok supervisory control yang didalamnya terdapat algoritma ESC

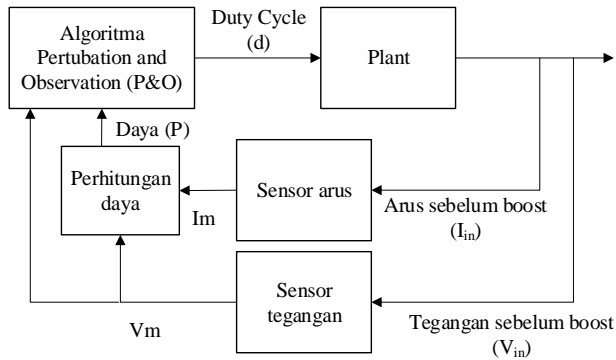
Untuk parameter-parameter penting dari algoritma ini ditentukan dari metode *trial and error* terdapat pada Tabel 3.11.

Tabel 3. 9 Parameter algoritma extremum seeking control

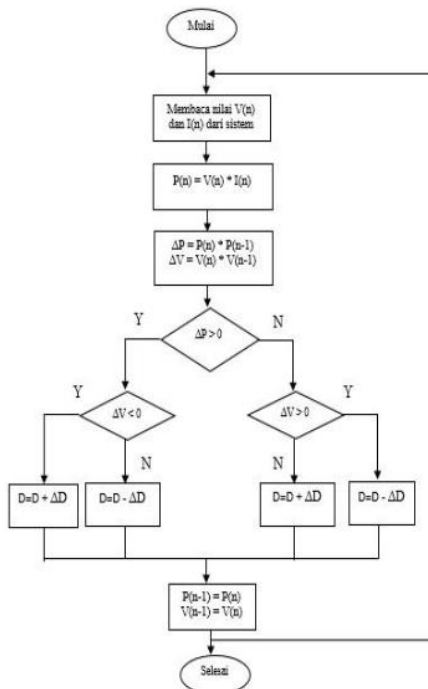
Numerator untuk High-pass filter	[1 0]
Denominator untuk High-pass filter	[1 1]
Initial condition integrator	10
Gain	1
Amplitudo sinyal sinusoidal	0,4
Frekuensi sinyal sinusoidal	$100 \cdot 2 \cdot \pi$

### 3.5 Perancangan Algoritma *Perturbation and Observation* (P&O) Sebagai Pembanding

Pada penelitian ini dibuat sebuah algoritma pembanding dari extremum seeking control, yaitu algoritma *perturbation and observation* (P&O) dimana algoritma ini akan meningkatkan dan menurunkan duty cycle dari boost converter secara langsung dari data daya dan tegangan yang diperoleh. Untuk diagram blok dari sistem turbin angin dengan algoritma P&O digambarkan pada Gambar 3.6 serta diagram alir algoritma P&O pada Gambar 3.7



Gambar 3. 6 Diagram blok sistem turbin angin dengan algoritma perturbation and observation (P&O)



Gambar 3. 7 Diagram alir algoritma P&O [17]

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisa Data Hasil Karakteristik Sistem Turbin Angin

Setelah dimasukkan parameter-parameter pada masing-masing bagian, dimasukkan duty cycle pada boost converter dari 0 hingga 1 dengan kelipatan 0.1 pada berbagai kecepatan angin (5 hingga 15 m/s dengan kelipatan 2,5) untuk mendapatkan karakteristik dari tegangan, arus, dan daya dari sistem turbin angin. Karakteristik dari sistem turbin angin pada masing-masing kecepatan angin ditampilkan dalam bentuk Tabel 4.1 hingga 4.4.

Tabel 4. 1 Karakteristik turbin angin pada berbagai duty cycle dengan kecepatan angin 5 m/s

d	l	vin	P	w
0	3.475	13.26	46.08	34.88
0.1	5.013	11.41	57.22	32.07
0.2	4.932	11.51	56.81	32.21
0.3	6.871	9.03	62.07	28.44
0.4	6.835	9.064	61.97	28.5
0.5	8.686	6.156	53.5	23.5
0.6	8.753	5.817	50.89	22.79
0.7	4.11	2.286	12.98	11.28
0.8	3.954	2.211	12.21	11.02
0.9	0.9291	0.09278	0.08663	4.287
1	0.9294	0.09277	0.0867	4.289

Tabel 4. 2 Karakteristik turbin angin pada berbagai duty cycle dengan kecepatan angin 7,5 m/s

d	l	vin	P	w
0	8.623	18.71	158.5	50.79
0.1	10.39	16.07	183.9	47.44
0.2	10.47	16.15	183.5	48.21
0.3	14.27	12.68	192.5	42.8
0.4	14.27	12.72	192.3	42.81
0.5	19.62	8.741	169.2	38.27
0.6	19.63	8.322	163.7	36.93
0.7	21.11	4.846	105	29.07
0.8	21.53	4.839	104.8	30.58
0.9	2.403	0.2094	0.4416	5.737
1	2.403	0.2093	0.4413	5.737

Tabel 4. 3 Karakteristik turbin angin pada berbagai duty cycle dengan kecepatan angin 10 m/s

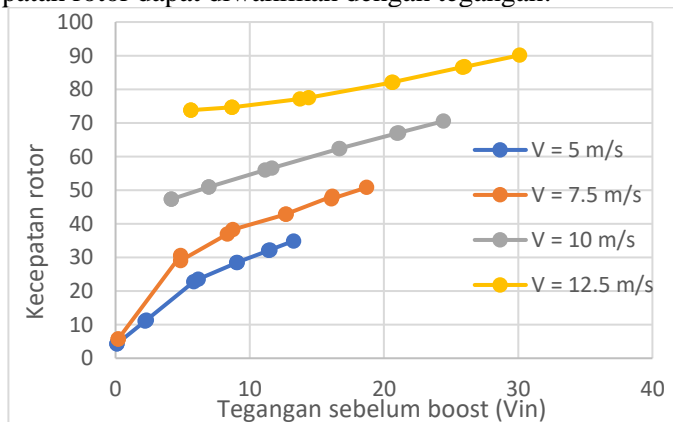
d	l	vin	P	w
0	13.85	24.42	338.1	70.5
0.1	18.4	20.98	385.9	66.93
0.2	18.27	21.08	385.1	67.04
0.3	24.3	16.65	404.8	62.31
0.4	24.22	16.7	404.5	62.38
0.5	31.44	11.65	366.8	56.57
0.6	32.2	11.14	358	55.96
0.7	38	6.945	264	50.96
0.8	37.99	6.938	263.8	50.95
0.9	41.58	4.151	172.6	47.28
1	41.59	4.151	172.6	47.28



Tabel 4. 4 Karakteristik turbin angin pada berbagai duty cycle dengan kecepatan angin 12,5 m/s

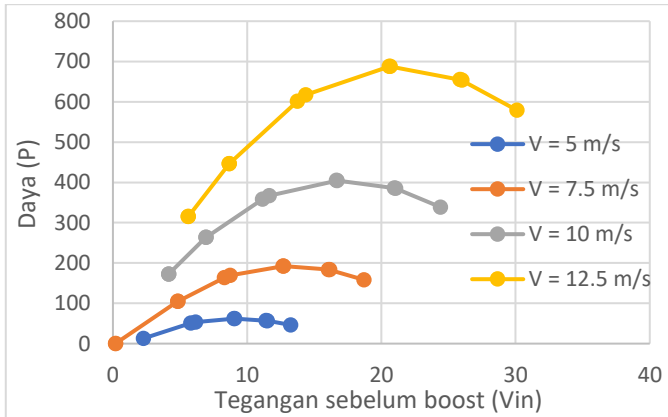
d	l	vin	P	w
0	19.25	30.1	579.3	90.11
0.1	25.36	25.86	655.5	86.57
0.2	25.14	26	654	86.77
0.3	33.4	20.6	688.2	82.04
0.4	33.3	20.67	688.3	82.1
0.5	42.92	14.38	617.2	77.52
0.6	43.86	13.74	601.3	77.13
0.7	51.46	8.681	446.7	74.61
0.8	51.52	8.67	446.3	74.61
0.9	56.14	5.615	315.2	73.79
1	56.14	5.615	315.3	73.79

Dari data karakteristik pada Tabel 4.1 hingga 4.4 dapat dibuat bentuk grafik antara tegangan dan kecepatan rotor pada Gambar 4.1. Pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa hubungan antara tegangan dan kecepatan rotor berbanding lurus, sehingga kecepatan rotor dapat diwakilkan dengan tegangan.



Gambar 4. 1 Grafik hubungan tegangan dan kecepatan rotor

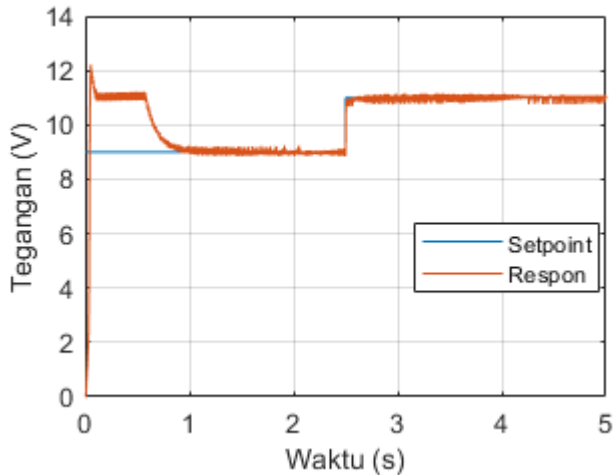
Selain ditemukan hubungan antara tegangan dan kecepatan rotor, dibuat pula grafik antara tegangan dan daya agar dapat ditentukan pada tegangan berapa daya maksimal terjadi seperti pada Gambar 4.2



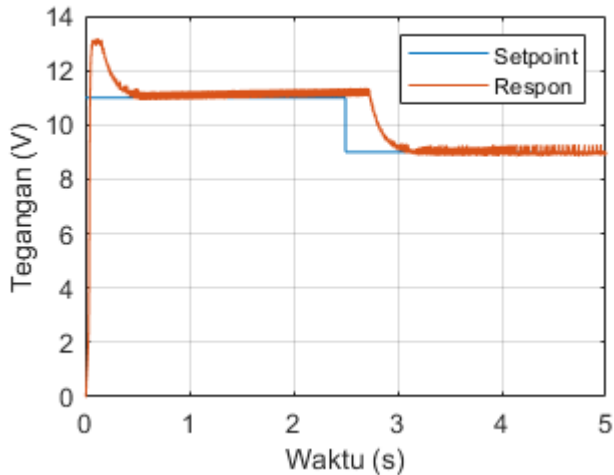
Gambar 4. 2 Grafik karakteristik daya terhadap tegangan di berbagai kecepatan angin

#### 4.2 Analisa Data Sistem Kontrol PI (*Cascade Control*)

Dilakukan pengujian sistem turbin angin dengan sistem kontrol PI *cascade* sesuai dengan pengaturan pada Tabel 3.9 dan 3.10. Untuk sinyal uji dilakukan berupa 2 sinyal, yaitu sinyal step naik dan sinyal step turun pada tegangan sesuai dengan data karakteristik pada salah satu kecepatan angin. Kecepatan angin yang digunakan untuk uji sistem kontrol PI adalah 5 m/s. Sehingga nilai step naik yang digunakan adalah dari 9 V ke 11 V dan sinyal step turun yang digunakan adalah sebaliknya dari 11 V ke 9V dan keduanya dilakukan pada waktu *step* 2,5 s. Hasil dari uji respon sistem turbin angin digambarkan dalam grafik hubungan tegangan dan waktu yaitu pada Gambar 4.3 untuk uji step naik dan Gambar 4.4 untuk uji step turun.



Gambar 4. 3 Hasil uji sistem kontrol PI pada sinyal step naik



Gambar 4. 4 Hasil uji sistem kontrol PI pada sinyal step turun

Dari gambar hasil uji respon sistem turbin angin dapat ditemukan hasil analisis respon step berupa *rise time*, *delay time*, *settling time* dan *error steady state* dari sistem turbin angin ini pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6

Tabel 4. 5 Hasil analisa respon step naik pada uji sistem kontrol PI

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Rise time</i>	8.952	ms
<i>Delay time</i>	2.513	ms
<i>Settling time</i>	84.956	ms
<i>Error steady state</i>	-6 hingga 3	persen

Tabel 4. 6 Hasil analisa respon step turun pada uji sistem kontrol PI

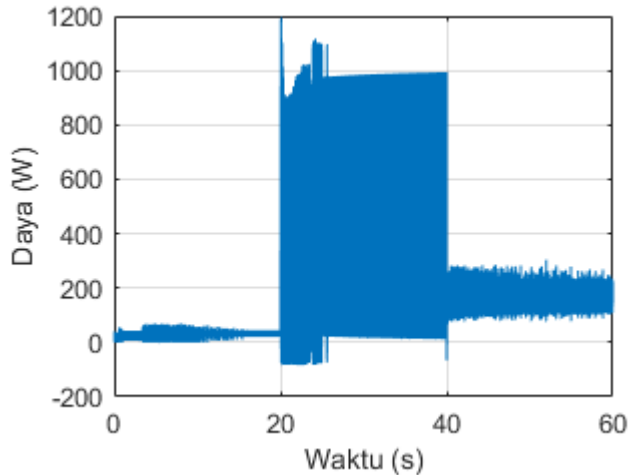
Parameter	Nilai	Satuan
<i>Rise time</i>	202.549	ms
<i>Delay time</i>	307.744	ms
<i>Settling time</i>	616.928	ms
<i>Error steady state</i>	-5 hingga 9	persen

### 4.3 Analisa Data Hasil Daya dari Algoritma *Extremum Seeking Control*

Dari simulasi dari sistem turbin angin dengan *supervisory control* berupa algoritma *extremum seeking control* yang telah dilakukan, didapatkan hasil data berupa grafik daya pada kecepatan 5 m/s dan naik setiap 10 detik sekali sebesar 2,5 m/s hingga 12,5 m/s dan turun kembali setiap 10 detik sekali sebesar 2,5 m/s hingga kembali 5 m/s pada Gambar 4.4 Dan dari grafik pada Gambar 4.4 nilai daya yang dihasilkan dapat dituliskan dalam bentuk Tabel 4.7 berikut

Tabel 4. 7 Data daya sistem turbin angin dengan algoritma *extremum seeking* pada berbagai kecepatan angin

Kecepatan angin	Rata-rata (Mean) daya
4 m/s	32,07 W
11 m/s	393,7 W
7 m/s	158 W



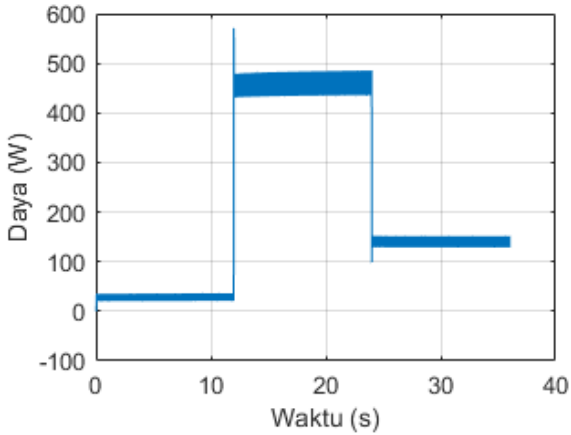
Gambar 4. 5 Grafik daya terhadap waktu pada kecepatan angin 4, 11 dan 7 m/s di sistem turbin angin dengan algoritma ESC

#### 4.4 Analisa Data Hasil Daya dari Sistem Turbin Angin Tanpa Kontrol

Sebagai pembandingan dari sistem kontrol turbin angin dengan algoritma *Extremum Seeking Control*, dilakukan simulasi yang sama tetapi tanpa menggunakan kontroler PI maupun algoritma ESC pada duty cycle 0,5 sehingga terbentuk grafik pada Gambar 4.5. Dan dari grafik pada Gambar 4.5, nilai daya yang dihasilkan dapat dituliskan dalam bentuk Tabel 4.8 berikut

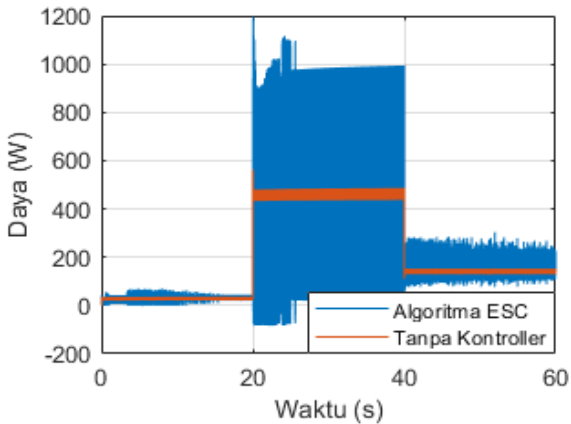
Tabel 4. 8 Data daya sistem turbin angin tanpa controller pada berbagai kecepatan angin

Kecepatan angin	Rata-rata (Mean) daya
4 m/s	28,82 W
11 m/s	462,5 W
7 m/s	140,8 W



Gambar 4. 6 Grafik daya terhadap waktu pada kecepatan angin 4, 11 dan 7 m/s di sistem turbin angin tanpa kontroller

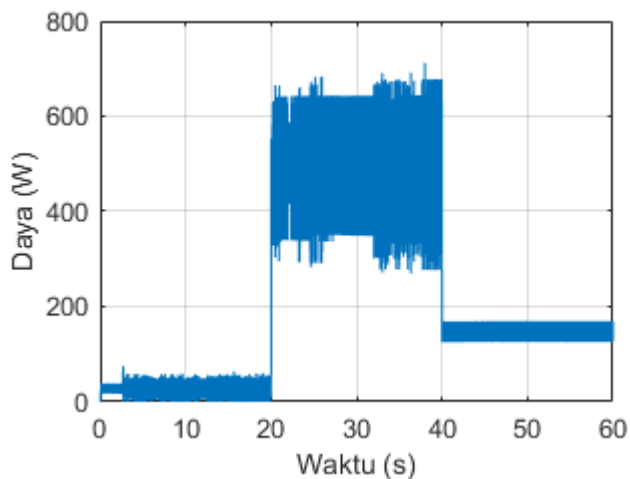
Serta dapat digabungkan kedua grafik dari sistem turbin angin dengan algoritma ESC dan tanpa kontroller seperti pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4. 7 Grafik daya terhadap waktu pada kecepatan angin 4, 11 dan 7 m/s di sistem turbin angin dengan ESC dibandingkan terhadap sistem turbin angin tanpa kontroller

#### 4.5 Analisa Data Hasil Daya dari Sistem Turbin Angin dengan Algoritma *Perturbation and Observation* (P&O)

Sebagai pembandingan lain dari sistem kontrol turbin angin dengan algoritma *Extremum Seeking Control*, dilakukan simulasi sistem turbin angin dengan algoritma *perturbation and observation* (P&O) sehingga terbentuk grafik pada Gambar 4.7. Dan dari grafik pada Gambar 4.7, nilai daya yang dihasilkan dapat dituliskan dalam bentuk Tabel 4.9 berikut

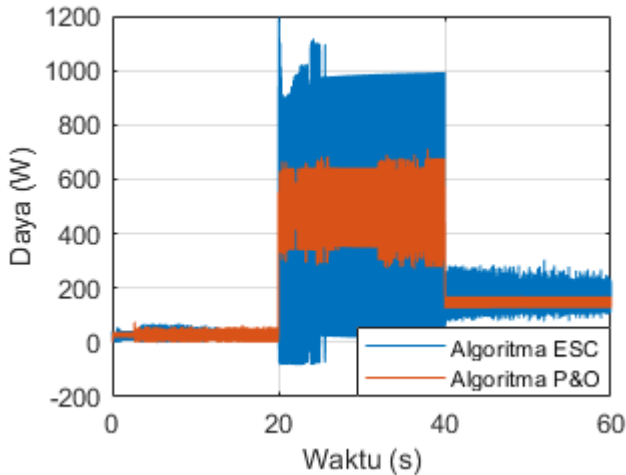


Gambar 4. 8 Grafik daya terhadap waktu pada kecepatan angin 4, 11 dan 7 m/s di sistem turbin angin dengan algoritma P&O

Tabel 4. 9 Data daya sistem turbin angin dengan algoritma P&O pada berbagai kecepatan angin

Kecepatan angin	Rata-rata (Mean) daya
4 m/s	31,54 W
11 m/s	514.7 W
7 m/s	150 W

Serta dapat digabungkan kedua grafik dari sistem turbin angin dengan algoritma ESC dan dengan algoritma P&O untuk dibandingkan seperti pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4. 9 Grafik daya terhadap waktu pada kecepatan angin 4, 11 dan 7 m/s di sistem turbin angin dengan ESC dibandingkan terhadap sistem turbin angin dengan P&O

#### 4.6 Pembahasan

Dilaksanakan penelitian tentang sistem turbin angin dengan kontrol PI cascade dengan algoritma *extremum seeking* control. Pada penelitian ini dilakukan beberapa tahapan. Tahapan pertama yaitu memodelkan sistem turbin angin dan mengidentifikasi karakteristik dari sistem turbin angin tersebut. Pada tahapan ini dirangkai sistem turbin angin yang terdiri atas turbin angin yang mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik dalam bentuk torsi mekanik, *permanent magnet synchronous generator* yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dalam bentuk tegangan AC tiga fasa, *diode rectifier*/dioda penyearah yang menyearahkan tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan DC, dan *boost converter* yang meningkatkan tegangan DC yang diterima. Parameter-



parameter yang menjadi karakteristik dari sistem turbin angin dengan perubahan *duty cycle* pada kecepatan angin 5-12,5 m/s antara lain tegangan dan arus masuk sebelum *boost converter* ( $V_{in}$  dan  $I_{in}$ ), serta daya dari hasil perkalian tegangan dan arus ( $P$ ). Dari data tersebut dapat dibentuk grafik hubungan antara daya terhadap besar *duty cycle*, tegangan terhadap *duty cycle*, arus terhadap *duty cycle*, kecepatan rotor terhadap *duty cycle*, kecepatan rotor terhadap tegangan serta daya terhadap tegangan. Dari grafik yang telah dibentuk dapat diketahui bahwa tegangan dan kecepatan rotor akan berbanding terbalik dengan besar *duty cycle*, tetapi arus berbanding lurus dengan *duty cycle*. Sehingga perkalian dari tegangan dan arus akan membentuk suatu kurva yang memiliki titik optimal atau puncak. Selain itu dapat dibentuk juga grafik hubungan antara tegangan dan daya dimana akan membentuk kurva yang memiliki titik optimal pula pada tegangan tertentu. Sehingga tegangan bisa menjadi set point dari sistem turbin angin ini.

Selanjutnya dilakukan pembuatan sistem kontrol PI *cascade* dimana *inner loop* dari sistem ini adalah kontrol arus dan *outer loop* mengendalikan tegangan. Untuk penentuan dari konstanta  $K_p$  dan  $K_i$  dilakukan dengan *fine tuning* atau metode *trial and error*. Sinyal uji yang digunakan pada pengujian sistem kontrol PI *cascade* adalah sinyal step naik dan turun. Hasil uji dari sistem kontrol ini adalah untuk perubahan tegangan naik, respon sistem akan berjalan sangat cepat hingga beberapa ms dan range error yang kecil. Akan tetapi ketika sinyal uji turun maka akan terjadi delay serta perubahan tegangan yang sangat lambat hingga ratusan ms serta range error yang dihasilkan juga besar.

Pada sistem turbin angin dengan algoritma ESC, telah dilakukan peninjauan sistem secara menyeluruh dari tegangan dan arus. Kemudian penentuan setpoint juga dilakukan dari data-data tersebut secara otomatis. Sehingga algoritma ESC telah melakukan sistem kontrol berupa *supervisory control* karena telah melakukan peninjauan sistem serta penentuan setpoint secara otomatis.

Selanjutnya dilakukan 3 macam percobaan, yaitu percobaan sistem turbin angin tanpa kontrol dengan duty cycle tertentu, percobaan sistem turbin angin dengan MPPT algoritma *Perturbation and Observation*, dan percobaan sistem turbin angin dengan *supervisory control* menggunakan algoritma *extremum seeking control*. Pada penelitian dengan *extremum seeking control*, didapatkan data berupa daya ekstraksi pada kecepatan angin 4, 11, dan 7 m/s sesuai data dari BMKG. Daya yang dihasilkan algoritma ini memiliki fluktuasi naik turun yang konstan sehingga terbentuk range daya maksimum dan minimum dimasing-masing kecepatan angin. Untuk daya ketika kecepatan angin naik akan memiliki rentang daya yang lebih lebar dibandingkan dengan daya pada kecepatan angin turun kecuali pada kecepatan angin 10 m/s memiliki rentang daya yang jauh lebih lebar. Adanya rentang daya ini bisa diakibatkan karena adanya masukan berupa tegangan referensi ( $V_{ref}$ ) hasil dari algoritma ini yang berupa sinyal sinusoida sehingga menyebabkan set point tegangan berubah<sup>2</sup> sesuai dengan sinyal sinusoida tersebut dan daya yang merupakan hasil perkalian tegangan dan arus akan berubah pula.

Untuk besar daya yang dihasilkan dari ketiga konfigurasi ini, didapatkan bahwa pada kecepatan angin 4 dan 7 m/s, sistem turbin angin dengan algoritma *extremum seeking* memiliki daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem turbin angin tanpa kontroler dan dengan algoritma *Perturbation and Observation*. Akan tetapi pada kecepatan angin 11 m/s, sistem dengan algoritma ESC memiliki daya yang lebih rendah dibandingkan dengan kedua konfigurasi lainnya. Hal ini dapat disebabkan karena lambannya perubahan pengaturan setpoint pada kecepatan angin tinggi ( $> 7\text{m/s}$ ) sehingga daya yang dihasilkan juga akan kecil. Sehingga algoritma *extremum seeking control* tidak cocok digunakan pada kecepatan angin tinggi.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari seluruh rangkaian tugas akhir yang telah dilaksanakan, dapat disimpulkan beberapa poin sebagai berikut:

- Variabel kecepatan rotor dapat digantikan dengan variabel tegangan sehingga tidak diperlukan lagi sensor kecepatan dan sistem turbin angin menjadi sistem dengan *sensorless control*
- Kontroler PI yang tersusun secara cascade mampu menghasilkan respon yang cepat pada uji step naik dengan rise time sebesar 8.952 ms dan rentang *error steady state* sebesar -6% hingga 3 % dan respon yang lambat pada uji step turun dengan adanya delay time sebesar 307.744 ms, rise time sebesar 202.549 ms dan rentang *error steady state* sebesar -5% hingga 9 %
- *Supervisory control* dapat diimplementasikan pada sistem turbin angin dengan menggunakan algoritma *extremum seeking*.
  - Untuk kecepatan angin rendah ( $< 7$  m/s), sistem turbin angin dengan *supervisory control* berbasis algoritma *extremum seeking* menghasilkan daya yang lebih tinggi sebesar 32,07 W (pada 4 m/s) dan 158 W (pada 7 m/s) dibandingkan dengan daya sistem turbin angin dengan algoritma *perturbation & observation* sebesar 31,54 W (4 m/s) dan 150 W (7 m/s) dan daya sistem turbin angin tanpa controller sebesar 28,82W (4m/s) dan 140,8 W (7m/s).
  - Untuk kecepatan angin tinggi (11 m/s), sistem turbin angin dengan *supervisory control* berbasis algoritma *extremum seeking* menghasilkan daya yang lebih rendah sebesar 393.7 W dibandingkan dengan daya sistem turbin angin dengan algoritma *perturbation & observation* sebesar 514,7 W dan daya sistem turbin angin tanpa controller sebesar 462,5W.

## 5.2. Saran

Dari tugas akhir yang telah dilaksanakan, dapat ditemukan beberapa saran dalam memperbaiki penelitian ini antar lain:

- a. Waktu dalam melakukan variasi lebih diperlama lagi agar algoritma *extremum seeking* bisa bekerja lebih baik
- b. Perubahan kecepatan angin diganti yang lebih bertahap agar perubahan setpoint tidak signifikan dan hasil tidak memiliki range yang lebar

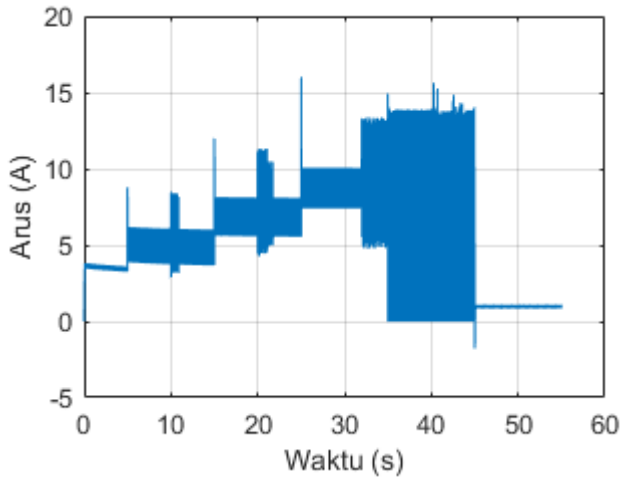
## DAFTAR PUSTAKA

- [1] IRENA, "Renewable Energy Statistics 2019," The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
- [2] Presiden Republik Indonesia, "Lampiran I Peraturan Presiden RI no 22 Tahun 2017," Sekretariat Kabinet RI, Jakarta, 2017.
- [3] T. Martono, "Peningkatan Efisiensi Kincir Angin Poros Vertikal Melalui Sistem Buka-tutup Sirip pada 3 Sudu," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 11, no. 2, p. 122, 2011.
- [4] A. Soetedjo, A. Lomi dan W. P. Mulayanto, "Modeling of Wind Energy System with MPPT Control," dalam *International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, Bandung, 2011.
- [5] J. Thongam dan M. Ouhrouche, "MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems," *Fundamental and Advance Topics in Wind Power*, Quebec, 2011.
- [6] L. Wang dan R. X. Gao, "Monitoring and Control of Machining," dalam *Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing*, London, Springer London Ltd., 2006, pp. 1-27.
- [7] A. Kebir, L. Woodward dan O. Akhrif, "Extremum Seeking Control with Adaptive Excitation : Application to a Photovoltaic System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 3, pp. 2507-2517, 2018.
- [8] P. Brandstetter, "Sensorless Control of DC Drive Using Artificial Neural Network," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 11, no. 10, pp. 5-20, 2014.
- [9] Y. Daili, J.-P. Gaubert dan L. Rahmani, "Implementation of a new maximum power point tracking control strategy for small wind energy conversion systems without mechanical sensors," *Energy Conversion and Management*, no. 97, pp. 298-306, 2015.

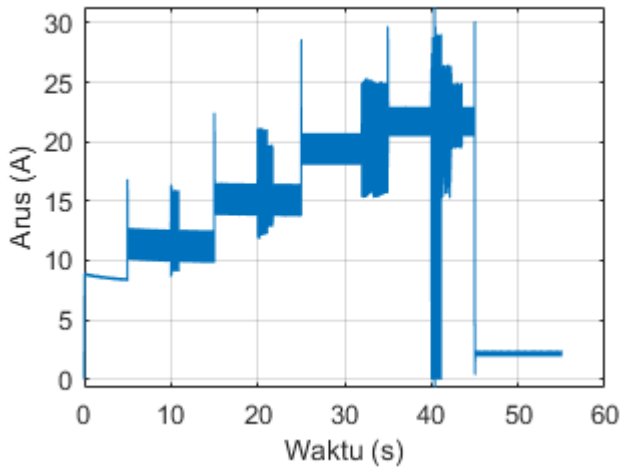
- [10] Y.-S. Lee dan M. H. Chow, "Diode Rectifier," dalam *Power Electronics Handbook*, California, ACADEMIC PRESS, 2001, pp. 144-148.
- [11] D. Czarkowski, "DC-DC Converters," dalam *Power Electronics Handbook*, California, ACADEMIC PRESS, 2001, pp. 215-216.
- [12] K. Indriawati, A. Musyafa, B. L. Widjianto dan A. M. Ummah, "Study of Supervisory Control Implementation in A Small Scale Variable Speed Wind Turbine," *ASTECHNOVA 2017*, Surabaya, 2018.
- [13] FuturEnergy, "181007-2-AF1-data-sheet-24V-48V-11108A.pdf," 1 Februari 2019. [Online]. Available: <https://futureenergy.co.uk/wp-content/uploads/2019/02/181007-2-AF1-data-sheet-24V-48V-11108A.pdf>. [Diakses 14 Januari 2020].
- [14] FuturEnergy, "af1-24v-turbine-spec-power-curve.pdf," 1 Februari 2019. [Online]. Available: <https://futureenergy.co.uk/wp-content/uploads/2017/05/af1-24v-turbine-spec-power-curve.pdf>. [Diakses 14 Januari 2020].
- [15] R. Harianto, "IMPLEMENTASI SUPERVISORY CONTROL UNTUK PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN ANGIN MENGGUNAKAN METODE DIRECT TORQUE CONTROL BERBASIS BOOST CONVERTER," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [16] BMKG, "DATA ONLINE - PUSAT DATABASE - BMKG," Kamis Januari 2020. [Online]. Available: [http://dataonline.bmkg.go.id/akses\\_data](http://dataonline.bmkg.go.id/akses_data). [Diakses 9 Januari 2020].
- [17] A. Fitriah, F. D. Wijaya dan E. Firmansyah, "Implementasi Maximum Power Point Tracking (MPPT) Berbasis Perturb and Observe (P&O) pada Photovoltaic (PV) dengan Variasi Iradiasi," dalam *CITEE 2019*, Yogyakarta, 2019.

# LAMPIRAN 1

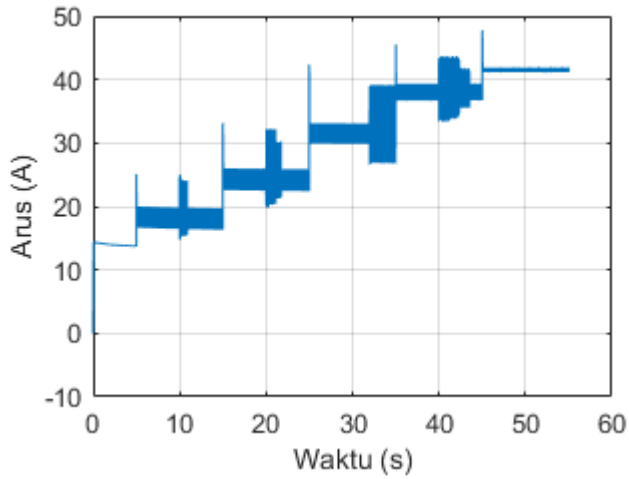
## UJI KARAKTERISTIK SISTEM TURBIN ANGIN



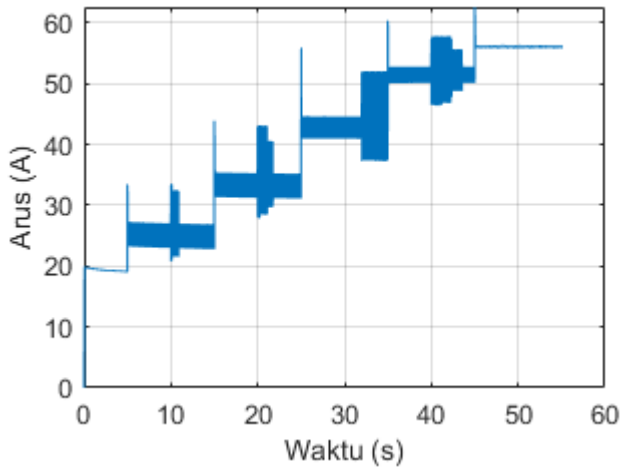
Gambar 1 karakteristik arus pada kecepatan angin 5 m/s



Gambar 2 karakteristik arus pada kecepatan angin 7,5 m/s

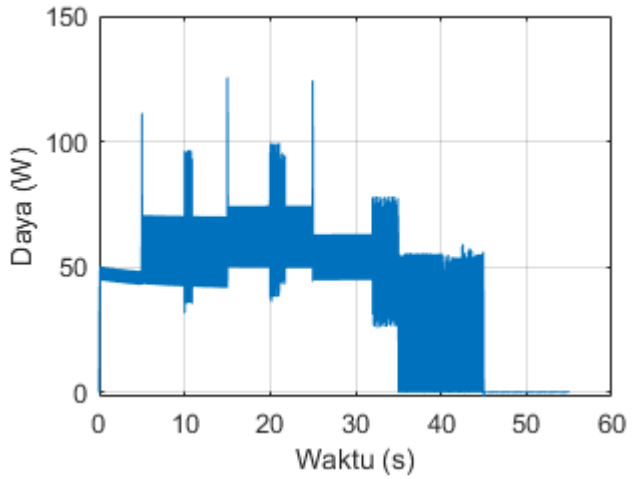


Gambar 3 karakteristik arus pada kecepatan angin 10 m/s

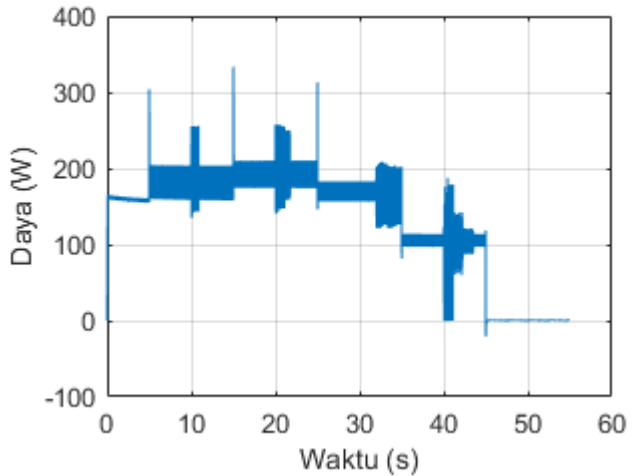


Gambar 4 karakteristik arus pada kecepatan angin 12.5 m/s

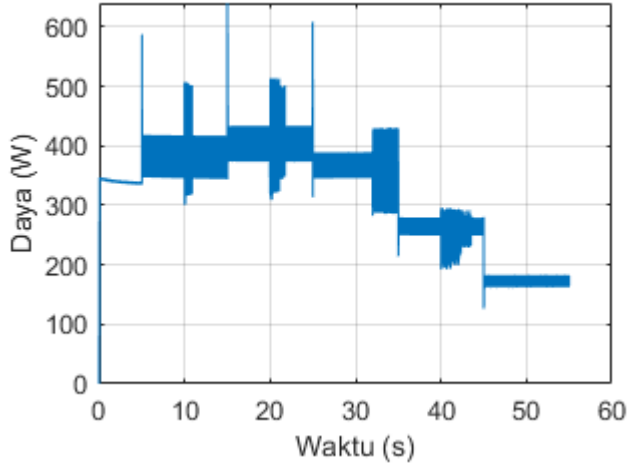




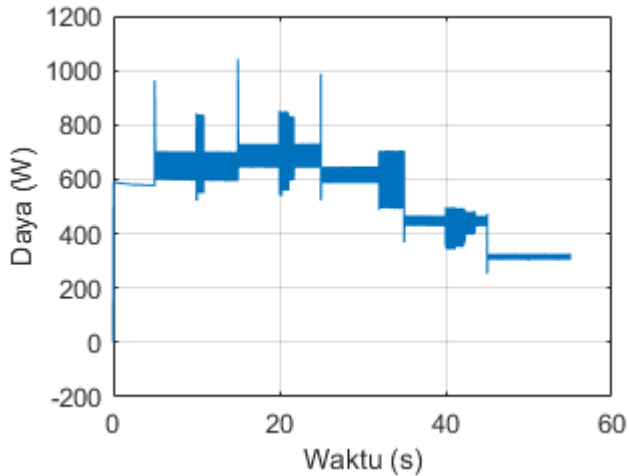
Gambar 5 karakteristik daya pada kecepatan angin 5 m/s



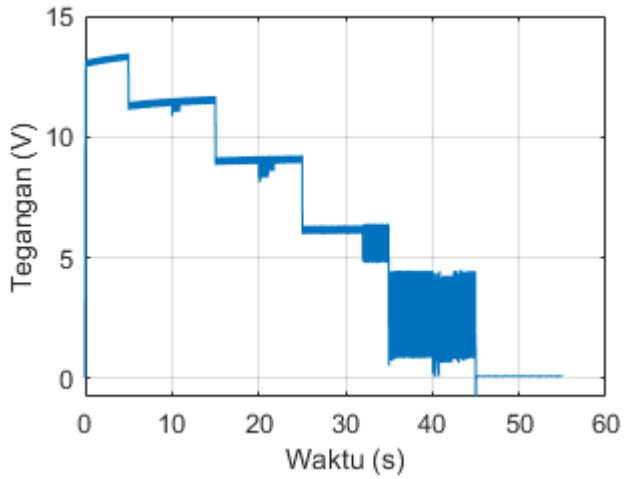
Gambar 6 karakteristik daya pada kecepatan angin 7,5 m/s



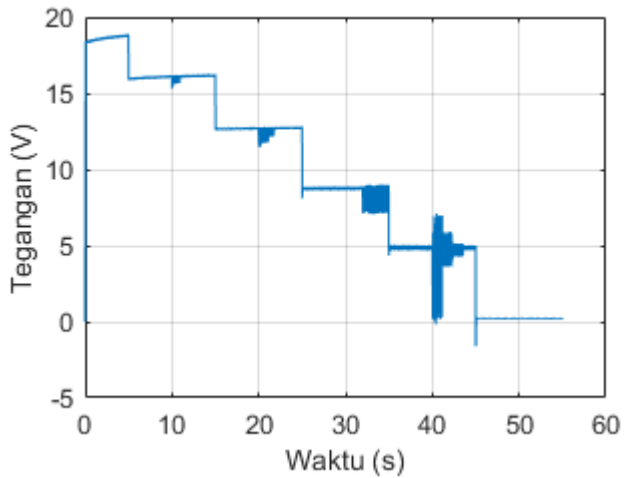
Gambar 7 karakteristik daya pada kecepatan angin 10 m/s



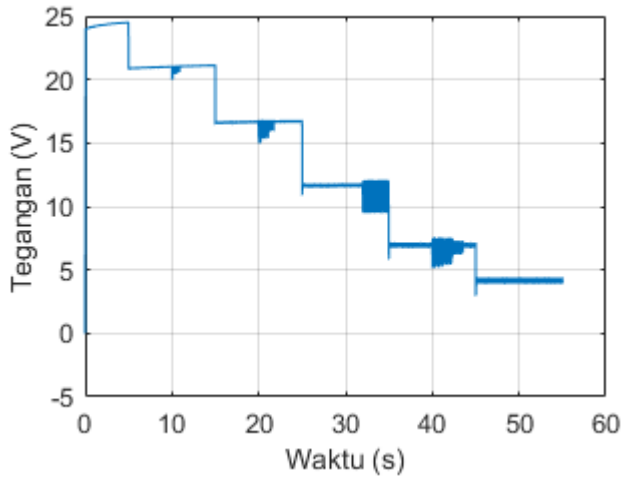
Gambar 8 karakteristik daya pada kecepatan angin 12,5 m/s



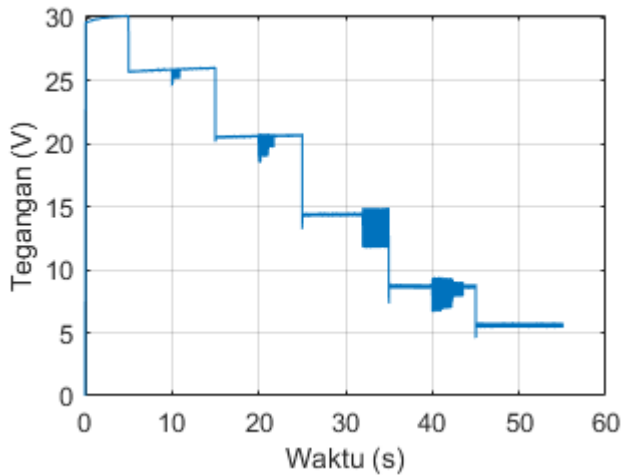
Gambar 9 karakteristik tegangan pada kecepatan angin 5m/s



Gambar 10 karakteristik tegangan pada kecepatan angin 7,5m/s

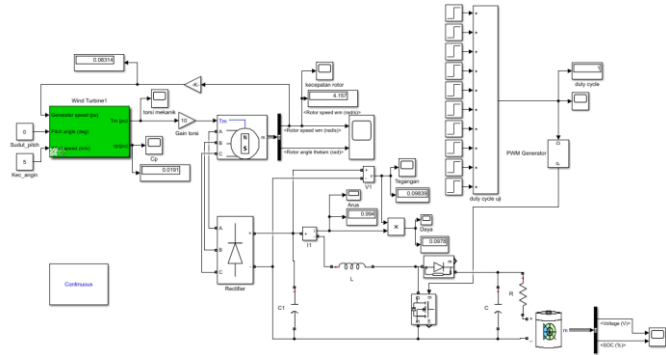


Gambar 11 karakteristik tegangan pada kecepatan angin 10m/s

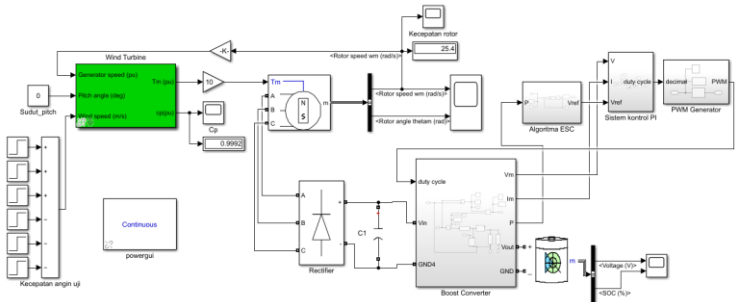


Gambar 12 karakteristik tegangan pada kecepatan angin 12,5m/s

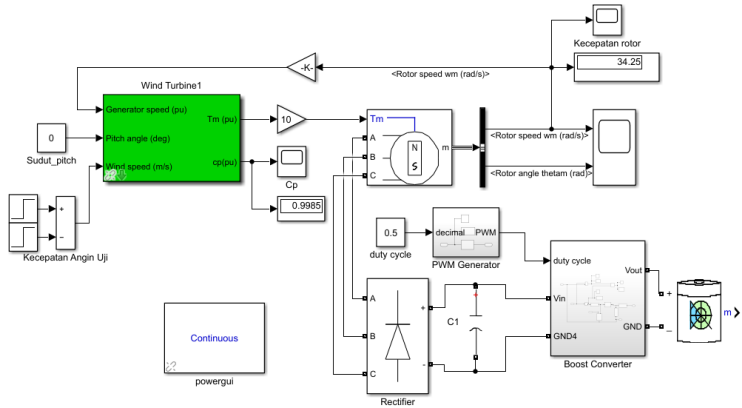
## LAMPIRAN 2 RANGKAIAN PADA SIMULINK MATLAB



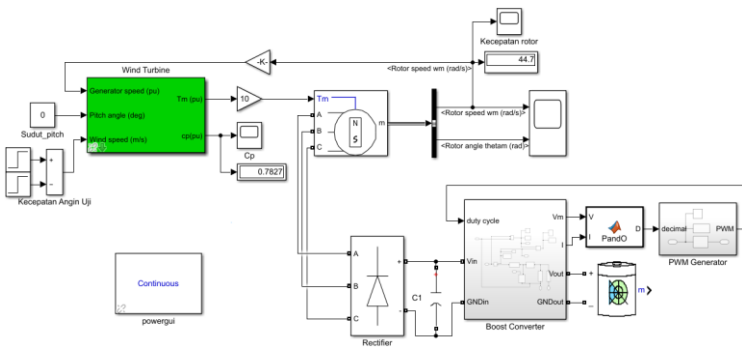
Gambar 13 Rangkaian uji karakteristik sistem turbin angin pada software Simulink



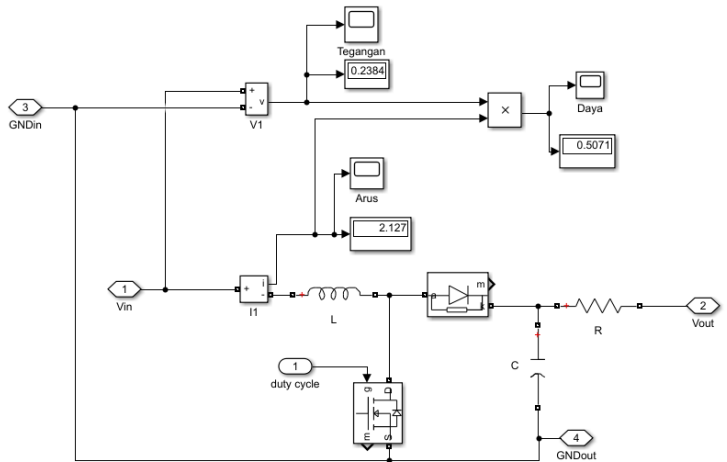
Gambar 14 Rangkaian sistem turbin angin dengan algoritma *extremum seeking* pada software Simulink



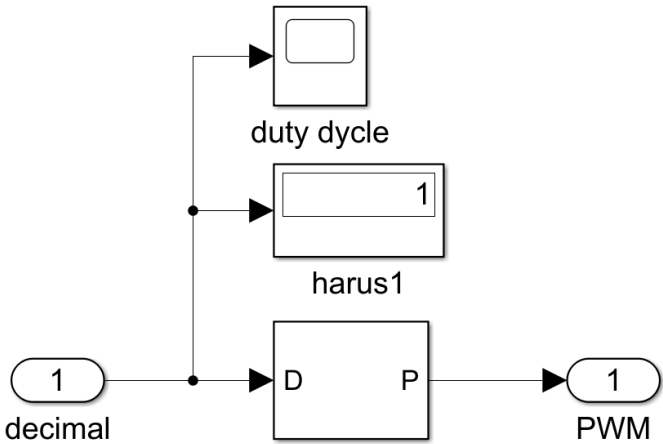
Gambar 15 Rangkaian sistem turbin angin tanpa kontroler pada software Simulink



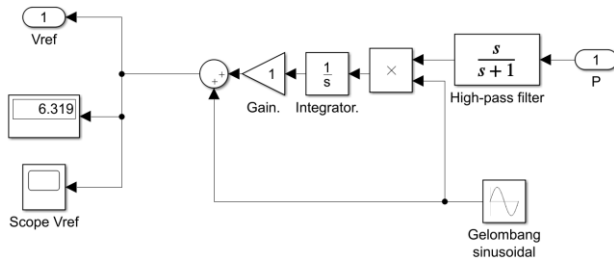
Gambar 16 Rangkaian sistem turbin angin dengan algoritma *perturbation and observation* (P&O) pada software Simulink



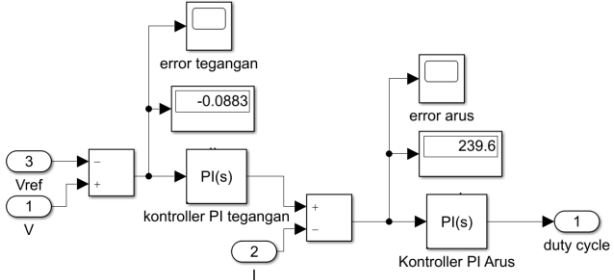
Gambar 17 rangkaian pada subsistem *boost converter*



Gambar 18 rangkaian pada subsistem PWM generator



Gambar 19 rangkaian pada subsistem algoritma ESC



Gambar 20 rangkaian pada subsistem kontrol PI



### LAMPIRAN 3

## CODE FUNGSI PERTUBATION AND OBSERVATION (P&O) PADA SIMULINK

```
function D = PandO(V, I)
% Parameter input:
Dinit = 0; %Keadaan awal untuk D output
Dmax = 1; %Nilai maksimal untuk D
Dmin = 0; %Nilai minimal untuk D
deltaD = 0.001; %nilai yang digunakan untuk
menaikan/menurunkan duty cycle D
persistent Vold Pold Dold;
dataType = 'double';
if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;
if dP ~= 0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    else if dV < 0
        D = Dold + deltaD;
    else
        D = Dold - deltaD;
    end
end
else
    D=Dold;
end
if D >= Dmax || D<= Dmin
    D=Dold;
end
Dold=D; Vold=V; Pold=P;
```

“Halaman ini memang dikosongkan”

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama Nusantara Jaya Sakti dilahirkan di Lumajang, 14 Mei 1996. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN Kaliboto Lor 01 pada tahun 2008, SMPN 1 Jatiroto pada tahun 2011, SMAN 2 Lumajang pada tahun 2014, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTIRS di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang. Penulis memiliki pengalaman program *internship* selama satu bulan di PT. Lentera Bumi Nusantara, Ciheras.

Pada bulan Januari 2020 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Ekstraksi Daya Maksimum dengan *Sensorless Supervisory Control* Berbasis Algoritma *Extremum Seeking* pada Turbin Angin**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi melalui *email*: nusantarajayasakti@gmail.com