



TUGAS AKHIR – TF 141581

**IMPLEMENTASI *SUPERVISORY*
CONTROL UNTUK PENGENDALIAN
KECEPATAN TURBIN ANGIN
MENGUNAKAN METODE *DIRECT*
TORQUE CONTROL BERBASIS *BOOST*
*CONVERTER***

RONI HARIANTO
NRP. 02311440000017

Dosen Pembimbing :
Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

“Halaman ini memang dikosongkan”



FINAL PROJECT – TF 141581

***IMPLEMENTATION OF SUPERVISORY
CONTROL FOR CONTROLLING WIND
TURBINE SPEED USING DIRECT TORQUE
CONTROL METHOD BASED BOOST
CONVERTER***

Roni Harianto
NRP. 02311440000017

Supervisor :
Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.

ENGINEERING PHYSICS DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

“Halaman ini memang dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Roni Harianto
NRP : 02311440000017
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
PerguruanTinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Implementasi *Supervisory Control* untuk Pengendalian Kecepatan Turbin Angin Menggunakan Metode *Direct Torque Control* Berbasis *Boost Converter*” 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, 25 Juli 2018

Yang membuat
pernyataan,



Roni Harianto
NRP.02311440000017

“Halaman ini memang dikosongkan”

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**IMPLEMENTASI *SUPERVISORY CONTROL* UNTUK
PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN ANGIN
MENGUNAKAN METODE *DIRECT TORQUE CONTROL*
BERBASIS *BOOST CONVERTER***

Oleh:
Roni Harianto
NRP.0231144000017

Surabaya, 25 Juli 2018

Menyetujui,
Dosen Pembimbing



Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
NIPN.197605232000122001

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN.197809022003121002

“Halaman ini memang dikosongkan”

**IMPLEMENTASI *SUPERVISORY CONTROL* UNTUK
PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN ANGIN
MENGUNAKAN METODE *DIRECT TORQUE CONTROL*
BERBASIS *BOOST CONVERTER***





TUGASAKHIR

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

Oleh:

RONI HARIANTO
NRP.0231144000017

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. (Pembimbing)
2. Ir. Yaumar, M.T. (Penguji I)
3. Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T.,M.T. (Penguji II)
4. Dr.rer.nat. Ir. Aulia M T Nasution, M.Sc. (Penguji III)

SURABAYA
JULI, 2018

“Halaman ini memang dikosongkan”

**IMPLEMENTASI *SUPERVISORY CONTROL* UNTUK
PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN ANGIN
MENGUNAKAN METODE *DIRECT TORQUE CONTROL*
BERBASIS *BOOST CONVERTER***

Nama : Roni Harianto
NRP : 0231144000017
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

Abstrak

Kinerja sistem turbin angin dipengaruhi oleh sifat stokastik angin yang menyebabkan ketidakpastian dalam penangkapan energi, sehingga dapat menyebabkan besar produksi daya berubah-ubah. Penelitian ini membahas tentang bagaimana cara memaksimalkan produksi daya yang dihasilkan oleh sistem turbin angin. Daya angin dapat dimaksimalkan terutama pada saat kecepatan angin di bawah kecepatan angin rata-rata pada sudut pitch tertentu dengan metode *Direct Torque Control (DTC)*, sehingga dibutuhkan suatu konverter. Daya maksimum diekstrak dari angin saat kecepatan rotor optimum dimana arus generator (yang mempengaruhi torsi generator) digunakan sebagai variabel manipulasi dengan menggunakan *boost* konverter. Keluaran dari generator turbin angin akan dimaksimalkan menggunakan skema kontrol *supervisory control*, sehingga rotor dapat berputar pada kecepatan optimal untuk memaksimalkan ekstraksi daya. Sistem pengendalian tersebut tersusun atas *supervisory level* yang menggunakan algoritma *extremum seeking* sebagai *setpoint adjustment*, dan dua buah kontroler PI yang tersusun *cascade* untuk mengendalikan respon arus dan kecepatan rotor dengan nilai K_p arus sebesar 2, K_i arus sebesar 0,22, K_p kecepatan rotor sebesar 3, dan K_i kecepatan rotor sebesar 80. Sistem turbin angin diuji menggunakan *supervisory control*, kontroler MPPT, dan tanpa kontroler pada kecepatan angin 4 m/s sampai 9 m/s. Parameter untuk perancangan *boost* konverter yaitu R_L sebesar 1Ω , f sebesar 20KHz, V_S sebesar 15,8 V, D sebesar 0,5, L sebesar 1000×10^{-6} H, dan C sebesar 1000×10^{-6} F. Hasil simulasi

menunjukkan bahwa *supervisory level* menghasilkan kecepatan generator optimum sebagai setpoint berdasarkan karakteristik turbin angin. yang dapat diketahui melalui nilai koefisien daya (C_p) yang mampu dipertahankan pada nilai 0,5 (koefisien daya maksimal). Hal ini menunjukkan bahwa *supervisory control* dapat mempertahankan operasi sistem turbin angin dengan memaksimalkan nilai C_p sehingga dapat menghasilkan daya keluaran jauh lebih besar (853,4 watt) dibandingkan kontroler MPPT (135,1 watt). Kontroler PI yang tersusun *cascade* mampu menangani perilaku nonlinier turbin angin sehingga didapatkan respon yang baik, yaitu menghasilkan error mendekati nol (0,01709).

Kata Kunci : *Supervisory control, extremum seeking, MPPT, turbin angin, boost converter*

**IMPLEMENTATION OF SUPERVISORY CONTROL FOR
CONTROLLING WIND TURBINE SPEED USING DIRECT
TORQUE CONTROL METHOD BASED BOOST
CONVERTER**

Name : **Roni Harianto**
NRP : **0231144000017**
Department : **Teknik Fisika FTI-ITS**
Supervisor : **Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.**

Abstract

The performance of the wind turbine system is influenced by the stochastic nature of the wind that causing uncertainty in the capture of energy, thus causing the amount power production is changeable. This research discusses how to maximize the power production of the wind turbine system. Wind power can be maximized especially when the wind speed is below the average wind speed at a certain pitch angle by using the Direct Torque Control (DTC) method so a converter circuit is needed. The maximum energy is extracted from the wind at the optimum rotor speed where the generator current (which affects the generator torque) is considered as a manipulated variable by using a boost converter. The wind turbine generator (WTG) output will be maximized using the supervisory control scheme in which the rotor can rotate at the optimum speed in order to maximize power extraction. The control system is composed of a supervisory level using the extremum seeking algorithm as a setpoint adjustment, and two PI controllers arranged cascade to regulate the current response and the rotor speed with K_p current value of 2, current K_i of 0.22, K_p rotor speed of 3, and K_i rotor speed of 80. The wind turbine system is tested using a supervisory control, MPPT controller, and without a controller at wind speeds of 4 m/s to 9 m/s. Boost converter is designed with R_L of 1 Ω , f of 20KHz, V_S of 15.8 V, D of 0.5, L of 1000×10^{-6} H, and C of 1000×10^{-6} F. The simulation results show that the supervisory level produces an optimum generator speed as setpoint according to the

characteristics of the wind turbine, where it is shown by the resulting C_p value close to 0.5 (maximum value). This indicates that the supervisory control maintains the operation of the wind turbine system by maximizing the C_p value, so it can produce output power which much greater (853.4 watt) than the MPPT controller (135.1 watt). The cascade structured PI controller is able to handle the nonlinear behavior of the wind turbine, so that resulting in a favorable response, that is, it generates an error close to zero (0.01709).

Keywords : *Supervisory control, extremum seeking, MPPT, wind turbine, boost converter*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **“IMPLEMENTASI *SUPERVISORY CONTROL* UNTUK PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN ANGIN MENGGUNAKAN METODE *DIRECT TORQUE CONTROL* BERBASIS *BOOST CONVERTER*”**.

Penulisan telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing dan dosen wali yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, nasihat, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Instrumensi yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
4. Bapak Ir. Tutug Dhanardono, M.T. selaku dosen wali sebelum beliau pensiun yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.
5. Kedua orang tua (Bapak Sutrisno dan Ibu Kaswati). Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
6. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.

7. Rafika Hasbia Sari yang telah memberikan pencerahan jalan hidup dan memotivasi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
8. Para senior (mas Khamim, mas Haris, dan mbak Citra) yang telah memberikan bimbingan dan bantuan dalam penyelesaian laporan tugas akhir ini.
9. Teman-teman seperjuangan wisuda ITS 118 (Fiqih, Rezqy, dan Hija) yang telah memotivasi dan memberikan bantuan-bantuan dalam penyelesaian laporan tugas akhir ini.
10. Seluruh teman – teman Departemen Teknik Fisika angkatan 2014, terima kasih untuk semuanya.
11. Rekan-rekan dari Laboratorium Fisika Rekayasa Teknik Fisika – ITS.
12. Teman-teman Paduan Suara Mahasiswa ITS yang telah memberikan semangat lebih dalam menuntut ilmu dan menyelesaikan tugas akhir.
13. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih 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, 25 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN I	vii
LEMBAR PENGESAHAN II.....	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan	3
1.4. Batasan Masalah	4
BAB II.....	5
TEORI PENUNJANG.....	5
2.1. Turbin Angin.....	5
2.2. <i>Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG)</i>	15
2.3. Penyearah	17
2.4. <i>Boost Converter</i>	20
2.5. <i>Maximum Power Point Tracker (MPPT)</i>	24
2.6. <i>Supervisory Control</i>	25
2.7. <i>Algoritma Extremum Seeking</i>	29
2.8. Sistem Satuan Per Unit	31
BAB III.....	35
METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1. Prosedur Umum Penelitian	35
3.2. Studi Karakteristik Turbin Angin.....	39

3.3	Pembuatan Model Turbin Angin.....	39
3.4	Rectifier.....	43
3.5	Perancangan <i>Boost Converter</i>	43
3.6	Perancangan Supervisory Control.....	45
3.7	Perancangan MPPT.....	48
BAB IV.....		51
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		51
4.1	Analisis Sensitivitas Sistem <i>Open Loop</i>	51
4.2	Perbandingan Sistem Turbin Angin <i>Supervisory Control</i> dengan Tanpa Pengendalian	54
4.3	Komparasi Performansi Sistem <i>Supervisory Control</i> dengan Kontroler MPPT	55
4.4	Uji Performansi Kecepatan Rotor pada <i>Supervisory Control</i> dan Kontroler MPPT.....	60
4.5	Implementasi <i>Supervisory Control</i> dan Kontroler MPPT menggunakan Data Kecepatan Angin Harian Wilayah Jawa Timur	64
BAB V		69
PENUTUP		69
DAFTAR PUSTAKA.....		71
LAMPIRAN A		77
LAMPIRAN B.....		77
LAMPIRAN C.....		81
LAMPIRAN D		85
BIODATA PENULIS.....		89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram blok turbin angin	5
Gambar 2.2	Komponen turbin angin	9
Gambar 2.3	Hubungan antara kecepatan angin, kecepatan rotor turbin dan daya turbin angin.....	12
Gambar 2.4	Hubungan antara koefisien daya, λ dan derajat <i>pitch</i>	13
Gambar 2.5	Hubungan antara kecepatan rotor (P_u), kecepatan angin (m/s) dan daya output turbin angin pada sudut <i>pitch</i> 0 derajat	15
Gambar 2.6	Rangkaian ekivalen PMSG	16
Gambar 2.7	Penyearah Jembatan Gelombang Penuh 3 Fasa	18
Gambar 2.8	Bentuk Gelombang Penyearah Penuh 3 Fasa...	19
Gambar 2.9	Rangkaian DC chopper tipe boost	20
Gambar 2.10	Skema rangkaian <i>boost converter</i> dan keluaran <i>boost convert</i>	21
Gambar 2.11	Mosfet boost converter on	22
Gambar 2.12	Mosfet boost converter off.....	23
Gambar 2.13	Gelombang keluaran DC Chopper tipe boost	23
Gambar 2.14	Karakteristik daya output dan torsi turbin angin dengan MPPT.....	25
Gambar 2.15	Struktur <i>supervisory control</i> pada proses produksi.....	26
Gambar 2.16	Proses pembangkitan set point.....	27
Gambar 2.17	Konsep umum extremum seeking	30
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	36
Gambar 3.2	Susunan sistem turbin angin	39
Gambar 3.3	Rangkaian rectifier.....	43
Gambar 3.4	Rangkaian boost converter.....	44
Gambar 3.5	Diagram blok sistem supervisory control	46

Gambar 3.6	Konsep <i>supervisory level</i> menggunakan <i>extremum seeking</i>	46
Gambar 3.7	<i>Flowchart</i> metode <i>Perturb and Observe</i>	49
Gambar 4.1	Grafik pengaruh kecepatan angin terhadap daya keluaran sistem turbin angin	52
Gambar 4.2	Grafik hubungan kecepatan angin dengan kecepatan rotor turbin	54
Gambar 4.3	Perbandingan daya listrik sistem turbin angin menggunakan <i>supervisory control</i> dan tanpa pengendalian	55
Gambar 4.4	Komparasi daya keluaran dari <i>supervisory control</i> dan pengendalian MPPT pada kecepatan angin naik dari 5 m/s ke 9 m/s	57
Gambar 4.5	Komparasi kecepatan rotor dari <i>supervisory control</i> dan pengendalian MPPT pada kecepatan angin naik dari 5 m/s ke 9 m/s	58
Gambar 4.6	Komparasi kecepatan rotor dari <i>supervisory control</i> dan pengendalian MPPT pada kecepatan angin turun dari 9 m/s ke 5 m/s.....	59
Gambar 4.7	Komparasi koefisien daya dari <i>supervisory control</i> dan pengendalian MPPT pada kecepatan angin naik dari 5 m/s ke 9 m/s	60
Gambar 4.8	Tracking setpoint oleh <i>supervisory control</i> pada kecepatan angin naik dari 5 m/s ke 9 m/s	62
Gambar 4.9	Tracking setpoint oleh <i>supervisory control</i> pada kecepatan angin turun dari 9 m/s ke 5 m/s.....	63
Gambar 4.10	Performansi kontroler MPPT pada kecepatan angin naik dari 5 m/s ke 9 m/s.....	63
Gambar 4.11	Performansi kontroler MPPT pada kecepatan angin turun dari 9 m/s ke 5 m/s.....	64
Gambar 4.12	Tracking setpoint oleh <i>supervisory control</i> pada data kecepatan angin harian wilayah Jawa Timur	65

- Gambar 4.13** Kecepatan rotor oleh kontroler MPPT pada data kecepatan angin harian wilayah Jawa Timur 65
- Gambar 4.14** Daya keluaran oleh *supervisory control* pada data kecepatan angin harian wilayah Jawa Timur 66
- Gambar 4.15** Daya keluaran oleh kontroler MPPT pada data kecepatan angin harian wilayah Jawa Timur 67

“Halaman ini memang dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Turbin Angin.....	39
Tabel 3.2 Definisi dan Nilai Berbagai Parameter Pada Simulasi	41
Tabel 3.3 Parameter Turbin Angin	41
Tabel 3.4 Jenis Rotor PMSG	42
Tabel 3.5 Parameter PMSG	42
Tabel 3.6 Parameter Penyearah	43
Tabel 3.7 Variabel Boost Converter	45
Tabel 4.1 Uji Sensitivitas Sistem <i>Open Loop</i>	51
Tabel 4.2 Pengaruh Laju Angin Terhadap Laju Rotor dan Daya Keluaran dengan Beban Resistansi 5 Ω pada Supervisory Control	53
Tabel 4.3 Komparasi Performansi Supervisory Control dengan Pengendalian MPPT.....	56
Tabel 4.4 Performansi <i>Tracking</i> Kecepatan Rotor pada <i>Supervisory Control</i>	61

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Krisis energi secara global telah terjadi dalam beberapa dekade terakhir ini, sehingga mendorong para peneliti untuk melakukan pengembangan energi terbarukan. Energi angin adalah salah satu alternatif energi terbarukan terbaik untuk menggantikan energi fosil. Mengenai bagaimana cara mengambil energi angin dan memasukkannya ke jaringan listrik secara efisien, stabil, dan dapat diandalkan telah menjadi salah satu isu utama yang perlu ditangani di antara komunitas sistem tenaga karena energi angin memiliki karakteristik stokastik (Liu, dkk, 2018). Pemanfaatan energi angin dapat dilakukan di berbagai macam tempat, baik di dataran tinggi maupun daerah yang landai, bahkan dapat diterapkan di laut. Pemanfaatan energi angin di Indonesia masih jarang dijumpai, kemungkinan penyebabnya adalah teknologi atau pengetahuan yang belum populer, arah angin di Indonesia cenderung berubah-ubah, serta kecepatan angin yang berfluktuasi dan kurang ekonomis. Daerah yang memiliki potensi energi angin yang tinggi perlu diidentifikasi supaya pemanfaatan energi angin ini lebih kompetitif dibandingkan dengan energi alternatif lainnya (Marnoto, 2010).

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 (Marnoto, 2010). Kinerja turbin angin secara signifikan dipengaruhi oleh sifat stokastik angin yang menyebabkan ketidakpastian dalam penangkapan energi dan beban struktural, sehingga dapat menyebabkan besar produksi daya berubah-ubah. Oleh karena itu penelitian terbaru tentang kontrol

turbin angin ini diutamakan berfokus pada maksimalisasi daya (Yuan & Tang, 2017, Kusiak & Zheng, 2010).

Proses ekstraksi daya maksimum dari angin yang berfluktuasi memerlukan turbin angin dengan variabel kecepatan / VSWT (*Variable Speed Wind Turbine*) dalam pengoperasian generatornya, sehingga membutuhkan suatu pengontrolan yang handal. Kecepatan angin yang fluktuatif menyebabkan perbedaan nilai kecepatan rotor sehingga dapat mempengaruhi nilai koefisien daya output. Kesesuaian kecepatan rotor dengan desain turbin angin diperlukan untuk meningkatkan nilai koefisien daya output. Daya angin dapat dimaksimalkan terutama pada saat kecepatan angin di bawah kecepatan angin rata-rata pada sudut pitch tertentu dengan metode *Direct Torque Control* (DTC) (Kusiak & Zheng, 2010, Armaditya, dkk, 2012, Pratap, dkk, 2017). Kontroler yang akan digunakan untuk pengontrolan dalam penelitian ini bekerja dengan mengoptimalkan daya atau pelacakan torsi, karena dapat membantu untuk mencapai nilai optimal dengan pemanfaatan energi angin. VSWT beroperasi pada masing-masing kecepatan optimal dan standar. Energi maksimum diekstrak dari angin pada saat kecepatan rotor optimal dimana torsi generator digunakan sebagai variabel kontrol dalam kontrol torsi.

Keandalan dari sistem VSWT dapat ditingkatkan secara signifikan dengan menggunakan *Permanent Magnet Synchronous Generators* (PMSG), karena PMSG dapat eksitasi sendiri, sehingga memungkinkan turbin angin untuk dapat beroperasi pada faktor daya dan efisiensi yang tinggi (Armaditya, dkk, 2012). Terdapat pengontrolan dalam sistem turbin angin ini dengan meletakkan suatu konverter pada sisi generator sehingga keluaran dari turbin angin yang berskala kecil bisa menjadi maksimal dengan menggunakan PMSG. Performansi PMSG akan menjadi maksimal ketika dalam sistem VSWT menggunakan *supervisory control*. Namun, performansi PMSG akan kurang baik saat

menggunakan kontroler MPPT karena generator berputar dengan kecepatan yang sangat tinggi, sehingga tidak mampu mengekstraksi daya dengan baik (Armaditya, dkk, 2012).

Adanya karakteristik turbin angin yang non linier dan masukan sistem turbin angin (yaitu angin sebagai gaya penggerak) yang stokastik dan tak terkontrol yang dinyatakan dalam bentuk *effective wind speed* (EWS), maka digunakan algoritma *extremum seeking* (ES) yang merupakan algoritma dinamis yang tidak membutuhkan model matematis (Liu & Krstic, 2012). Algoritma ES tersebut digunakan untuk *mentracking* nilai kecepatan turbin sehingga akan didapatkan nilai daya yang optimal meskipun pada jangkauan kecepatan angin yang rendah. Pada penelitian ini ES merupakan bentuk *set point adjustment* untuk memperoleh set poin yang sesuai, yang dikenal sebagai mekanisme pengaturan setpoin pada *supervisory level*. Algoritma ES telah digunakan pada sistem turbin angin, sistem panel surya, sistem pengkondisian udara, dan sebagainya.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan permasalahannya adalah:

- a. Bagaimana menerapkan metode *supervisory control* untuk mengendalikan kecepatan generator turbin angin agar diperoleh daya listrik maksimum?
- b. Bagaimana performansi sistem turbin angin menggunakan *supervisory control* dibandingkan dengan menggunakan kontroler MPPT?

1.3. Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, maka tujuan dari tugas akhir ini adalah merancang sistem turbin angin berskala kecil yang dilengkapi *supervisory control* untuk mengendalikan

kecepatan generator turbin angin agar diperoleh daya listrik maksimum menggunakan *extremum seeking*.

1.4. Batasan Masalah

Dalam proses merancang simulasi sistem turbin angin berskala kecil dengan sistem kontrol cerdas berbasis *supervisory control*, perlu adanya batasan masalah untuk menghindari luasnya permasalahan yang muncul, diantaranya:

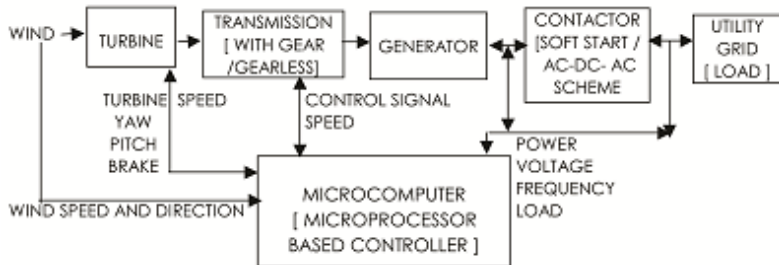
- a. Turbin angin yang dikontrol adalah jenis Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) dengan daya nominal 500 W.
- b. Profil angin yang digunakan adalah sesuai kondisi wilayah Jawa Timur yang memiliki range kecepatan angin 0-10 m/s.
- c. Variabel yang dikontrol adalah kecepatan rotor turbin angin dengan variabel manipulasi torsi generator.
- d. Turbin angin dapat bekerja dengan baik pada rentang kecepatan angin 4 m/s sampai 10 m/s.
- e. Keberhasilan *supervisory control* dalam mengekstraksi energi angin secara maksimal ditunjukkan oleh daya keluaran, yaitu daya pada output konverter yang dihubungkan dengan resistor 5Ω .

BAB II TEORI PENUNJANG

2.1. Turbin Angin

Turbin Angin adalah sistem konversi energi angin untuk menghasilkan energi listrik dengan proses perubahan energi angin menjadi putaran mekanis rotor dan selanjutnya menjadi energi listrik melalui sebuah generator. Sistem konversi energi angin ini merupakan suatu sistem/peralatan yang berfungsi untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik, mekanis, atau bentuk energi lainnya.

Turbin angin menghasilkan daya tergantung dari interaksi antara rotor dan angin. Angin sendiri merupakan kombinasi dari angin rata-rata dan fluktuasi trubulensi dari aliran angin tersebut. Pengalaman menunjukkan bahwa aspek utama dari kinerja turbin angin (berarti output daya dan beban rata-rata) ditentukan oleh gaya aerodinamik yang dihasilkan oleh angin rata-rata. Gaya periodik aerodinamis dapat disebabkan oleh angin geser, angin *off-axis*, dan rotasi rotor (Manwell, 2009). Berikut adalah blok diagram dari turbin angin :



Gambar 2.1 Diagram blok turbin angin (Manwell, 2009)

Turbin angin diklasifikasikan dalam dua tipe yaitu sumbu horizontal dan sumbu vertikal. Sumbu horizontal, memiliki *blade* atau kipas yang berputar sejajar dengan tanah, sedangkan pada

sumbu vertikal memiliki *blade* atau kipas yang berputar tegak lurus ke tanah, namun sangat sedikit turbin angin dengan sumbu vertikal yang tersedia secara komersial dibandingkan dengan sumbu horizontal (Darmawan & Bachtiar, 2014).

2.1.1. Komponen Turbin Angin

Di dalam turbin angin itu sendiri terdapat beberapa komponen seperti Gambar 2.2 Terdapat berbagai macam sub-sistem pada turbin angin yang dapat meningkatkan *safety* dan efisiensinya, antara lain yaitu:

a. *Gear Box*

Alat ini berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi. Biasanya *gearbox* yang digunakan sekitar 1:60.

b. *Brake System*

Digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah *gearbox* agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya. Generator ini akan menghasilkan energi listrik maksimal pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Kehadiran angin diluar diguaan akan menyebabkan putaran yang cukup cepat pada poros generator, sehingga jika tidak di atasi maka putaran ini dapat merusak generator.

c. *Generator*

Generator adalah salah satu komponen terpenting dalam pembuatan sistem turbin angin. Generator ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya dapat dipelajari dengan menggunakan teori medan elektromagnetik. Singkatnya, (mengacu pada salah satu cara kerja generator) poros pada generator dipasang dengan material ferromagnetik permanen. Setelah itu disekeliling

poros terdapat stator yang bentuk fisisnya adalah kumparan-kumparan kawat yang membentuk loop. Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks ini akan dihasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik untuk akhirnya digunakan oleh masyarakat. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC (*Alternating Current*) yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih sinusoidal.

d. Penyimpanan Energi

Keterbatasan ketersediaan akan energi angin (tidak sepanjang hari angin akan selalu tersedia) menyebabkan ketersediaan listrik tidak menentu. Oleh karena itu digunakan alat penyimpan energi yang berfungsi sebagai *back-up* energi listrik. Ketika beban penggunaan daya listrik masyarakat meningkat atau ketika kecepatan angin suatu daerah sedang menurun, maka kebutuhan permintaan akan daya listrik tidak dapat terpenuhi. Oleh karena itu kita perlu menyimpan sebagian energi yang dihasilkan ketika terjadi kelebihan daya pada saat turbin angin berputar kencang atau saat penggunaan daya pada masyarakat menurun. Penyimpanan energi ini diakomodasi dengan menggunakan alat penyimpan energi. Contoh sederhana yang dapat dijadikan referensi sebagai alat penyimpan energi listrik adalah aki mobil. Aki mobil memiliki kapasitas penyimpanan energi yang cukup besar. Aki 12 volt, 65 Ah dapat dipakai untuk mencatu rumah tangga (kurang lebih) selama 0.5 jam pada daya 780 watt.

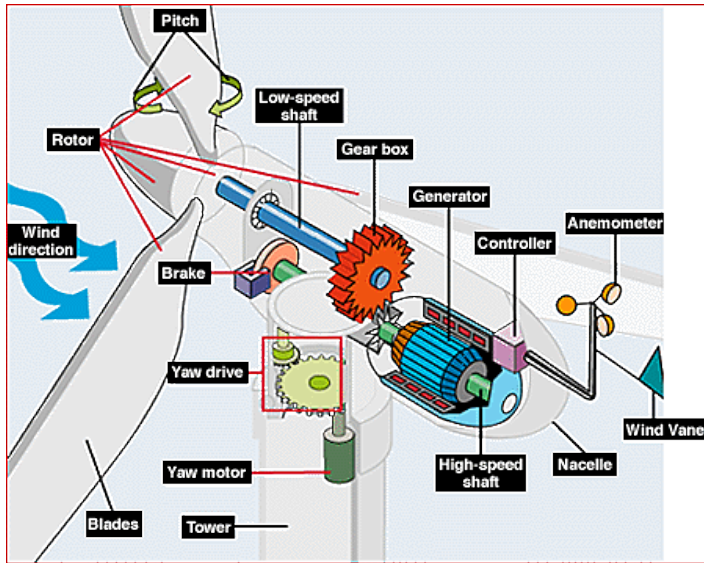
e. *Rectifier – Inverter*

Rectifier berarti penyearah. *Rectifier* dapat menyearahkan gelombang sinusoidal (AC) yang dihasilkan oleh generator

menjadi gelombang DC. *Inverter* berarti pembalik. Ketika dibutuhkan daya dari penyimpan energi (aki/lainnya) maka catu yang dihasilkan oleh aki akan berbentuk gelombang DC. Karena kebanyakan kebutuhan rumah tangga menggunakan catu daya AC, maka diperlukan *inverter* untuk mengubah gelombang DC yang dikeluarkan oleh aki menjadi gelombang AC, agar dapat digunakan oleh rumah tangga.

Bagian-bagian turbin angin serta penjelasannya berdasarkan pada Gambar 2.2 adalah sebagai berikut:

- a. Anemometer untuk mengukur kecepatan angin, dan mengirim data angin ini ke alat pengontrol.
- b. *Blades* (Bilah Kipas). Kebanyakan turbin angin mempunyai 2 atau 3 bilah kipas. Angin yang menghembus menyebabkan turbin tersebut berputar.
- c. *Brake* (Rem). Suatu rem cakram yang dapat digerakkan secara mekanis, dengan tenaga listrik atau hidrolik untuk menghentikan rotor atau saat keadaan darurat.
- d. *Controller* (Alat Pengontrol). Alat Pengontrol ini menstart turbin pada kecepatan angin kira-kira 12-25 km/jam, dan mematikannya pada kecepatan 90 km/jam. Turbin tidak beroperasi di atas 90 km/jam, karena angin terlalu kencang dapat merusakkannya.
- e. *Gear box* (Roda Gigi). Roda gigi menaikkan putaran dari 30-60 rpm menjadi kira-kira 1000-1800 rpm yaitu putaran yang biasanya disyaratkan untuk memutar generator listrik.



Gambar 2.2 Komponen turbin angin (Hanse & Larsen, 2005)

- f. Generator untuk membangkitkan listrik, biasanya disebut alternator arus bolak-balik.
- g. *High-speed shaft* (Poros Putaran Tinggi) untuk menggerakkan generator.
- h. *Low-speed shaft* (Poros Putaran Rendah) yaitu poros turbin yang berputar kira-kira 30-60 rpm.
- i. *Nacelle* (Rumah Mesin). Rumah mesin ini terletak di atas menara. Di dalamnya berisi *gear-box*, poros putaran tinggi/rendah, generator, alat pengontrol, dan alat pengereman.
- j. *Pitch* (Sudut Bilah Kipas): Bilah kipas bisa diatur sudutnya untuk mengatur kecepatan rotor yang dikehendaki, tergantung angin terlalu rendah atau terlalu kencang.
- k. Rotor yaitu bilah kipas bersama porosnya.

- l. *Tower* (Menara). Menara bisa dibuat dari pipa baja, beton, rangka besi. Karena kencangnya angin bertambah dengan ketinggian, maka makin tinggi menara makin besar tenaga yang didapat.
- m. *Wind direction* (Arah Angin)
- n. *Wind vane* (Tebeng Angin) untuk mengukur arah angin, berhubungan dengan penggerak arah agar arah turbin disesuaikan dengan arah angin.
- o. *Yaw drive* (Penggerak Arah) untuk memutar turbin ke arah angin. Untuk desain turbin yang mendapat hembusan angin dari belakang tak memerlukan alat ini.
- p. *Yaw motor* (Motor Penggerak Arah) yaitu motor listrik yang menggerakkan penggerak arah.

2.1.2 Prinsip Kerja Turbin Angin

Prinsip kerja dari turbin angin adalah turbin angin menangkap energi angin yang bergerak dengan kecepatan tertentu dan memanfaatkan energi kinetik dari angin tersebut. Baling-baling turbin dirancang sedemikian rupa sehingga memungkinkan untuk menggerakkan poros rotor generator. Kemudian rotor pada generator akan bergerak karena baling-baling memutar poros dari turbin, sehingga generator mengubah energi rotasi menjadi energi listrik (Liu & Krstic, 2012). Untuk menggerakkan turbin agar bisa berputar, maka harus terjadi kecepatan angin 3 m/s dan untuk menghasilkan listrik yang stabil sesuai kapasitas generatornya, diperlukan kecepatan angin rata-rata 6 m/s sampai dengan 10 m/s. Daerah yang cocok digunakan pembangkit ini adalah daerah pantai, pesisir dan pegunungan (Gunarto & Sarwono, 2016).

Dalam sistem konversi energi angin, energi mekanik turbin hanya dapat diperoleh dari energi kinetik yang tersimpan dalam aliran angin, berarti tanpa perubahan aliran masa udara, kecepatan angin di belakang turbin harus mengalami penurunan dan pada saat

yang bersamaan luas penampang yang dilewati angin harus lebih besar.

2.1.3 Model Dinamik

Pada dasarnya turbin angin menyerap daya dari angin ketika baling-baling dilalui oleh aliran udara. Aliran udara yang mengalir melalui permukaan baling-baling menyebabkan timbulnya gaya tangensial akibat adanya gaya angkat (F_{lift}) dan gaya dorong (F_{drag}) pada turbin angin. Arah dari gaya angkat (F_{lift}) yang dihasilkan tegak lurus (vertikal) terhadap arah angin, sementara gaya dorong (F_{drag}) mempunyai arah yang sama dengan arah angin. Derajat pitch merupakan sudut antara chord line (garis melintang badan baling-baling) dengan bidang putar baling, dan angle of attack α merupakan sudut antara chord line baling-baling dengan kecepatan relatif. Kecepatan angin relatif merupakan resultan antara kecepatan angin (V_w) yang masuk ke balingbaling dengan komponen kecepatan angin pada arah perputaran baling-baling (V_b).

Daya yang dihasilkan oleh turbin angin dipengaruhi oleh rapat jenis angin dan kecepatan angin (Ramirez & Lee, 2005), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$P_a = \dot{m} \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

$$m = \rho \cdot A \cdot v \quad (2.2)$$

Apabila persamaan (2.2) disubstitusikan pada persamaan (2.1), maka diperoleh:

$$P_a = \frac{1}{2g} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.3)$$

Berdasarkan hukum mekanika rotasi daya turbin angin diperoleh:

$$P = T \cdot \omega \quad (2.4)$$

Untuk daya yang bisa dikonversi oleh turbin angin dari energi yang terdapat di angina dirumuskan sebagai berikut:

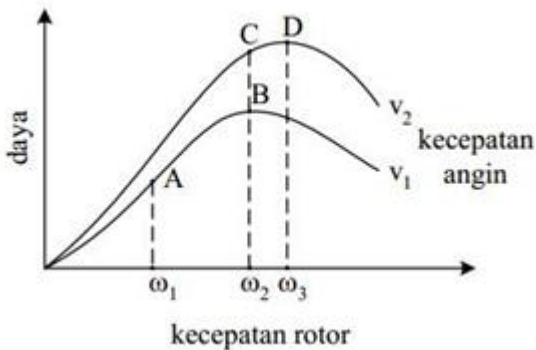
$$P_a = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.5)$$

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (2.6)$$

Jika derajat *pitch* konstan, maka C_p (*coefficient of power*) hanya bergantung pada nilai λ (*tip speed ratio / TSR*) yang didapat dari rumus berikut:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v_{in}} \quad (2.7)$$

Hubungan antara daya yang dikonversikan oleh turbin angin dengan kecepatan rotor turbin angin dan kecepatan angin ditunjukkan oleh kurva pada Gambar 2.3.

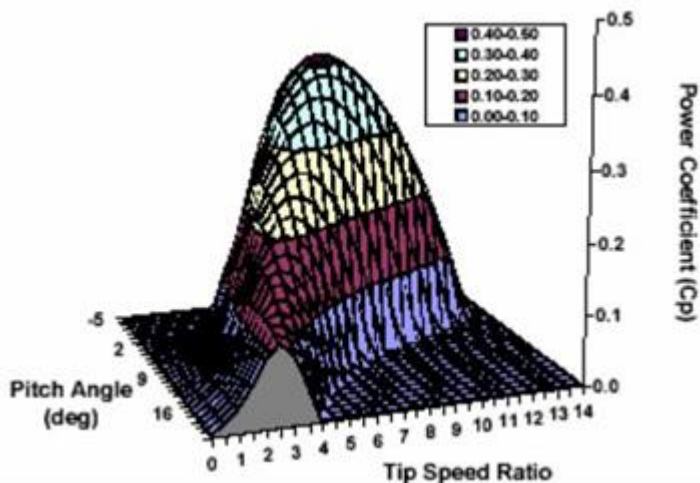


Gambar 2.3 Hubungan antara kecepatan angin, kecepatan rotor turbin angin dan daya turbin angin (Nurwati, 2010)

Dari Gambar 2.3 diketahui bahwa jika kecepatan angin v_1 dan turbin beroperasi pada A (untuk kecepatan rotor ω_1), daya maksimal yang bisa diperoleh pada saat kecepatan angin v_1 adalah pada titik kerja A. Sehingga agar daya yang dikonversi bisa maksimal, kecepatan rotor harus diubah menjadi ω_1 sehingga titik kerja turbin menjadi di titik B. Jika kemudian kecepatan angin

berubah menjadi v_2 , maka titik kerja turbin akan berpindah ke titik C. perpindahan titik kerja ini menyebabkan daya yang diperoleh menjadi tidak maksimal, daya akan maksimal dengan memindahkan titik kerja turbin angin dari titik C ke titik D dengan cara mengubah kecepatan rotor menjadi ω_2 . Hal ini menunjukkan bahwa untuk mendapatkan daya secara maksimal, kecepatan rotor harus berubah mengikuti perubahan dari kecepatan angin.

Karakteristik turbin angin seperti Gambar 2.4 memperlihatkan bahwa koefisien daya C_p bervariasi dengan λ dan derajat *pitch* yang berbeda, dimana TSR (λ) adalah perbandingan antara kecepatan baling-baling dengan kecepatan angin yang masuk ke baling-baling.



Gambar 2.4 Hubungan antara koefisien daya, λ dan derajat *pitch* (Nurwati, 2010)

Hal tersebut diasumsikan bahwa turbin dioperasikan pada nilai C_p yang tinggi pada setiap waktu. Dengan mengontrol variabel *pitch*, pada saat λ bernilai rendah maka *pitch* dapat diatur supaya C_p bernilai pada maksimal.

Torsi turbin angin dirumuskan sebagai berikut:

$$T_T = \frac{P}{\omega} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v_w^3 \quad (2.8)$$

Pada torsi mengandung koefisien torsi sebagai berikut:

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{\omega} = \frac{R}{\lambda \cdot v_w} \quad (2.10)$$

Dari persamaan-persamaan di atas diperoleh torsi turbin yaitu:

$$T_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p}{\lambda} \cdot \frac{R}{v_w} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_w^3 \quad (2.11)$$

$$T_T = \frac{1}{2} \cdot C_T \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_w^2 \quad (2.12)$$

Torsi yang bekerja pada rotor merupakan jumlah dari torsi sumber yang dihasilkan oleh turbin angin (T_T), dan torsi beban sebagai akibat dari pembebanan (T_L) yang dilakukan oleh generator dikurangi dengan rugi-rugi akibat gesekan yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\Sigma T = T_T - T_L - b \cdot \omega = J \cdot \alpha = J \cdot \dot{\omega} \quad (2.13)$$

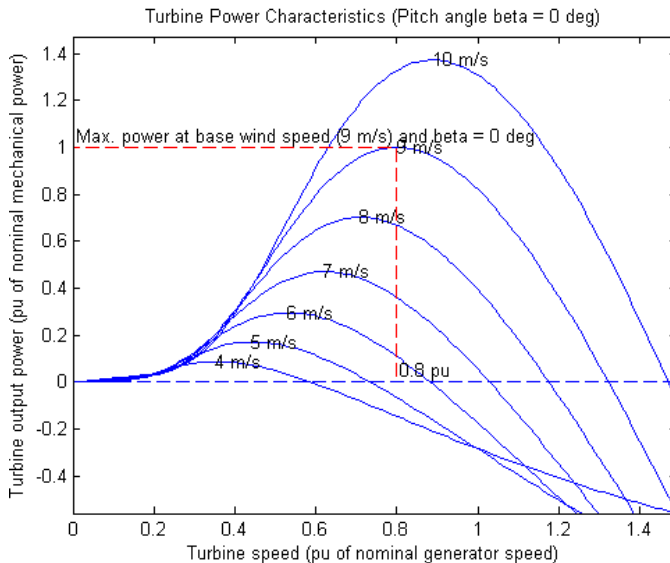
Persamaan di atas ditransformasikan dengan transformasi Laplace sehingga diperoleh sebagai berikut:

$$T_T - T_L - b \cdot \omega = J \cdot s \cdot \omega \quad (2.14)$$

dan diperoleh kecepatan rotor

$$\omega = \frac{\omega(s)}{T_T(s) - T_L(s)} = \frac{1}{Js + b} \quad (2.15)$$

Karakteristik turbin angin pada Gambar 2.5 menunjukkan hubungan antara kecepatan rotor (Pu), kecepatan angin (m/s) dan daya output turbin angin pada sudut pitch 0 derajat. Turbin angin beroperasi pada sudut *pitch* konstan 0 derajat dan dapat beroperasi dengan baik pada rentang kecepatan angin 4 m/s sampai 10 m/s, serta menghasilkan daya maksimum pada kecepatan angin 9 m/s dan kecepatan rotor 0,8 pu.



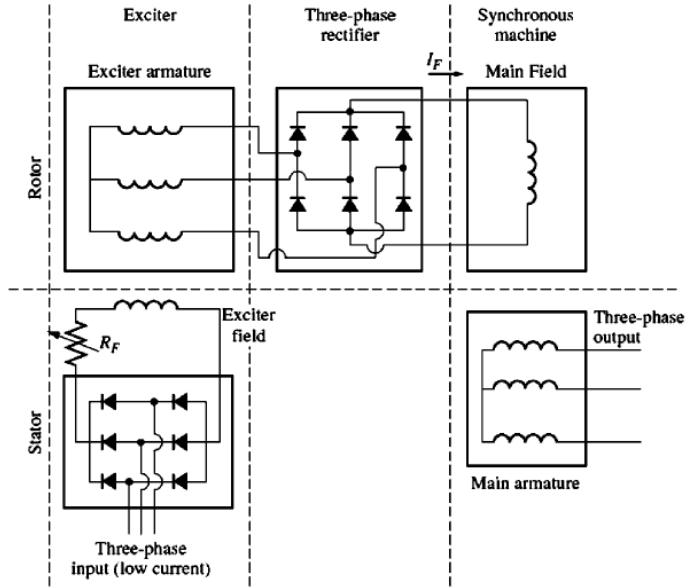
Gambar 2.5 Hubungan antara kecepatan rotor (Pu), kecepatan angin (m/s) dan daya output turbin angin pada sudut pitch konstan 0 derajat

2.2. Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG)

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) merupakan generator sinkron yang medan eksitasi dihasilkan oleh magnet permanen bukan kumparan sehingga fluks magnetik dihasilkan oleh medan magnet permanen. PMSG banyak digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti mesin elektrik, pompa, kipas, kontrol katup, hingga peralatan industri. Tetapi untuk saat ini, pengembangan *permanent magnet synchron generator* banyak diaplikasikan sebagai pembangkit energi listrik terbarukan (menggunakan tenaga alam) yang handal dan berbiaya rendah (Rukslin, 2015).

Pada PMSG, magnet permanen menghasilkan medan magnet rotor sehingga tidak memerlukan arus eksitasi DC. Dalam hal ini,

fluks medan tetap konstan dan supply untuk mengeksitasi kumparan medan tidak diperlukan, begitu pula dengan keberadaan *sliprings*.



Gambar 2.6 Rangkaian ekivalen PMSG (Chapman, 2005)

PMSG ini akan dikopel dengan turbin agar menghasilkan energi listrik. PMSG dapat dimodelkan dengan persamaan transformasi park. Persamaan didasarkan pada arus stator dan tegangan (Rukslin, 2015) seperti persamaan berikut:

$$v_{sd} = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_e \lambda_q \quad (2.16)$$

$$v_{sq} = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} - \omega_e \lambda_d \quad (2.17)$$

dimana,

v_{sd} dan v_{sq} = tegangan stator

i_d dan i_q = arus stator

R_s = resistansi belitan stator

Fluks pada stator dapat dituliskan seperti persamaan berikut:

$$\lambda_d = L_{sd}i_d + \lambda_m \quad (2.18)$$

$$\lambda_q = L_{sq}i_q \quad (2.19)$$

dimana,

λ_m = fluks magnetik inti

L_{sd} dan L_{sq} = induktansi belitan stator

Torsi elektrik dari PMSG dapat dituliskan seperti persamaan berikut:

$$T_e = \frac{3}{2}p[\lambda_m i_q - (L_{sq} - L_{sd})i_q i_d] \quad (2.20)$$

Dimana p adalah jumlah pasang kutub PMSG.

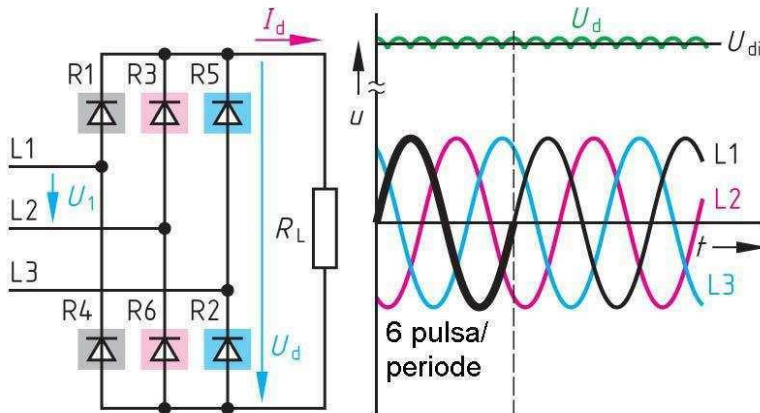
Penggunaan PMSG ini memiliki beberapa keuntungan, diantaranya (Armaditya, dkk, 2012):

- a. Torsi dan daya keluaran yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan eksitasi elektromagnetik.
- b. Menghasilkan respon dinamis yang lebih baik dibandingkan menggunakan eksitasi elektromagnetik.
- c. Tidak ada energi listrik yang diserap oleh sistem eksitasi medan, dengan demikian tidak akan ada rugi-rugi eksitasi, sehingga efisiensi akan meningkat.
- d. Rugi-rugi tembaga lebih kecil.

2.3. Penyearah

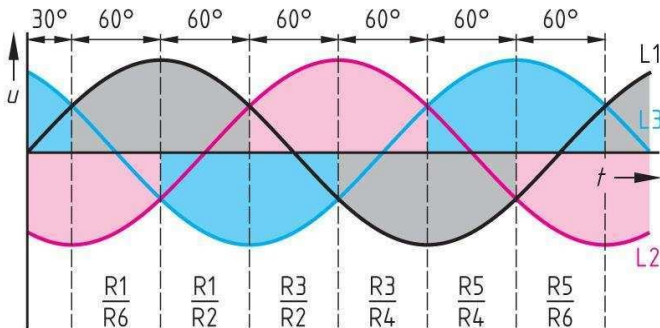
Rangkaian penyearah (*Rectifier*) adalah salah satu jenis rangkaian elektronika daya yang dapat mengubah tegangan bolak-balik (AC) menjadi tegangan searah (DC). Penyearah dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu penyearah setengah gelombang dan penyearah gelombang penuh, sedangkan untuk penyearah gelombang penuh dibedakan menjadi penyearah gelombang penuh dengan center tap (CT), dan penyearah gelombang penuh dengan menggunakan dioda bridge.

Listrik AC keluaran PMSG akan disearahkan oleh penyearah Diode gelombang penuh tiga fase menggunakan sistem jembatan dengan enam buah Diode R1, R3 dan R5 katodnya disatukan sebagai terminal positif. Diode R4, R6 dan R2 anodanya yang disatukan sebagai terminal negatif seperti pada Gambar 2.7. Tegangan DC yang dihasilkan memiliki enam pulsa yang dihasilkan oleh masing-masing Diode tersebut. Tegangan DC yang dihasilkan halus karena tegangan riak (ripple) dan lenih rata.



Gambar 2.7 Penyearah Jembatan Gelombang Penuh 3 Fasa (Zaini, 2016)

Urutan konduksi dari keenam Diode dapat dilihat dari siklus gelombang sinusoida, dimana konduksi secara bergantian. Konduksi dimulai dai Diode R1+R6 sepanjang sudut komutasi 60°. Berturut-turut disusul Diode R1+R2, lanjutnya Diode R3+R2, urutan keempat R3+R4, kelima R5+R4 dan terakhir R5+R6 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. Dalam satu siklus gelombang tiga fasa terjadi enam kali komutasi dari keenam Diode secara bergantian dan bersama-sama.



Gambar 2.8 Bentuk Gelombang Penyearah Penuh 3 Fasa (Zaini, 2016)

Persamaan (2.21) dan (2.22) adalah persamaan tegangan dan arus penyearah diode gelombang penuh.

$$U_{di} = 1.35 \cdot U_1 \quad (2.21)$$

Keterangan:

U_{di} = Tegangan searah ideal

U_d = Tegangan searah

U_l = Tegangan efektif

$$I_z = \frac{3}{I_d} \quad (2.22)$$

Keterangan:

I_z = Arus melewati diode

I_d = Arus searah

$$P_T = 1.1 \cdot P_d \quad (2.23)$$

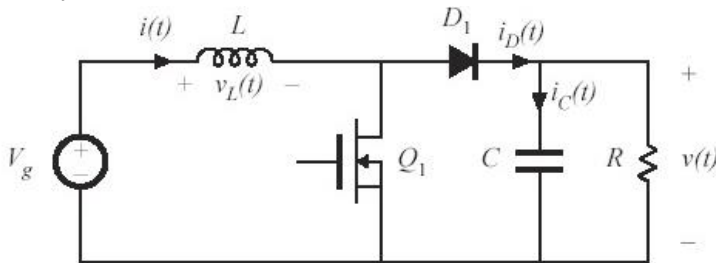
Keterangan:

P_T = Daya transformator

P_d = Daya arus searah

2.4. Boost Converter

Secara umum, konverter DC-DC berfungsi untuk mengkonversikan daya listrik searah (DC) ke bentuk daya listrik DC lainnya yang terkontrol arus, tegangan, atau dua-duanya. Ada lima rangkaian dasar dari konverter DC-DC non-isolasi, yaitu *buck*, *boost*, *buck-boost*, *cuk*, dan *sepic*. Pada tugas akhir ini menggunakan *boost converter* untuk mengkonversikan daya listriknya.

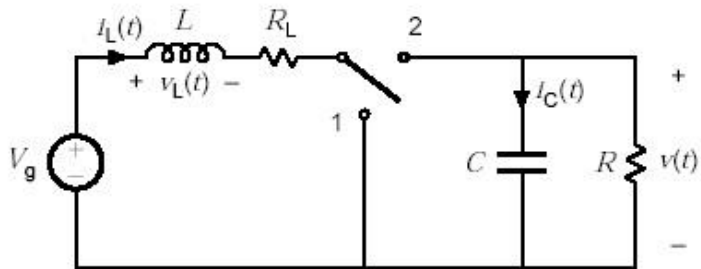


Gambar 2.9 Rangkaian DC chopper tipe boost (Zaini, 2016)

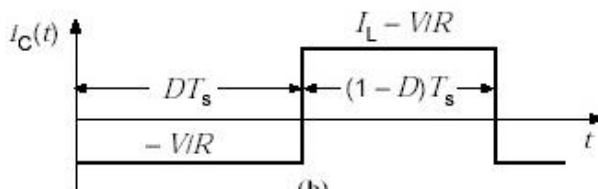
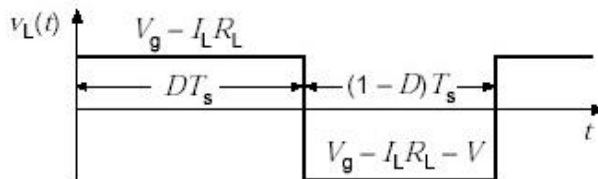
Boost Converter berfungsi untuk menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dibanding tegangan masukannya, atau biasa disebut dengan konverter penaik tegangan. Konverter ini banyak dimanfaatkan untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga surya dan turbin angin. Untuk mendapatkan tegangan yang lebih tinggi daripada masukannya, tipe Boost ini menggunakan komponen switching untuk mengatur duty cycle-nya. Komponen switching tersebut dapat berupa thyristor, MOSFET, IGBT, dan lain-lain (Zaini, 2016). Rangkaian DC Chopper tipe Boost akan ditunjukkan pada Gambar 2.9. dan Gambar 3.5

Komponen-komponen yang menyusun DC Chopper Tipe Boost (Boost Converter) adalah sumber masukan DC, MOSFET, Diode Freewheeling, Induktor, Kapasitor, Rangkaian Kontrol, serta Beban (R). MOSFET digunakan untuk mencacah arus sesuai dengan duty cycle sehingga keluaran DC chopper dapat sesuai dengan yang diinginkan. Rangkaian Kontrol digunakan untuk

mengendalikan MOSFET, sehingga MOSFET mengetahui kapan dia harus membuka dan kapan harus menutup aliran arus. Induktor digunakan untuk menyimpan energi dalam bentuk arus. Energi tersebut disimpan ketika kondisi MOSFET on dan dilepas ketika kondisi MOSFET off. Diode Freewheeling digunakan untuk mengalirkan arus yang dihasilkan induktor ketika MOSFET off dengan bias maju (Zaini, 2016).



(a)



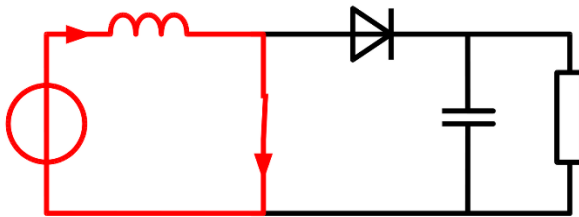
(b)

Gambar 2.10 (a) Skema rangkaian *boost converter* (Zaini, 2016)
(b) Keluaran *boost converter* (Zaini, 2016)

MOSFET yang digunakan pada rangkaian DC Chopper tipe Boost adalah bertindak sebagai saklar yang dapat membuka atau menutup rangkaian sehingga arus dapat dikendalikan sesuai duty cycle yang diinginkan. Skema secara umum dari DC Chopper Tipe Boost dapat terlihat pada Gambar 2.10.

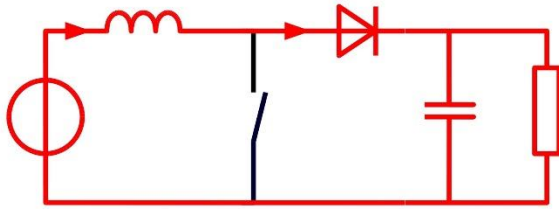
Kinerja dari DC Chopper tipe Boost dapat dibagi menjadi 2 kerja utama, yaitu :

- a. Ketika MOSFET on (tertutup) dan diode off, arus mengalir searah jarum jam dari sumber menuju ke induktor (terjadi pengisian arus pada induktor). Polaritas induktor pada sisi kiri lebih positif dibandingkan sisi kanannya. Gambar 2.11. menunjukkan ketika MOSFET dalam kondisi *on*.

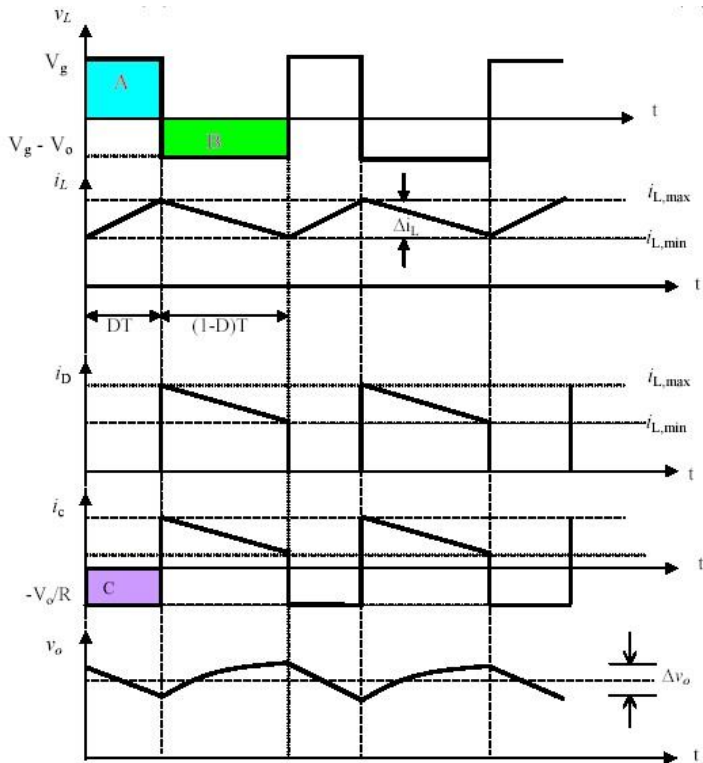


Gambar 2.11 Mosfet boost converter on (Zaini, 2016)

- b. Ketika MOSFET off (terbuka) dan diode on, arus yang disimpan di induktor akan berkurang karena impedansi yang lebih tinggi. Berkurangnya arus pada induktor menyebabkan induktor tersebut melawannya dengan membalik polaritasnya (lebih negatif pada posisi kiri). Sehingga, arus yang mengalir pada diode dan pada beban adalah penjumlahan antara arus pada sumber dan arus pada induktor (seri). Disaat yang bersamaan kapasitor juga akan melakukan penyimpanan energi dalam bentuk tegangan. Itulah sebabnya DC Chopper Tipe Boost memiliki keluaran yang lebih tinggi dibandingkan masukannya. Gambar 2.12 menunjukkan ketika MOSFET dalam kondisi *off*.



Gambar 2.12 Mosfet boost converter off (Zaini, 2016)



Gambar 2.13 Gelombang keluaran DC Chopper tipe boost (Zaini, 2016)

Dari rangkaian DC Chopper Tipe Boost pada Gambar 2.11 dan Gambar 2.12, didapatkan hasil gelombang keluaran seperti pada Gambar 2.13.

Dari Gambar 2.13 dapat dilihat bahwa arus pada beban (IL) akan naik secara linier ketika MOSFET dalam kondisi OFF dan turun secara linier pula ketika MOSFET dalam kondisi ON. Namun penurunan arus bebab (IL) tersebut tidak mencapai nol. Sehingga Gambar 2.13 dapat digolongkan menjadi DC Chopper Tipe Boost Mode Continous.

Dari Gambar 2.13 dapat diketahui bahwa semakin besar *duty cycle*, maka semakin besar pula tegangan keluaran yang dihasilkan DC Chopper Tipe Boost. Namun, tegangan keluaran tersebut selalu lebih besar atau sama dengan masukan DC Chopper. Semakin besarnya *duty cycle* dapat dilihat dari semakin besarnya area yang diwarnai biru muda pada Gambar 2.13 Hubungan antara tegangan masukan dan keluaran tipe Boost dapat digambarkan melalui persamaan berikut:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.24)$$

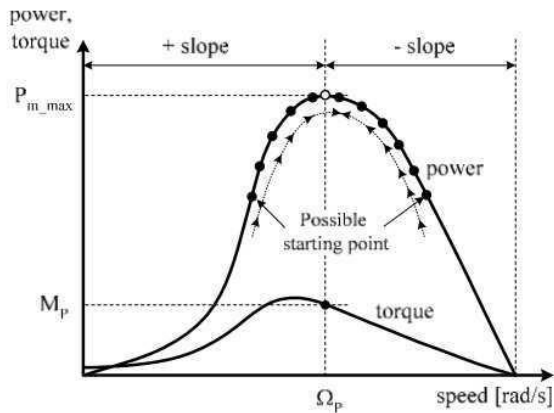
2.5. *Maximum Power Point Tracker (MPPT)*

Maximum Power Point Tracker (MPPT) adalah metode yang digunakan untuk daya keluaran sebagai pembangkit listrik. Pada pembangkit listrik tenaga angin, MPPT biasa digunakan untuk mengoptimalkan daya keluaran dari generator menggunakan converter daya elektronik.

MPPT dicapai dengan mengendalikan *duty cycle* dari dc-dc konverter. Ketika dc-dc converter dikendalikan, laju rotor juga dikendalikan untuk mendapatkan daya yang maksimum. Pada Gambar 2.14 akan menunjukkan karakteristik daya output dan torsi terhadap laju rotasi turbin (ω turbin).

Tujuan utama pengendalian MPPT agar sistem bisa bekerja pada daya maksimal (P_{m_max}) ketika laju angin berubah-ubah.

Berdasarkan gambar diatas, titik operasi bisa bekerja pada slope positif (terletak pada sisi kiri dari P_{m_max}), slope nol (terjadi ketika titik operasi berada pada P_{m_max}) dan slope negatif (terletak pada sisi kanan dari P_{m_max}) (Zaini, 2016).



Gambar 2. 14 Karakteristik daya output dan torsi turbin angin dengan MPPT (Zaini, 2016)

Jika titik operasi terletak pada daerah slope positif, kontroler harus memindahkan titik operasi ke slope negatif agar terletak pada sisi kiri dari P_{m_max} . Beberapa cara untuk mendapatkan MPPT di sistem turbin angin yaitu menggunakan lookup table berdasarkan parameter C_p . Daya mekanik dari turbin angin maksimal terjadi pada saat turbin berada pada titik C_p maksimum.

2.6. Supervisory Control

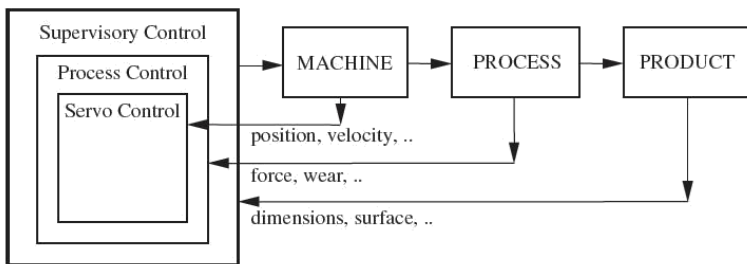
Istilah *supervisory control* digunakan untuk mendefinisikan sebuah sistem kontrol dengan supervisi yang mengacu pada peninjauan menyeluruh operasi, perencanaan, koordinasi dan eksekusi aksi yang memperbaiki performansi, ekonomis, dan kehandalan. Beberapa fungsi yang tergolong *supervisor control* adalah pemilihan strategi kontrol, penggabungan sensor,

pembangkitan sinyal referensi, monitoring kerusakan, deteksi gangguan, dan monitoring mesin (Wang & Gao, 2006). Gambar 2.15 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).

Strategi di level pengawasan ditujukan untuk mengkompensasi 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 kehandalan dan kualitas informasi. Seluruh informasi kemudian dapat digunakan untuk tujuan optimisasi proses.

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

- 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



Gambar 2.15 Struktur *supervisory control* pada proses produksi (Wang & Gao, 2006)

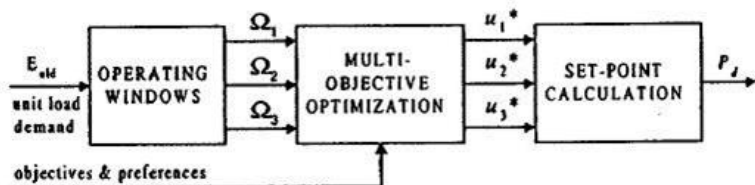
Aksi kontrol yang digunakan untuk melakukan tugas tersebut adalah:

- a. Komponen *switching on/off*, yaitu mengubah model operasi system
- b. Mengubah *set point* operasi dari beberapa komponen

Beberapa peneliti menggunakan *coordinated control* sebagai nama lain dari *supervisory control*, seperti pada (Ramirez & Lee, 2005). Mereka menerapkan teknik *supervisory control* dalam menentukan *set point* tekanan pada sistem pembangkit listrik tenaga fosil untuk tujuan optimisasi proses produksi. Problem utama yang dibahas adalah merancang pemetaan yang mentransformasikan profil permintaan beban dengan *trajectory set point* untuk loop kontrol tekanan uap. Proses perancangan meliputi tiga langkah:

- a. Penentuan daerah *feasibility* untuk variabel keputusan (*decision variable*)
- b. Solusi problem optimisasi untuk menemukan sinyal kontrol *steady-state* optimal
- c. Perhitungan *set point* tekanan melalui evaluasi langsung dari model *steady-state* unit.

Pemetaan tekanan daya pada makalah mereka dibangun sebagai studi kasus dimana fungsi obyektif bergantung hanya pada sinyal kontrol.



Gambar 2.16 Proses pembangkitan set point (Ramirez & Lee, 2005)

Perluasan terhadap fungsi obyektif meliputi variabel keadaan, atau sinyal sistem, akan mengikuti pendekatan yang sama.

a. Daerah *feasibility* sinyal kontrol

Daerah *feasibility* dari variabel decision u (sinyal kontrol) dapat ditentukan secara eksperimental atau diset secara manual untuk memenuhi konstrain operasional. Sekali daerah ini ditentukan, kerangka solusi diprogram sebagai look -up table yang menghasilkan daerah *feasible* sebagai fungsi dari nilai permintaan beban unit:

$$\Omega_i = f_i(W_{net}) \quad , i = 1, 2, \dots \quad (2.25)$$

b. Sinyal kontrol kondisi mantap optimal

Pada bagian ini, multiobjective optimization dipecahkan untuk menemukan sebuah vektor input *feasible* u yang meminimumkan fungsi obyektif $J(u)$ dengan preferensi \square . Fungsi obyektif dapat berisi eror load-tracking, thermal stress, laju panas, polusi, atau sembarang tujuan operasi lainnya yang ingin dioptimisasi.

Satu tujuan operasi dapat diwakili oleh lebih dari satu fungsi obyektif. Hasil dari tahap ini adalah sebuah vektor sinyal kontrol optimal, u^* , untuk setiap permintaan beban unit yang ditinjau.

c. Perhitungan *set point*

Setiap vektor sinyal kontrol optimal u^* digunakan untuk membangkitkan *set point* bagi supervisory controller. Hal ini dilakukan dengan menggunakan model kondisi mantap dari unit pembangkit:

$$P_d = M_{ss}(u^*) \quad (2.26)$$

dengan M_{ss} adalah model kondisi mantap unit pembangkit yang dipecahkan dengan u sebagai input dan variabel yang dikontrol

sebagai output. Model kondisi mantap diperoleh dengan menyamakan persamaan dinamik menjadi nol.

2.7 Algoritma *Extremum Seeking*

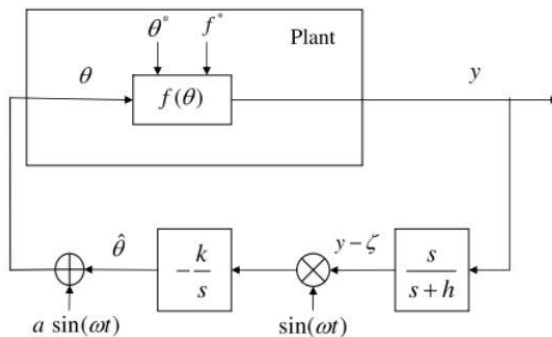
Extremum seeking (ES) adalah sebuah metode optimasi yang melakukan pendekatan secara real-time berbasis non-model yang hanya memiliki pengetahuan terbatas tentang sistem yang tersedia. ES bekerja dengan mengupdate nilai variabel yang ingin dioptimisasi secara real-time sehingga akan didapatkan nilai maksimum ataupun minimumnya. Sistem kerjanya mirip dengan MPPT (Maximum PowerPoint Tracking) (Ummah, 2018).

Adanya kompleksitas sistem rekayasa yang semakin meningkat, termasuk sistem umpan balik (feedback system), telah menyebabkan banyak tantangan teknik optimisasi. Hal ini terjadi ketika solusi analitik sebagai bentuk penyelesaian masalah optimasi untuk sistem multi-agen, nonlinier, dan dimensi tak terbatas sulit dilakukan. Kesulitan ini timbul karena berbagai alasan, termasuk adanya tujuan persaingan antar agen, sistem yang berdimensi tinggi, dan ketidakpastian sistem yang melekat. Selain itu, jika solusi berbasis model diperoleh untuk masalah optimasi yang rumit ini, kemungkinan konservatif karena kekurangan model. Oleh karena itu, metode pencarian ekstrem berbasis non-model merupakan pilihan menarik untuk mengatasi masalah tersebut.

Terdapat dua jenis algoritma extremum seeking yaitu deterministic extremum seeking dan stochastic extremum seeking. Kedua jenis algoritma tersebut melakukan optimisasi melalui pencarian selisih setpoin (pencarian ekstrem berbasis perturbasi). Dalam proses pencarian nilai ekstrem tersebut, terdapat unsur sinyal perturbasi utama yaitu sinyal eksitasi periodik (sinusoidal) yang digunakan untuk menyelidiki sifat nonlinieritas dari sistem dan memperkirakan gradiennya. Dengan gradient yang bernilai nol

atau mendekati nol, mengindikasikan bahwa variabel yang dioptimisasi telah mendapatkan nilainya dan proses pencarian berhenti.

Skema pada Gambar 2.17 memiliki empat parameter desain, yaitu a , k , ω , dan h . Amplitudo tersebut menghasilkan pertukaran antara kinerja asimtotik dan daerah daya tarik dari algoritma semakin kecil, yang mengakibatkan kesalahan residual yang ditentukan juga semakin kecil dan kemungkinan terjebak pada minimum lokal semakin besar. Begitupun sebaliknya, apabila pertukarannya semakin besar, semakin besar pula kesalahan residual dan kemungkinan mencapai minimum global semakin kecil. Parameter gain control mengendalikan kecepatan konvergensi, bersama-sama dengan parameter lain yang juga mempengaruhi kecepatan konvergensi. Frekuensi perturbasi (frekuensi sudut dalam sinyal sinusoidal) berfungsi untuk mengendalikan pemisahan antara skala waktu dari proses estimasi, yang dilakukan oleh integrator, dan proses estimasi gradien, yang dilakukan oleh perturbasi aditif dan multiplikasi. Semakin tinggi frekuensinya, semakin bersih perkiraan gradien dan semakin kecil efek gangguan yang diperkenalkan oleh harmonisa orde tinggi dan komponen DC.



Gambar 2.17 Konsep umum extremum seeking (Liu & Krstic, 2012)

Pengaturan set poin yang diusulkan pada tugas akhir ini didasarkan pada algoritma pencarian nilai ekstrem (extremum seeking/ES). Algoritma ini adalah algoritma optimasi dinamis yang tidak memerlukan model matematis dengan daya output sebagai fungsi objektif. Teknik optimisasi ini dilakukan agar daya keluaran turbin angin dapat dimaksimalkan dengan mengatur kecepatan turbin (ω). Selanjutnya, dengan menggunakan metode ini, setiap pengukuran kecepatan angin tidak harus ada (tidak diperlukan) namun hanya diperlukan pengukuran daya listrik (Ummah, 2018).

Algoritma ES menemukan pengoptimalan kecepatan turbin sebagai nilai setpoint ω_{ref} untuk waktu yang tidak diketahui, dengan berbagai cost function $J(\omega_{ref}, t)$ yang didefinisikan sebagai persamaan (2.27) (Liu & Krstic, 2012).

$$J = -\frac{1}{Q}(P - P_0)^2 + P_0 \quad (2.27)$$

Dengan J adalah selisih daya (W), Q adalah konstanta, P_0 adalah nilai daya optimal, dan P adalah nilai daya terukur.

2.8 Sistem Satuan Per Unit

Nilai per unit adalah nilai yang terkait dengan jumlah dasar. Nilai per-unit banyak digunakan dalam industri sistem tenaga untuk mengekspresikan nilai-nilai tegangan, arus, daya, dan impedansi berbagai peralatan listrik. Ini terutama digunakan untuk transformer dan mesin AC. Alasan menggunakan nilai per unit daripada menggunakan standar SI adalah ketika nilai diekspresikan dalam bentuk pu, maka jumlah elektrik dengan nilai normal dapat dibandingkan dengan mudah. Sebagai contoh, sebuah tegangan transien yang mencapai nilai maksimum sebesar 1,42 pu menunjukkan bahwa tegangan ini melebihi nilai nominal sebesar 42%. Selain itu, nilai-nilai impedansi yang dinyatakan dalam pu tetap cukup konstan apa pun peringkat daya dan tegangan.

Perhitungan menggunakan nilai per unit cukup sederhana. Ketika semua impedansi dalam sistem daya multivoltage dinyatakan pada basis kekuatan yang sama dan pada tegangan nominal dari subjaringan yang berbeda, maka total impedansi dalam pu yang terlihat pada satu bus diperoleh hanya dengan menambahkan semua impedansi dalam pu, tanpa mempertimbangkan rasio transformator. Untuk kuantitas tertentu (seperti tegangan, arus, daya, impedansi, torsi, dll) nilai per unit adalah nilai yang terkait dengan kuantitas dasar yang dapat dilihat pada persamaan (2.28) berikut.

$$\text{nilai dasar dalam pu} = \frac{\text{nilai dalam satuan SI}}{\text{nilai dasar}} \quad (2.28)$$

Umumnya dua nilai dasar berikut dipilih:

Daya dasar = daya nominal peralatan

Tegangan dasar = tegangan nominal peralatan

Semua nilai dasar lainnya berasal dari dua nilai dasar tersebut. Setelah daya dasar dan tegangan dasar dipilih, selanjutnya arus dasar dan impedansi dasar ditentukan oleh hukum alam rangkaian listrik.

$$\text{arus dasar} = \frac{\text{daya dasar}}{\text{tegangan dasar}} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} \text{impedansi dasar} &= \frac{\text{tegangan dasar}}{\text{arus dasar}} \\ &= \frac{(\text{tegangan dasar})^2}{\text{daya dasar}} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Pada sebuah transformator dengan beberapa gulungan yang masing-masing memiliki tegangan nominal yang berbeda serta daya dasar yang sama digunakan untuk semua gulungan (daya nominal transformator). Namun, berdasarkan definisi di atas, ada banyak nilai dasar sebagai gulungan untuk tegangan, arus, dan impedansi.

Karakteristik saturasi dari transformator jenuh diberikan dalam bentuk kurva hubungan arus sesaat versus fluks sesaat: [$i_1 \phi_1$; $i_2 \phi_2$; ..., $i_n \phi_n$].

Ketika sistem per-unit digunakan untuk menentukan parameter transformator R L, hubungan fluks dan arus dalam karakteristik saturasi harus juga ditentukan dalam pu. Nilai dasar yang sesuai adalah

$$\text{arus sesaat dasar} = (\text{arus rms dasar}) \times \sqrt{2} \quad (2.31)$$

$$\text{flux terkait dasar} = \frac{(\text{tegangan rms dasar}) \times \sqrt{2}}{2\pi \times (\text{frekuensi dasar})} \quad (2.32)$$

dimana arus, tegangan, dan flux terhubung masing-masing diekspresikan dalam satuan volt, ampere, dan volt-detik.

Untuk mesin AC, torsi dan kecepatan diekspresikan dalam pu. Berikut adalah nilai dasar yang dipilih:

Kecepatan dasar = kecepatan sinkron

Torsi dasar = torsi yang sesuai pada kekuatan dasar dan kecepatan sinkron

$$\text{torsi dasar} = \frac{\text{daya dasar (3 fasa) dalam VA}}{\text{kecepatan dasar dalam radian/detik}} \quad (2.33)$$

Dalam menentukan inersia rotor dalam satuan $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ biasanya diberikan konstanta H yang didefinisikan sebagai

$$H = \frac{\text{energi kinetik yang tersimpan dalam rotor pada kecepatan sinkron (joule)}}{\text{daya nominal mesin (VA)}} \quad (2.34)$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} \times J \cdot \omega^2}{P_{\text{nom}}} \quad (2.35)$$

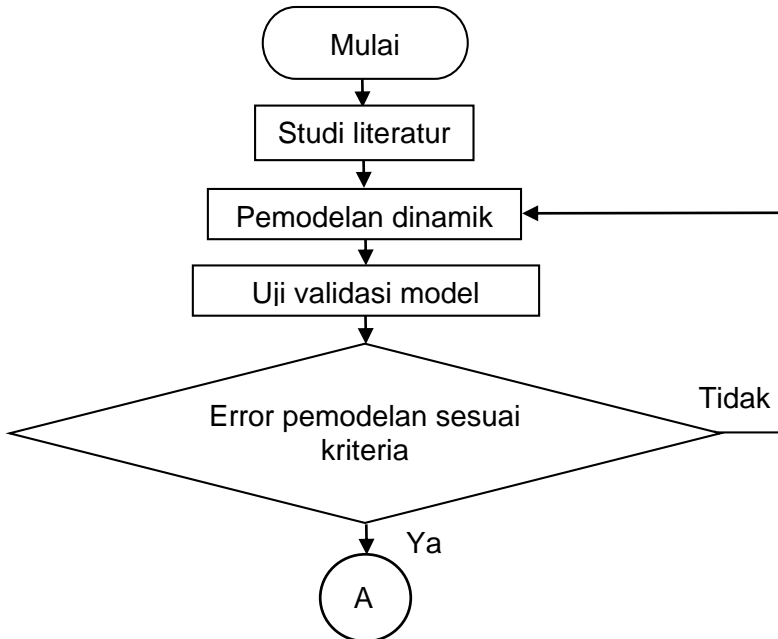
Konstanta inersia dinyatakan dalam detik. Pada mesin yang besar, konstanta ini bernilai sekitar 3 sampai 5 detik. Sebuah konstanta inersia 3 detik berarti energi yang tersimpan dalam bagian yang berputar dapat memasok beban nominal selama 3 detik. Pada mesin yang kecil, nilai H lebih rendah. Misalnya untuk sebuah motor 3 HP memiliki nilai H antara 0,5 hingga 0,7 detik.

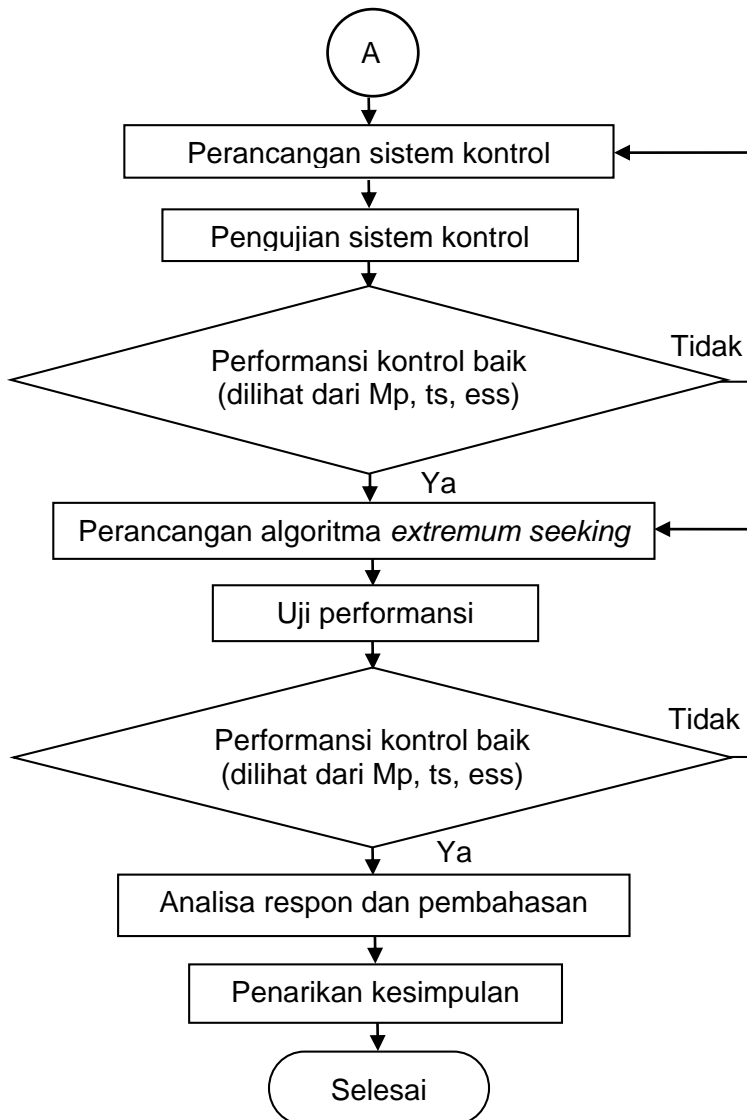
“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Prosedur Umum Penelitian

Pada bab ini, dijelaskan prosedur penelitian tugas akhir dalam mendesain *supervisory control* untuk pengendalian kecepatan turbin angin menggunakan metode *direct torque control* berbasis *boost converter* pada PMSG untuk mencapai tujuan penelitian. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini sesuai dengan diagram alir penelitian pada gambar 3.1 berikut.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Langkah kedua adalah studi literature. Pada tahap ini dilakukan studi terhadap beberapa literatur dari referensi *text book*, *manual book*, serta jurnal-jurnal ilmiah yang memuat materi-materi berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Dari studi literatur ini, diharapkan dapat membantu peneliti dalam menentukan 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 *Supervisory Control* pada turbin angin. Pendalaman materi tentang maksimalisasi ekstraksi daya pada turbin angin dengan memanipulasi torsi generator, sistem *multiinput* DC-DC *converter*, dan perancangan *Extremum Seeking Control* (ESC). Komponen-komponen dan cara kerja turbin angin, metode *supervisory control*, optimasi *setpoint*, serta cara mengkonversi daya listrik dari turbin angin.

Dari studi literatur mengenai bentuk persamaan dari turbin angin beserta input AC-DC konverter untuk dijadikan acuan dalam pemodelan sistem pembangkit listrik tenaga angin yang akan dimodelkan pada SIMULINK MATLAB. Uji validasi model dilakukan setelah pemodelan pada Simulink MATLAB. Pengujian validasi dengan melihat *error* pemodelan sesuai dengan kriteria yang telah ditetapkan atau tidak. Jika tidak maka akan kembali ke proses pemodelan agar *error* yang pemodelan sesuai dengan kriteria yang diinginkan.

Perancangan sistem kontrol PI dirancang setelah dilakukan perancangan sistem pembangkit listrik tenaga angin berhasil. Perancangan sistem kontrol PI ini untuk mendapatkan respon yang baik dari generator turbin angin. Pengujian sistem kontrol PI dilakukan dengan melihat parameter-parameter dari respon berupa *Maximum overshoot* (M_p), *error steady state* (ess), *time settling* (ts). Apabila parameter tersebut sesuai dengan rentang yang

diinginkan, maka akan dilakukan proses selanjutnya, jika tidak sesuai maka akan kembali kepada perancangan sistem kontrol PI.

Perancangan Algoritma *extremum seeking* digunakan untuk menghasilkan kecepatan rotor optimum pada setiap kondisi kecepatan angin yang berbeda melalui perhitungan berdasarkan parameter-parameter yang telah ditetapkan. *Setpoint* untuk memaksimalkan daya keluaran konverter turbin angin menggunakan kecepatan torsi generator, sehingga ekstraksi daya maksimum dapat tercapai. Setelah diimplmentasikan maka akan dilihat performansi sistem kontrol yang telah terimplementasikan oleh algoritma *extremum seeking*. Apabila hasil uji sudah sesuai yang diinginkan, maka akan dilakukan proses selanjutnya. Jika masih belum sesuai maka kembali kepada perancangan algoritma *extremum seeking*.

Data yang telah didapatkan melalui proses pengambilan data pada *plant*, kemudian dianalisa *maximum overshoot* (M_p), *time settling* (t_s), *rise time* (t_r), dan *error steady state* (ess) pada respon sistem. Apabila respon sistem tidak sesuai maka akan kembali dilakukan perancangan kontrol PI untuk memaksimalkan ekstraksi daya maupun untuk menstabilkan tegangan keluaran. Keluaran daya sebelum dan sesudah pemberian pengendalian dapat dibandingkan sehingga dapat diketahui performansi metode *supervisory control* dalam pengendalian kecepatan pada turbin angin. Dari data-data tersebut dilakukan analisa dan pembahasan mengenai *supervisory control* yang telah dirancang pada turbin angin.

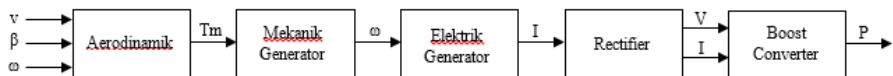
Langkah terakhir dalam melakukan penelitian tugas akhir ini adalah pembuatan kesimpulan. Pembuatan kesimpulan dilakukan berdasarkan hasil analisa dan pengujian. Kesimpulan ini disusun sesuai dengan tujuan penelitian untuk menjawab permasalahan penelitian.

3.2 Studi Karakteristik Turbin Angin

Langkah awal dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah penentuan karakteristik spesifikasi turbin angin. Data turbin angin yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada parameter data turbin angin dari penelitian (Manwell, 2009) yang dapat dilihat pada Tabel 3.1. Turbin angin disimulasikan menggunakan data kecepatan angin dari BMKG.

Tabel 3.1 Spesifikasi Turbin Angin

Model Turbin	AF 1-24-0125 (406 PMG)
Blade Turbin	3 (28 deg blade pitch)
Laju Angin awal	2 m/s
Charging initiation wind	3 m/s
Charging initiation RPM	258
Daya Output	24v & 48v 1000W (600W/12v)
Rated Wind Speed	12,5 m/s
Diameter Rotor	1,8m
Kecepatan (RPM)	200 – 800
Jenis Generator	3 phase Permanent Magnet
Jenis Keluaran	Rectified DC (3Phase available on request)
Berat	15kg
Noise	Laeq 35dB @5m/s behind rotor
Noise	Laeq 54dB @7m/s behind rotor



Gambar 3.2 Susunan sistem turbin angin

3.3 Pembuatan Model Turbin Angin

Langkah kedua dalam pengerjaan tugas akhir adalah pembuatan model system turbin angin menggunakan software Matlab R2014a dan menggunakan Simulink yang ada dalam software tersebut. Sistem yang dimodelkan pada Simulink ini

dilakukan setelah memperoleh data karakteristik turbin angin. Pemodelan yang akan dibuat yaitu meliputi,

- Pemodelan sistem turbin angin tanpa kontroler.
- Pemodelan sistem turbin angin menggunakan kontroler MPPT.
- Pemodelan sistem turbin angin menggunakan *Supervisory Control*.

Model sistem turbin angin yang sudah dirancang kemudian disimulasikan pada software MATLAB/Simulink. Pemodelan dilakukan dengan memodifikasi model yang sudah ada berdasarkan laporan dari (Ummah, 2018) yaitu mengacu pada persamaan (2.5) untuk daya turbin angin, (2.8) untuk torsi turbin angin, dan (2.7) untuk TSR.

Dalam mendefinisikan salah satu variabel pada persamaan (2.7), maka digunakan persamaan (3.1).

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.1)$$

Untuk nilai koefisien C_1 sampai C_6 adalah sebagai berikut:

$$C_1 = 0.645$$

$$C_2 = 116$$

$$C_3 = 0.4$$

$$C_4 = 5$$

$$C_5 = 21$$

$$C_6 = 0.00912$$

Setelah membuat model sistem di atas, selanjutnya membuat model elemen lain seperti rotor dan generator. Untuk persamaan rotor ditunjukkan pada persamaan berikut (Zaini, 2016):

$$\omega_r = \omega_r + \frac{(T_r - T_m)}{(2.H_{wt})} \quad (3.2)$$

$$T_m = (\omega_r - \omega_g) \cdot K_{sh} + (\omega_r - \omega_g) \cdot D_{mutual} \quad (3.3)$$

Dengan

T_m = Torsi mekanik rotor (Nm)

H_{wt} = Konstanta inersia (detik)

K_{sh} = Konstanta pegas pada rotor

D_{mutual} = Konstanta redaman pada motor
 Sedangkan untuk persamaan generator ditunjukkan pada persamaan berikut (Zaini, 2016):

$$\omega_g = \omega_g + \frac{T_m - T_g + \omega_g \cdot F}{2 \cdot H} \quad (3.4)$$

Untuk perancangan sistem kendali konvensional, maka digunakan nilai setpoint konstan, yaitu

$$\omega_{\text{ref}} = 1 \text{ pu}$$

Tabel 3.2 Definisi dan Nilai Berbagai Parameter pada Simulasi

Parameter	Definisi	Nilai	Satuan
$C_{p_{\text{max}}}$	Koefisien daya maksimum	1	Pu
V_x	Kecepatan angin	4 - 10	m/s
F	<i>Friction factor of generator</i>	$3,03 \times 10^{-6}$	N.m.s
J	Inersia generator	$6,2 \times 10^{-6}$	Kg.m ²
ω_{min}	Kecepatan putar rotor maksimum	0,5105	Pu
ω_{max}	Kecepatan putar rotor maksimum	0,8437	Pu
P_{mec}	Daya keluaran mekanik	500	Watt

Parameter turbin angin yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Parameter Turbin Angin

Parameter	Nilai	Satuan
Daya output mekanik nominal	500/0,9	Watt
Daya dasar generator elektrik	500	VA
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 ini mempunyai tiga *input* dan satu *output*. *Input* pertama adalah kecepatan generator dalam satuan per unit yang dihasilkan dari laju rotor pada generator. *Input* kedua adalah sudut *pitch* dalam satuan derajat yang mana dalam tugas akhir ini menggunakan sudut *pitch* bernilai nol untuk menentukan sudut *pitch* yang digunakan dalam pemodelan. *Input* ketiga adalah kecepatan angin dalam satuan m/s, yang mana *input* kecepatan angin yang digunakan sesuai dengan yang akan disimulasikan, baik konstan maupun berubah-ubah. *Output* turbin angin adalah torsi mekanik dalam satuan per unit yang dihubungkan dengan generator untuk memutar generator.

Pada Tabel 3.4 akan ditunjukkan jenis rotor yang digunakan dalam tugas akhir ini, sedangkan untuk parameter PMSG yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.4 Jenis Rotor PMSG

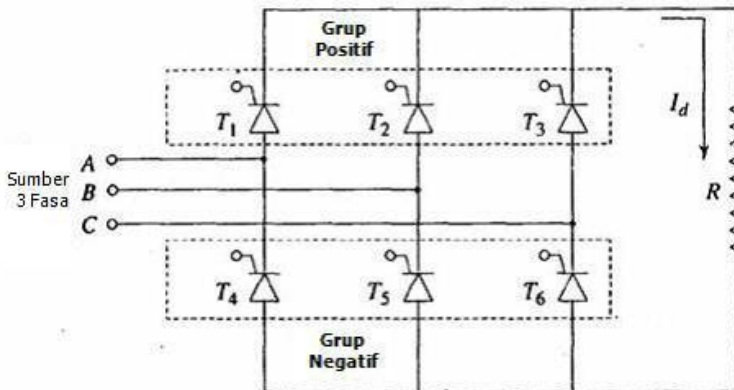
Parameter	Konfigurasi
Jumlah fasa	3
Bentuk gelombang EMF	<i>Sinusoidal</i>
Tipe rotor	<i>Round</i>
Input mekanik	<i>Torque Tm</i>
Model preset	<i>No</i>

Tabel 3.5 Parameter PMSG

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Stator phase resistance</i> Rs	0,18	Ohm
<i>Armature inductance</i>	0,000835	H
<i>Flux linkage</i>	0,0714	V.s
<i>Inertia</i> (J)	0,00062	Kg.m ²
<i>Viscous damping</i> (F)	0,0003035	N.m.s
<i>Pole pairs</i> (p)	4	-
<i>Static friction</i> (Tf)	0	N.m
<i>Initial condition</i> ω mekanik	0	Rad/s
<i>Initial condition</i> θ mekanik	0	Deg
<i>Initial condition</i> arus a	0	A
<i>Initial condition</i> arus b	0	A

3.4 Rectifier

Pada Tabel 3.6 ditunjukkan parameter yang digunakan dalam blok penyearah. Setelah parameter-parameter berdasarkan laporan dari (Zaini, 2016) pada Tabel 3.6 diimplementasikan pada blok simulink, maka dilakukan simulasi untuk sistem turbin tanpa kontroler, sistem turbin angin dengan kontroler MPPT, dan sistem turbin angin dengan *supervisory control*.



Gambar 3.3 Rangkaian rectifier (Zaini, 2016)

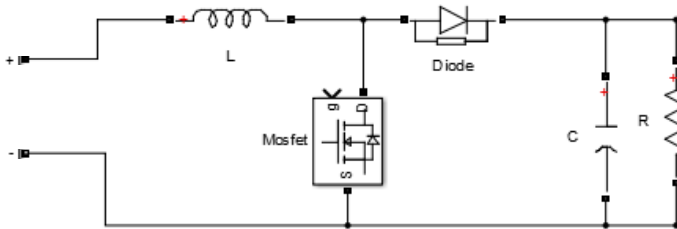
Tabel 3.6 Parameter Penyearah

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Number of bridge arms</i>	3	-
<i>Snubber resistance Rs</i>	100	Ohm
<i>Snubber capacitance Cs</i>	1×10^{-6}	F
R on	1×10^{-3}	Ohm
L on	0	H
<i>Forward voltage Vf</i>	0,8	V

3.5 Perancangan *Boost Converter*

Rancangan konverter yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *boost converter*. Gambar 3.5 menunjukkan sistem *boost converter* yang digunakan pada sistem turbin angin. Pada *boost*

converter ini variabel yang dikendalikan adalah tegangan masukan *boost converter*.



Gambar 3.4 Rangkaian *boost converter*

Pada Bab 2 telah dijelaskan mengenai penentuan nilai induktansi pada induktor dan nilai kapasitansi pada kapasitor. Untuk merancang *boost converter*, terlebih dahulu perlu diperhitungkan beberapa besaran komponen aktif dan pasif yang akan digunakan pada rangkaian. Perlu ditentukan nilai *duty cycle* terlebih dahulu sebelum menentukan nilai komponen induktor dan kapasitor. Rangkaian *boost converter* ini harus dapat bekerja pada rentang *duty cycle* yang lebar, yaitu $0,01 < D < 0,99$. Rangkaian *boost converter* ini diharapkan menghasilkan tegangan keluaran yang memiliki *ripple* sebesar 1%. Jika diinginkan tegangan masukan sama dengan tegangan keluaran, maka nilai *duty cycle* (D) = 0.5. (Zaini, 2016).

Berikut adalah parameter yang sudah dimodifikasi berdasarkan laporan dari (Zaini, 2016) sebagai dasar dalam perancangan *boost converter*:

- a. Beban resistansi (R_L) yang digunakan adalah 5Ω
- b. Frekuensi *switching* (f) yang digunakan adalah 20 KHz
- c. Tegangan input (V_S) sebesar 15,18 V
- d. *Duty cycle* (D) sebesar 0,5

Dari parameter yang sudah ditetapkan, maka dapat dihitung nilai komponen yang akan digunakan yaitu:

$$V_A = \frac{V_S T}{t_2} = \frac{1}{1 - D} V_S \quad (3.6)$$

$$V_A = \frac{1}{1 - 0,5} \times 15,18 = 30,36 \text{ V}$$

$$\Delta I = \frac{V_S D}{fL} \quad (3.7)$$

$$L = \frac{0,5 \times 15,18}{20 \times 10^3 \times 0,38} = 1000 \times 10^{-6} \text{ H}$$

$$\Delta V_C = \frac{1}{C} I_a t_1 = \frac{D I_a}{fC} \quad (3.8)$$

$$C = \frac{15,18 \times 0,5}{20 \times 10^3 \times 0,38} = 1000 \times 10^{-6} \text{ F}$$

Sebagai keterangan tambahan, diode memiliki tegangan reverse sebesar 0,8 Volt. Untuk merangkum penjelasan ini, Tabel 3.7 menunjukkan nilai tiap variabel yang terdapat pada rangkaian *boost converter*.

Tabel 3.7 Variabel *Boost Converter*

No	Variabel	Nilai
1	V_A	30,36 V
2	L	$1000 \times 10^{-6} \text{ H}$
3	C	$1000 \times 10^{-6} \text{ F}$
4	V_D	0,8 V

Gambar pada lampiran A.6 menunjukkan rangkaian *boost converter* yang digunakan pada tugas akhir ini.

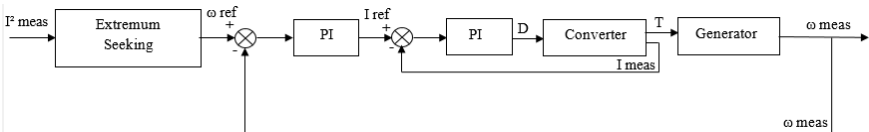
3.6 Perancangan Supervisory Control

Rancangan kontroler yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *supervisory control* yang terdiri dari *supervisory level* dan pengendali PI. Pada *supervisory level* menggunakan *extremum seeking* untuk mengubah *set point*. *Supervisory level* diberikan perintah oleh *supervisor* untuk melakukan level eksekusi dengan memberikan data kecepatan angin dan arus terukur. Selanjutnya, memperkirakan daya maksimal yang mampu dihasilkan oleh kecepatan angin dengan perhitungan daya estimasi pada level eksekusi, sehingga akan dilakukan tracking kecepatan turbin (ω)

yang mampu menghasilkan daya maksimal keluaran konverter. Kemudian, dari data kecepatan turbin, akan dilakukan perhitungan nilai torsi melalui pemodelan matematika dengan memberikan pengendali PI agar respon menjadi lebih stabil.

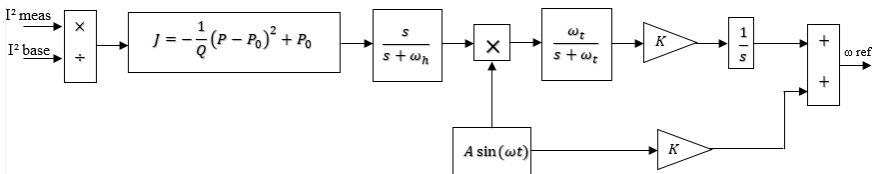
Pada tugas akhir ini, *Supervisory control* (SC) adalah sebuah sistem pengendalian kecepatan angin yang mempengaruhi daya output pada turbin angin. Pada SC terdapat *supervisory level* yang bekerja dalam melakukan optimisasi pada kecepatan putar generator (kecepatan rotor). Kecepatan rotor ini berperan sebagai setpoint pada simulasi tugas akhir ini, sehingga dengan ditentukannya nilai kecepatan akan menghasilkan nilai dari sudut blade pitch tertentu.

Diagram blok sistem *supervisory control* dengan algoritma *extremum seeking* dapat dilihat pada lampiran A.7 dan Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram blok sistem *supervisory control*

3.6.1 Perancangan Optimisasi Setpoint



Gambar 3.6 Konsep *supervisory level* menggunakan *extremum seeking*

Pada tugas akhir ini menggunakan algoritma *extremum seeking* (ES) untuk mengoptimisasi setpoint. Algoritma ES tersusun atas filter *highpass*, gelombang sinus, filter *lowpass*, kompensator

dinamis, dan integrator yang terdapat pada lampiran A.8 dan Gambar 3.6.

Fungsi dari filter highpass, sinyal sinus, dan filter lowpass adalah untuk mengekstrak sinyal yang sebanding dengan gradien *cost function* J seperti persamaan (2.15), sehubungan dengan pengoptimalan variabel ω_{ref} . Integrator dan kompensator berperan sebagai penggerak gradien menjadi nol, sehingga fungsi J dapat mencapai nilai optimal.

Berdasarkan gambar di atas diketahui bahwa terdapat parameter-parameter yang dibutuhkan dalam perancangan *supervisory control*, diantaranya adalah penentuan nilai ω_n pada filter *highpass*, ω_l pada filter *lowpass*, amplitudo (A), dan frekuensi sudut (ω) pada fungsi pembangkit sinyal (sinyal sinusoidal), dan nilai numerik dari gain positif.

Metode lain dalam mengoptimalkan daya keluaran yang dihasilkan turbin angin adalah dengan menggunakan MPPT. Pemodelan lain kontroler pada tugas akhir ini menggunakan MPPT yang akan digunakan sebagai pembanding dengan *supervisory control* yang menggunakan *extremum seeking*.

3.6.2 Perancangan Pengendali PI

Pengendali PI pada simulasi digunakan untuk mengatasi karakteristik nonlinearitas yang diakibatkan oleh sistem turbin angin. Pengendalian ini menggunakan parameter proporsional (P) yang bertindak sebagai gain dan parameter integral (I) yang bertindak sebagai integrator untuk menghilangkan offset pada respon sistem.

Pengendali PI pada tugas akhir ini dirancang untuk mengendalikan respon arus dan kecepatan rotor. Nilai parameter PI yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} K_p \text{ arus} &= 2 \\ K_i \text{ arus} &= 0,22 \end{aligned}$$

Kp kecepatan rotor = 3

Ki kecepatan rotor = 80

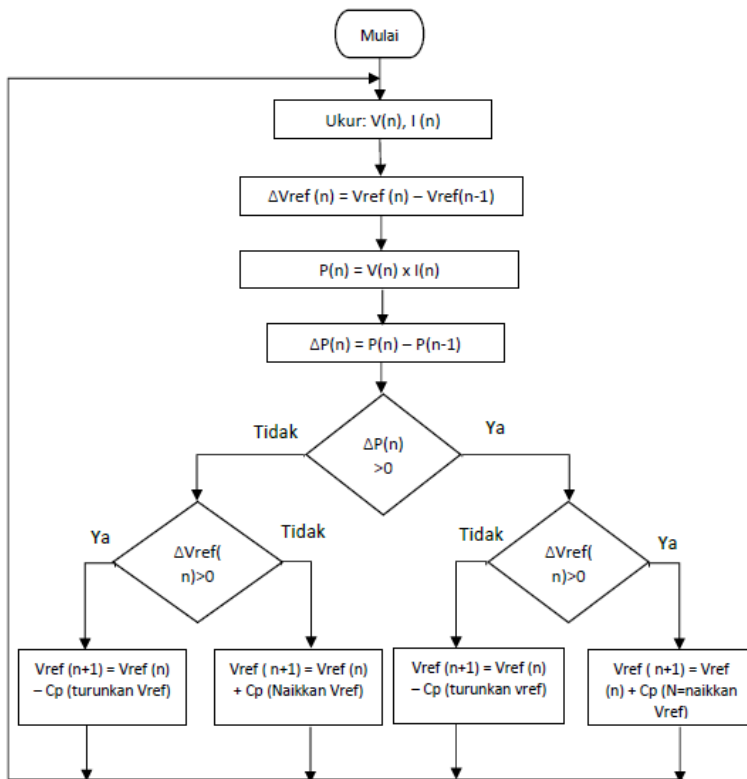
Perancangan pengendali PI pada tugas akhir ini dimulai dengan perancangan pengendali PI untuk mengendalikan respon arus dengan cara *trial error*. Selanjutnya merancang pengendali PI yang terdapat di dalam *supervisory level* untuk mengendalikan respon kecepatan rotor.

Setelah dibuat *supervisory control* pada sistem turbin angin, kemudian dilakukan simulasi untuk pengujian sensitivitas kontroler yang telah dibuat. Uji sensitivitas dilakukan dengan cara perubahan laju angin. Dengan demikian diharapkan ada perubahan daya keluaran yang dihasilkan ketika laju angin berubah.

3.7 Perancangan MPPT

Metode lain dalam mengoptimalkan daya keluaran yang dihasilkan turbin angin adalah dengan menggunakan MPPT. Pemodelan lain kontroler sistem turbin angin pada tugas akhir ini menggunakan MPPT yang akan digunakan sebagai pembanding dengan *supervisory control* yang menggunakan *extremum seeking*. Metode ini digunakan untuk mendapatkan daya keluaran yang optimal pada sistem turbin angin dengan mencari titik optimal melalui *boost converter* yang dilengkapi MPPT dengan algoritma *Perturb and Observe*. Implementasi metode ini mengacu pada penelitian (Zaini, 2016).

Pengoperasian metode ini menggunakan dua parameter inti yaitu tegangan input $V(n)$ dan arus input $I(n)$ dari turbin angin. Daya panel $P(n)$ ditentukan dengan mengalikan dua parameter tersebut. Inti *tracking* dari metode ini adalah menghitung kemiringan (*slope*).



Gambar 3.7 Flowchart metode *Perturb and Observe* (Zaini, 2016)

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Sensitivitas Sistem *Open Loop*

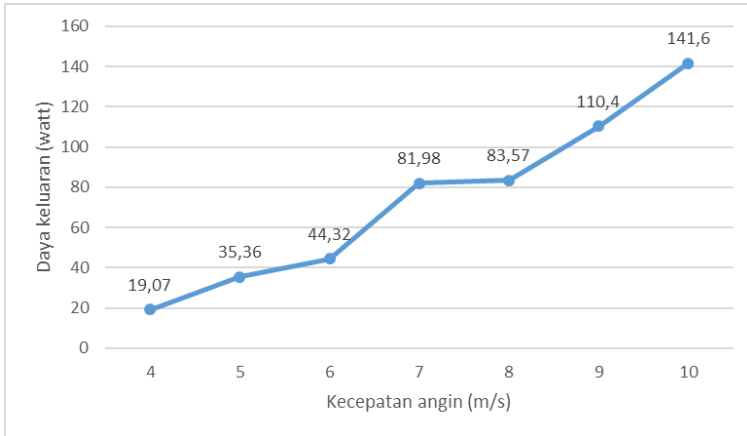
Untuk mengetahui pengaruh perubahan nilai parameter yang sifatnya tetap terhadap optimasi, maka dilakukan analisis sensitivitas. Pengaruh perubahan parameter laju angin terhadap hasil optimasi diuji dengan memvariasikan nilai laju angin antara 4 m/s hingga 10 m/s dengan kapasitas daya nominal turbin angin yang tetap, yaitu 500 watt. Pada percobaan ini menggunakan beban resistansi sebesar 5 Ω . Hasil yang diperoleh dari pengujian ini ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Uji Sensitivitas Sistem *Open Loop*

Kecepatan Angin (m/s)	I (A)	V (Volt)	P (Watt)	Cp (Pu)	ω (Rad/s)
4	1,953	9,763	19,07	0,2441	25,47
5	2,659	13,3	35,36	0,2123	32,55
6	2,977	14,89	44,32	0,1729	40,08
7	4,049	20,25	81,98	0,1608	47,11
8	4,088	20,44	83,57	0,1264	54,96
9	4,698	23,49	110,4	0,1167	62,18
10	5,322	26,61	141,6	0,1092	69,38

Hasil uji sensitivitas sistem *open loop* yang mengaju dari penelitian (Zaini, 2016) dituangkan pada Tabel 4.1, sehingga didapatkan nilai arus keluaran *rectifier* (I), tegangan keluaran *rectifier* (V), daya keluaran (P), koefisien daya (Cp), dan kecepatan rotor (ω). Hasil tersebut dapat dilihat bahwa semakin cepat laju angin maka daya yang dihasilkan semakin besar. Hal ini dikarenakan kecepatan rotor yang semakin besar ketika laju angin semakin cepat, hal ini akan mempengaruhi pada besar emf yang dihasilkan. Maka hasil percobaan pada Tabel 4.1 membuktikan

bahwa semakin besar laju angin maka daya keluaranpun semakin besar. Namun, nilai C_p semakin turun meskipun kecepatan rotor naik karena torsi generator tidak dikontrol, sehingga kecepatan rotor yang dihasilkan tinggi yang menyebabkan turbin angin tidak dapat mengekstraksi daya dengan baik.



Gambar 4.1 Grafik pengaruh kecepatan angin terhadap daya keluaran sistem turbin angin

Energi angin memiliki karakteristik laju yang selalu berubah terhadap waktu. Dengan karakteristik laju angin yang selalu berubah terhadap waktu tersebut, menyebabkan daya listrik yang dihasilkan oleh sistem turbin angin juga selalu berubah terhadap waktu terjadi akibat adanya perbedaan tekanan udara dan temperatur udara pada suatu lokasi.

4.1.1 Pengaruh Laju Angin terhadap Laju Rotor dan Daya Keluaran Sistem Turbin Angin

Laju Angin yang berubah terhadap waktu menyebabkan daya listrik yang dapat dihasilkan sistem turbin angin mengalami perubahan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Hal ini dikarenakan daya mekanis turbin angin dipengaruhi oleh laju angin

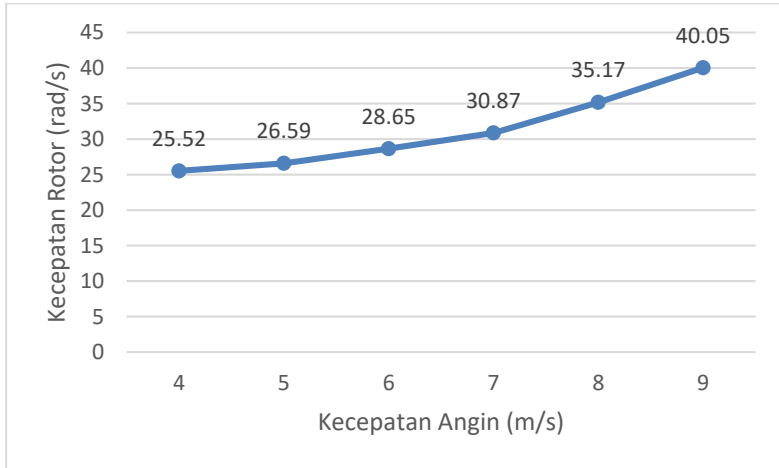
sebagaimana yang dinyatakan dalam persamaan (2.5). Daya mekanis turbin angin berbanding lurus dengan kubik laju angin, sehingga ketika kecepatan angin semakin besar, maka daya mekanis turbin angin juga akan semakin besar. Semakin besarnya daya mekanis turbin angin akan berakibat semakin besarnya laju putar rotor. Kecepatan putar rotor yang semakin besar akan berakibat pada semakin besarnya juga daya listrik keluaran turbin angin dikarenakan turbin angin terkopel dengan PMSG.

Keterkaitan antara kecepatan angin dengan daya listrik keluaran sistem turbin angin adalah ketika kecepatan angin semakin besar, maka kecepatan rotor akan semakin besar pula. Meningkatnya kecepatan rotor tersebut menyebabkan emf yang dihasilkan oleh PMSG meningkat, sehingga menyebabkan daya listrik yang dihasilkan oleh PMSG juga semakin besar. Data pada Tabel 4.2 dan grafik pada Gambar 4.2 diperoleh dari hasil simulasi sistem turbin angin menggunakan *supervisory control* menggunakan parameter kecepatan angin 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s dengan beban resistansi yang digunakan adalah 5 ohm.

Tabel 4.2 Pengaruh Laju Angin Terhadap Laju Rotor dan Daya Keluaran dengan Beban Resistansi 5 Ω pada *Supervisory Control*

Kecepatan Angin (m/s)	Kecepatan Rotor (rad/s)	Cp (Pu)	Daya Keluaran (Watt)
4	25,52	0,2518	18,76
5	26,59	0,4432	119
6	28,65	0,4914	274,9
7	30,87	0,4999	439,6
8	35,17	0,4998	645
9	40,05	0,5	905,7

Grafik perbandingan kecepatan angin dengan kecepatan rotor turbin ditunjukkan pada Gambar 4.2.

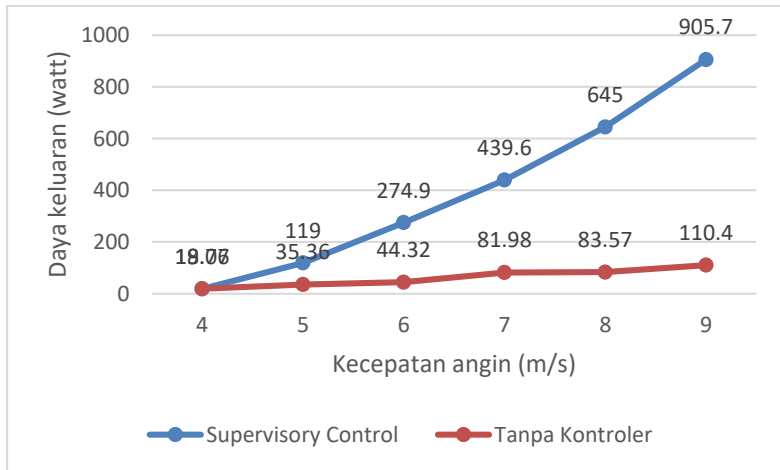


Gambar 4.2 Grafik hubungan kecepatan angin dengan kecepatan rotor turbin

4.2 Perbandingan Sistem Turbin Angin *Supervisory Control* dengan Tanpa Pengendalian

Kecepatan angin yang berbeda maka titik optimalnya juga berbeda. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakanlah *supervisory control* untuk menjaga nilai kecepatan rotor agar sistem turbin angin selalu dapat mengekstraksi daya yang maksimal pada kecepatan angin yang berbeda-beda. Sebagaimana telah diketahui bahwa kecepatan angin yang berbeda akan menghasilkan daya listrik yang berbeda pula, sehingga dapat diketahui terdapat perbedaan daya listrik yang dihasilkan ketika sistem turbin angin menggunakan *supervisory control* dan tanpa menggunakan pengendalian, sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Grafik perbandingan pada Gambar 4.3 diperoleh dari hasil simulasi sistem turbin angin menggunakan *supervisory*

control dan tanpa menggunakan pengendalian dengan menggunakan parameter kecepatan angin 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s dengan beban resistansi yang digunakan adalah 50 ohm.



Gambar 4.3 Perbandingan daya listrik sistem turbin angin menggunakan *supervisory control* dan tanpa pengendalian

Berdasarkan Gambar 4.3 diatas dapat dilihat bahwa sistem turbin angin menggunakan *supervisory control* menghasilkan daya listrik yang jauh lebih besar dibandingkan dengan daya listrik yang dihasilkan sistem turbin angin tanpa pengendalian. Maka dari itu, penggunaan *supervisory control* lebih efisien dibandingkan tanpa menggunakan pengendalian.

4.3 Komparasi Performansi Sistem *Supervisory Control* dengan Kontroler MPPT

Pengambilan data pada penelitian ini juga dilakukan untuk membandingkan performansi penggunaan *supervisory control* dan kontroler MPPT. Nilai kecepatan angin yang diberikan pada

pengujian kontroler ini adalah 5 m/s ke 9 m/s. Hasil komparasi yang didapatkan dapat dilihat pada Tabel 4.3, yang dilakukan pada dua perubahan nilai kecepatan angin. Pada Tabel 4.3 dijelaskan bahwa dalam *supervisory control* mampu memberikan nilai kecepatan rotor yang optimal, sehingga mampu mengekstraksi daya dengan baik untuk memberikan daya keluaran maksimal meskipun pada kecepatan angin rendah (5 m/s ke 9 m/s). Namun pada kontroler MPPT tidak memberikan nilai kecepatan rotor yang optimal, sehingga tidak mampu mengekstraksi daya dengan baik, yang menyebabkan daya yang dihasilkan tidak maksimal. Hal ini mengindikasikan bahwa performansi *supervisory control* lebih baik daripada kontroler MPPT.

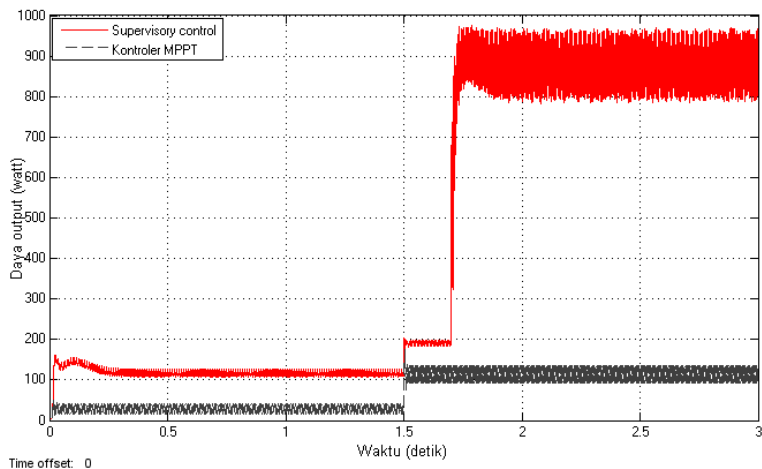
Tabel 4.3 Komparasi Performansi *Supervisory Control* dengan Kontroler MPPT

Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Pengendalian	P (Watt)	ω (Pu)	Cp (Pu)
5 ke 9	MPPT	134,8	1,235	0,1340
	<i>Supervisory Control</i>	853,4	0,8153	0,4994
9 ke 5	MPPT	17,25	0,6671	0,1822
	<i>Supervisory Control</i>	113,6	0,525	0,4514

Performansi penggunaan *supervisory control* dan kontroler MPPT ditunjukkan oleh Gambar 4.4 sampai Gambar 4.7, yang secara berturut-turut menunjukkan perubahan nilai daya keluaran, nilai kecepatan rotor, dan koefisien daya yang dihasilkan dalam sistem turbin angin.

Gambar 4.4 menunjukkan daya keluaran yang dihasilkan oleh *supervisory control* memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan

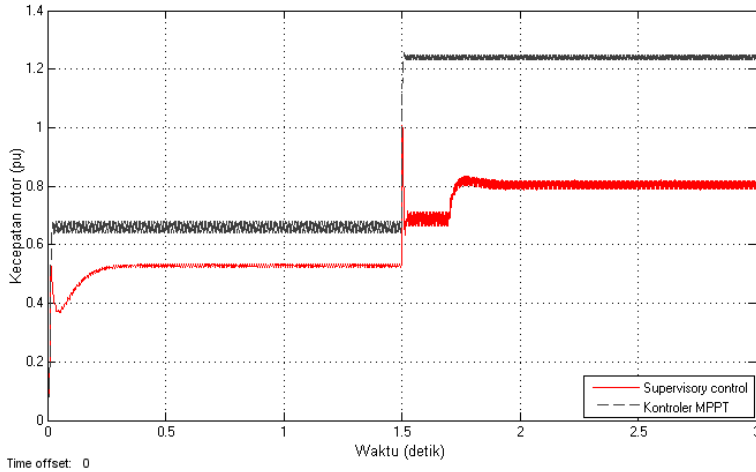
dengan kontroler MPPT dikarenakan nilai kecepatan rotor yang dihasilkan maksimal sesuai dengan karakteristik turbin angin, sehingga performansinya dalam mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik jadi maksimal. Hasil nilai daya awal yang lebih tinggi, mengindikasikan bahwa sistem turbin angin menggunakan *supervisory control* yang telah diterapkan pada tugas akhir ini memiliki performansi yang lebih baik. Gambar 4.4 sampai Gambar 4.7 menunjukkan adanya keterkaitan antara daya awal yang dihasilkan oleh sistem turbin angin dengan besarnya kecepatan rotor dan koefisien daya.



Gambar 4.4 Komparasi daya keluaran dari *supervisory control* dan kontroler MPPT pada kecepatan angin naik dari 5 m/s ke 9 m/s

Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara penggunaan sistem *supervisory control* dengan sistem kontroler MPPT. Pada saat waktu mencapai 1 detik, terjadi perubahan nilai kecepatan angin dari 5 m/s ke 9 m/s pada Gambar 4.5, sehingga terjadi kenaikan daya yang dihasilkan turbin

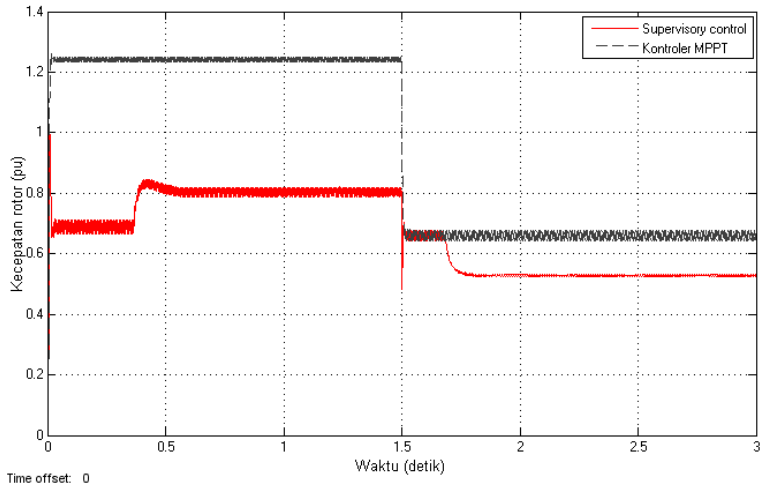
angin. Hal ini disebabkan kecepatan angin yang lebih tinggi memiliki energi yang lebih tinggi pula, sehingga sistem turbin angin dapat mengekstrak energi listrik secara maksimal. Begitupun sebaliknya pada nilai kecepatan angin turun dari 9 m/s ke 5 m/s pada Gambar 4.6.



Gambar 4.5 Komparasi kecepatan rotor dari *supervisory control* dan pengendalian MPPT pada kecepatan angin naik dari 5 m/s ke 9 m/s

Kecepatan rotor yang dihasilkan oleh kontroler MPPT memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan *supervisory control*. Namun kecepatan rotor yang lebih besar tersebut melebihi batas standar kecepatan maksimum sesuai dengan karakteristik turbin angin, sehingga turbin angin tidak dapat mengekstraksi daya dengan baik. Kecepatan rotor yang seharusnya dihasilkan turbin angin sesuai karakteristik turbin angin adalah 0,8 pu pada kecepatan angin 9 m/s. Hal tersebut menyebabkan daya yang dihasilkan tidak maksimal. Di sisi lain, *supervisory control* menghasilkan kecepatan maksimum sesuai dengan karakteristik

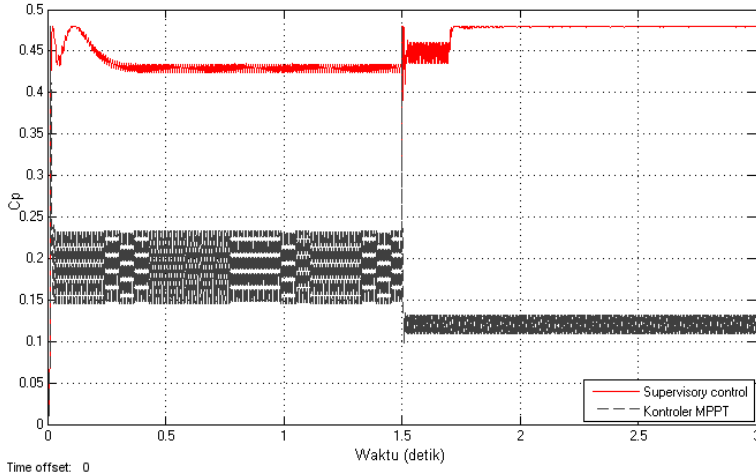
turbin angin yang ditunjukkan dengan nilai C_p yang dihasilkan mendekati 1. Hal tersebut menunjukkan bahwa turbin angin mempertahankan kecepatan rotor sebesar kecepatan rotor sesuai karakteristik turbin angin untuk mengekstraksi daya dengan maksimal.



Gambar 4.6 Komparasi kecepatan rotor dari *supervisory control* dan kontroler MPPT pada kecepatan angin turun dari 9 m/s ke 5 m/s

Gambar 4.7 menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara penggunaan sistem *supervisory control* dengan sistem kontroler MPPT dalam menghasilkan koefisien daya. Gambar tersebut menunjukkan performansi sistem *supervisory control* lebih baik daripada sistem kontroler MPPT, dikarenakan daya yang diekstrak oleh sistem *supervisory control* lebih besar dibandingkan dengan sistem kontroler MPPT. Saat waktu mencapai 1 detik, terjadi perubahan nilai C_p pada saat kecepatan angin naik dari 5 m/s ke 9 m/s. C_p yang dihasilkan oleh sistem *supervisory control* menjadi naik saat terjadi perubahan nilai kecepatan angin. Namun

pada sistem kontroler MPPT terjadi penurunan nilai C_p saat perubahan kecepatan angin, dikarenakan kecepatan rotor yang dihasilkan terlalu besar melebihi batas kecepatan maksimum berdasarkan karakteristik turbin angin.



Gambar 4.7 Komparasi koefisien daya dari *supervisory control* dan kontroler MPPT pada kecepatan angin naik dari 5 m/s ke 9 m/s

4.4 Uji Performansi Kecepatan Rotor pada *Supervisory Control* dan Kontroler MPPT

Pengujian yang mengacu dari penelitian (Ummah, 2018) ini dilakukan untuk mengetahui performansi sistem *supervisory control* dan kontroler MPPT dalam mengendalikan respon kecepatan rotor turbin angin. Pengujian ini dilakukan pada kecepatan angin naik dan turun dari 5 m/s ke 9 m/s dan sebaliknya. Hasil performansi *tracking* setpoint oleh algoritma *extremum seeking* dapat dilihat pada Tabel 4.4.

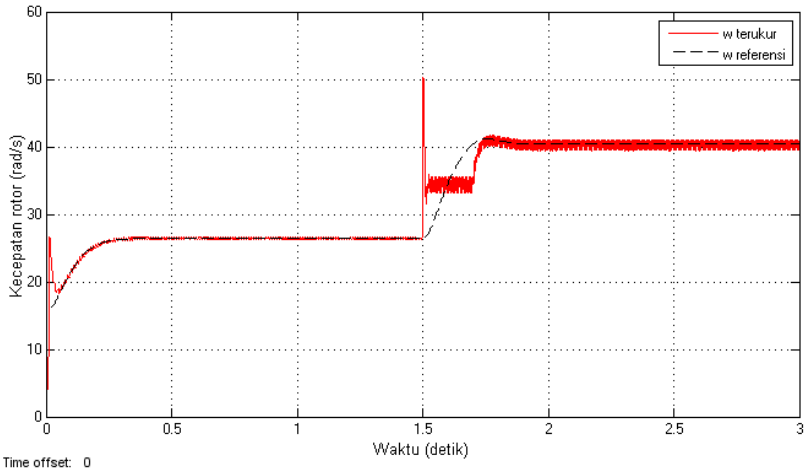
Tracking setpoint yang didapatkan dari pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.8 untuk kecepatan angin naik dan Gambar 4.9 untuk kecepatan angin turun.

Tabel 4.4 Performansi *Tracking* Kecepatan Rotor pada *Supervisory Control* dan Kontroler MPPT

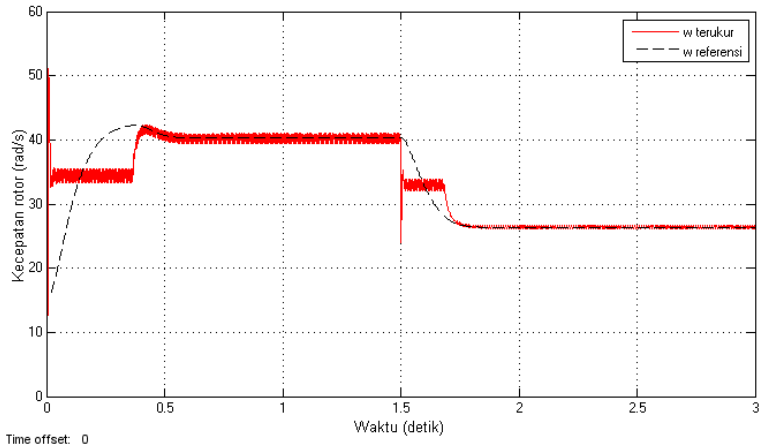
Kecepatan Angin (m/s)	Jenis Pengendalian	Karakteristik Respon			
		Rise time (detik)	Settling time (detik)	Overshoot (%)	Ess
5 ke 9	MPPT	0.02185	0.0296	0.966	1.718
	Supervisory Control	0,01417	0,3	0,681	0,01709
9 ke 5	MPPT	0.0141	0.0254	0,821	0.763
	Supervisory Control	0,00575	0,88	26,86	0,0402

Tabel di atas menunjukkan respon yang diperoleh dari pengujian menggunakan *supervisory control* dan kontroler MPPT. Karakteristik responnya dapat dilihat dari nilai *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot*, dan *error steady state* (Ess). Nilai *settling time* yang dihasilkan *supervisory control* cukup kecil, begitu pula yang dihasilkan oleh kontroler MPPT, yang berarti *supervisory control* dan kontroler MPPT mampu memberikan respon yang cepat. Pengujian menggunakan perubahan kecepatan angin naik menghasilkan respon *overshoot* yang tidak melebihi *maximum overshoot* yang diperbolehkan ($\leq 25\%$), yaitu sebesar 0,681% untuk *supervisory control* dan 0,966% untuk kontroler MPPT. Hal ini berarti pengujian menggunakan kecepatan angin tersebut tidak akan merusak sistem kerja generator. Pada saat pengujian menggunakan perubahan kecepatan angin turun menghasilkan respon *overshoot* 0,821% untuk kontroler MPPT,

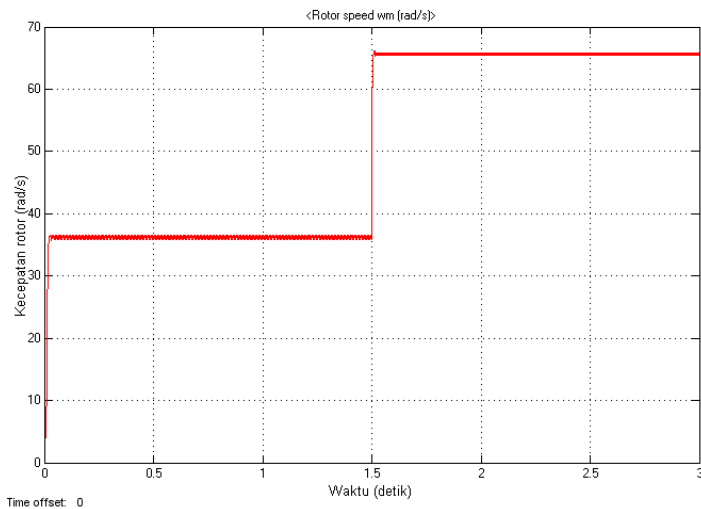
namun pada *supervisory control* menghasilkan respon *overshoot* yang melebihi *maximum overshoot* yang diperbolehkan, yaitu 26,86%. Hal ini disebabkan oleh karakteristik dari sistem turbin angin, yaitu kecepatan rotor memiliki respon *overshoot* yang tinggi. Gambar 4.9 menunjukkan respon kecepatan rotor oleh *supervisory control* yang terlalu tinggi disesuaikan oleh setpoint dengan menurunkan dan menyesuaikan kecepatan rotor tersebut agar tidak terjadi kerusakan pada sistem kerja generator, serta kerjanya sesuai dengan karakteristik sistem turbin angin.



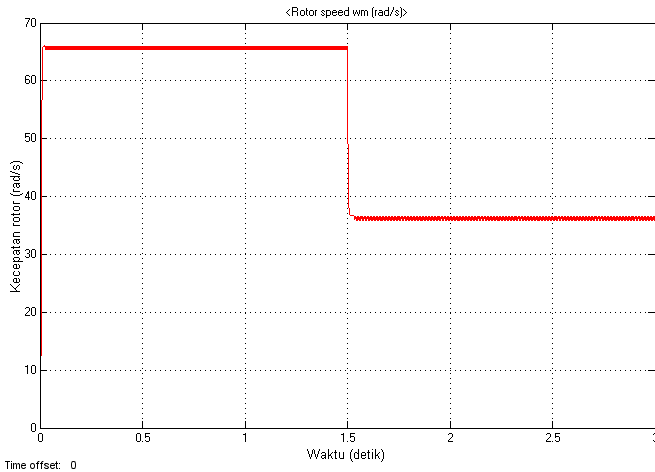
Gambar 4.8 *Tracking* setpoint oleh *supervisory control* pada kecepatan angin naik dari 5 m/s ke 9 m/s



Gambar 4.9 *Tracking setpoint oleh supervisory control pada kecepatan angin turun dari 9 m/s ke 5 m/s*



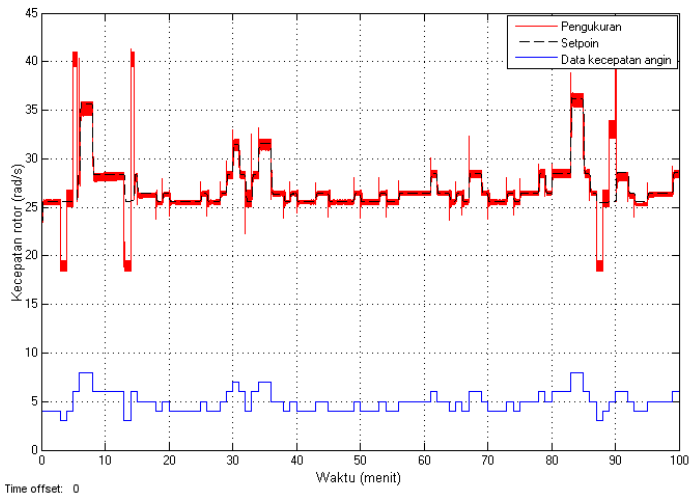
Gambar 4.10 *Performansi kontroler MPPT pada kecepatan angin naik dari 5 m/s ke 9 m/s*



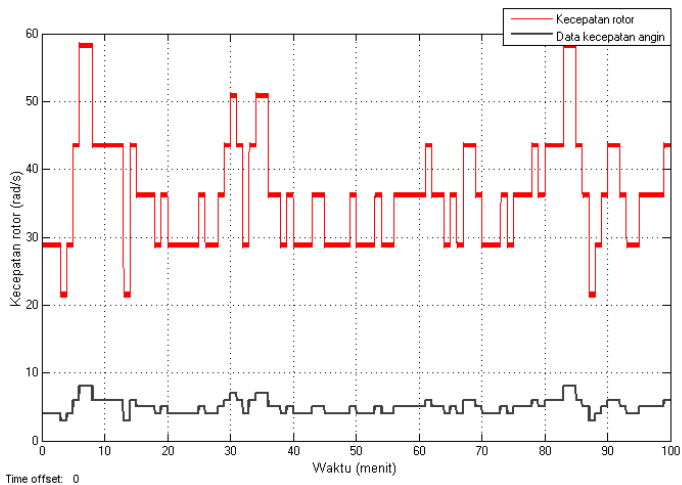
Gambar 4.11 Performansi kontroler MPPT pada kecepatan angin turun dari 9 m/s ke 5 m/s

4.5 Implementasi *Supervisory Control* dan Kontroler MPPT menggunakan Data Kecepatan Angin Harian Wilayah Jawa Timur

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui performansi sistem turbin angin yang dilengkapi *supervisory control* dan kontroler MPPT dalam mengendalikan respon kecepatan rotor turbin angin menggunakan data kecepatan angin harian wilayah Jawa Timur. Pengujian ini dilakukan dengan memasukkan data kecepatan angin harian wilayah Jawa Timur ke dalam simulink. Data kecepatan angin yang dimasukkan berupa data rata-rata kecepatan angin setiap 10 menit sebanyak 100 data. Gambar 4.12 adalah hasil *tracking* setpoint dari pengujian yang dilakukan menggunakan *supervisory control*. Gambar 4.13 hasil pengujian menggunakan kontroler MPPT.

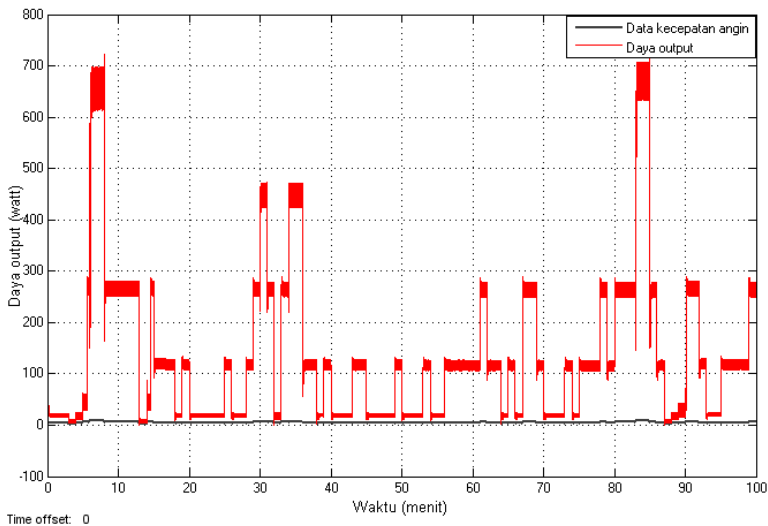


Gambar 4.12 *Tracking* setpoint oleh *supervisory control* pada data kecepatan angin harian wilayah Jawa Timur



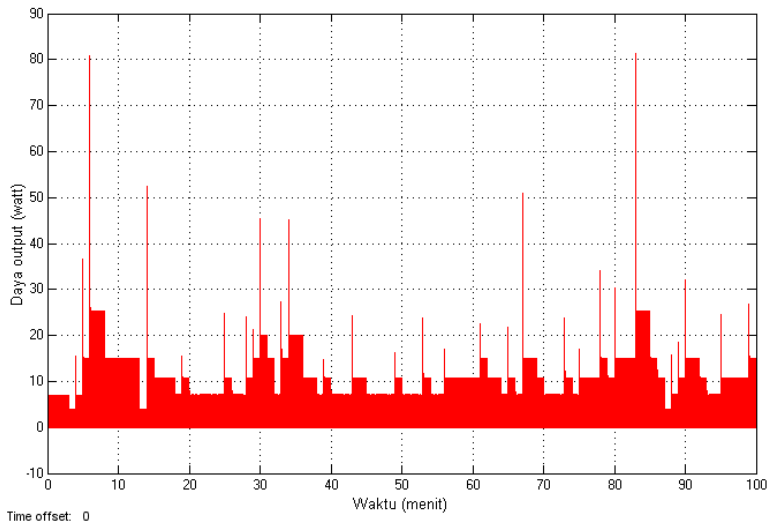
Gambar 4.13 Kecepatan rotor oleh kontroler MPPT pada data kecepatan angin harian wilayah Jawa Timur

Hasil *tracking* setpoint menunjukkan *supervisory control* dapat bekerja dengan baik yaitu rotor dapat berputar sesuai dengan setpoint yang diberikan. Namun setpoint tidak bekerja dengan baik saat kecepatan angin 3 m/s, karena sistem turbin angin dapat bekerja dengan baik pada rentang kecepatan angin 4 m/s sampai 9 m/s. Performansi kontroler MPPT pada Gambar 4.13 menghasilkan kecepatan rotor yang lebih tinggi daripada kecepatan rotor yang dihasilkan oleh *supervisory control*.



Gambar 4.14 Daya keluaran oleh *supervisory control* pada data kecepatan angin harian wilayah Jawa Timur

Gambar 4.14 menunjukkan daya keluaran yang dihasilkan sistem turbin angin menggunakan *supervisory control* sangat tinggi sesuai dengan kecepatan angin yang ada, sedangkan kontroler MPPT menghasilkan daya keluaran yang sangat rendah yang ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Daya keluaran oleh kontroler MPPT pada data kecepatan angin harian wilayah Jawa Timur

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB V

PENUTUP

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Kontroler PI yang tersusun *cascade* mampu menangani perilaku nonlinier turbin angin, sehingga didapatkan respon yang baik, yaitu menghasilkan *error* mendekati nol sebesar 0,01709 untuk nilai terkecil.
- b. Algoritma *extremum seeking* yang terdapat pada *supervisory level* mampu menghasilkan nilai kecepatan generator optimum. Torsi generator disesuaikan dari nilai kecepatan turbin angin (ω) yang didapat, sehingga mampu menghasilkan daya listrik maksimum sebesar 853,4 watt pada kondisi angin 9 m/s.
- c. Performansi *supervisory control* jauh lebih baik dibandingkan dengan performansi kontroler MPPT karena *supervisory control* berhasil meningkatkan daya keluaran listrik secara maksimal dari turbin angin skala kecil dengan mempertahankan nilai C_p optimal sebesar 0,5 untuk nilai C_p terbesar. Sedangkan kontroler MPPT tidak mampu meningkatkan daya keluaran listrik dengan baik karena C_p yang dihasilkan kecil (0,1913 untuk nilai terbesar) akibat kecepatan rotor tinggi dan torsi generator tidak dikontrol.
- d. *Supervisory control* berhasil memaksimalkan ekstraksi daya keluaran dari sistem turbin angin saat diuji menggunakan profil kecepatan angin wilayah Jawa Timur saat kecepatan angin rata-rata 9 m/s dengan daya keluaran sebesar 853,4 watt, sedangkan kontroler MPPT menghasilkan daya sebesar 134,8 watt.

“Halaman ini memang dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Liu, Y., Wang, Z., Xiong, L., Wang, J., Jiang, X., Bai, G., Li, R., and Liu, S., 2018. "DFIG Wind Turbine Sliding Mode Control with Exponential Reaching Law Under Variable Wind Speed". **Electrical Power and Energy Systems** 96, 253-260.
- Marnoto, T., 2010. "Peningkatan Effisiensi Kincir Angin Poros Vertikal melalui Sistem Buka-tutup Sirip pada 3 Sudu". Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Pembangunan Nasional Veteran, Yogyakarta.
- Yuan, Y., Tang, J., 2017. "On Advanced Control Methods toward Power Capture and Load Mitigation in Wind Turbines". **Engineering** 3, 494-503.
- Kusiak, A., dan Zheng , H., 2010. "Optimization of Wind Turbine Energy and Power Factor with An Evolutionary Computation Algorithm". **Energy** 35, 1:1324-1332.
- Armaditya, T., Suryoatmojo, H., dan Yuwono, T., 2012. "*Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Variable Speed Wind Turbine (VSWT) dengan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) menggunakan Switch Mode Rectifier (SMR)*". **Jurnal Teknik POMITS** 1, 1:1-6.
- Pratap, B., Singh, N., dan Kumar, V., 2017. "Robust Control of Variable Speed Wind Turbine Using Quasi Sliding Mode Approach". **6th International Conference on Smart Computing and Communication**. Kurukshetra, India, December 7-8.
- Abdolghani, N., Milimonfared, Jafar., Gharehpetian, G. B., 2012. "A Direct Torque Control Method for CSC Based PMSG Wind Energy Conversion Systems". **International**

- Conference on Renewable Energies and Power Quality (icrepq'12)**. Santiago de Compostela, Spain, March 28-30.
- Liu, S. J., dan Krstic, M., 2012. "Stochastic Averaging and Stochastic Extremum Seeking". **Communication and Control Engineering**. London: Springer-verlag.
- Wang, L., dan Gao, R. X., 2006. **Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing**. London: Springer-Verlag London Limited.
- Darmawan, H., & Ibnu Kahfi Bachtiar ST, M. (2014). PERANCANGAN TURBIN ANGIN TIPE SAVONIUS L SUMBU VERTIKAL.
- Gunarto, R. N., Sarwono, E., 2016. "Study Eksperimental Berbagai Macam Jenis Sudu Turbin Angin Sumbu Horisontal Skala Laboratorium". Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Pontianak (UMP).
- T. Nurwati, "Perancangan Pengendali Knowledge Base MIMO pada Turbin Angin," *EECCIS*, vol. IV, no. 2, pp. 30-36, 2010.
- L. Wang and R. X. Gao, "Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing," Springer-Verlag London Limited, London, 2006.
- R. Garduno-Ramirez and K. Y. Lee, "Compensation of control-loop interaction for power plant wide-range operation," *Control Engineering Practice*, vol. XIII, no. 12, pp. 1475-1487, 2005.
- A. Kusiak, Z. Song and H. Zheng, "Anticipatory Control of Wind Turbines With Data-Driven Predictive Models," *IEEE Transactions On Energy Conversion*, vol. 24, no. 3, pp. 766-774, 2009.

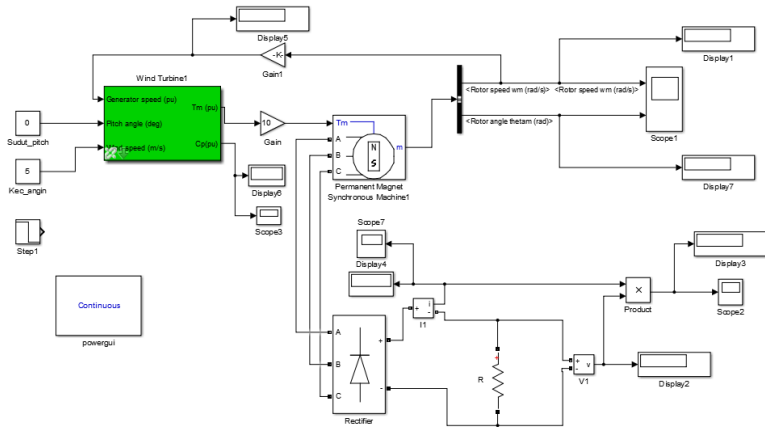
- A. Kusiak and H. Zheng, "Optimization of wind turbine energy and power factor with an evolutionary computation algorithm," *Energy*, vol. 35, p. 1324–1332, 2010.
- M. M. Hand and M. J. Balas, "Systematic Controller Design Methodology for Variable-Speed Wind Turbines," National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2002.
- Monteiro, V., Pinto, J.G., Exposto, B., and Afonso, J.L., 2015. "Comprehensive Comparison of A Current-Source and A Voltage-Source Converter for Three-Phase EV Fast Battery Chargers". ALGORITMI Research Centre, University of Minho, Guimaraes, Portugal.
- Manwell, J. G. (2009). *Wind Energy Explained* (2nd ed.). Chicester, USA: John Wiley & Sons Ltd.
- Zaini, H. J., 2016. "Implementasi Maximum Power Point Tracker (MPPT) pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Metode Perturb and Observe". Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Rukslin. "Desain Pengaturan Pitch Angle pada Turbin Angin dengan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) Berbasis Metode Ziegler-Nichols," *Jurnal INTAKE*, Vol. 6, ISSN. 2087-4286, 2015.
- Chapman, S. J. (2005). *Electric Machinery Fundamentals* (4th ed.). New York, USA: McGraw-Hill.
- Ummah, A.M., 2018. "*Supervisory Control* untuk Pengendalian Kecepatan Turbin Angin". Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

“Halaman ini memang dikosongkan”

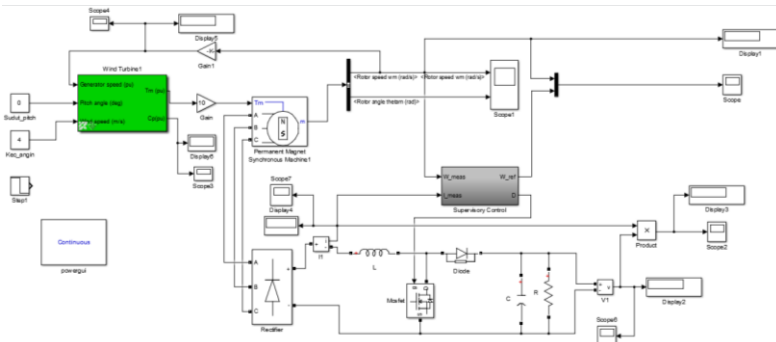
LAMPIRAN A

SIMULINK SISTEM TURBIN ANGIN PADA MATLAN R2014A

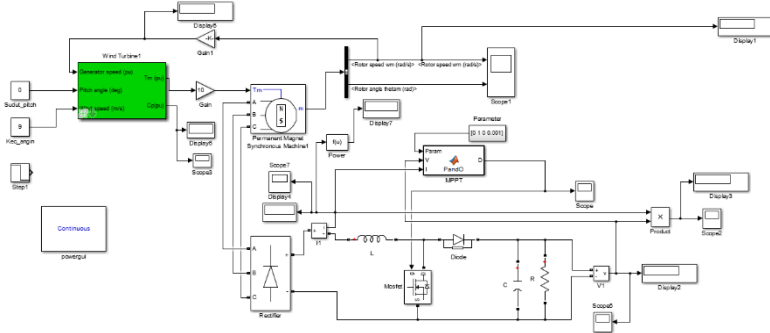
A.1 Sistem Turbin Angin Tanpa Kontroler



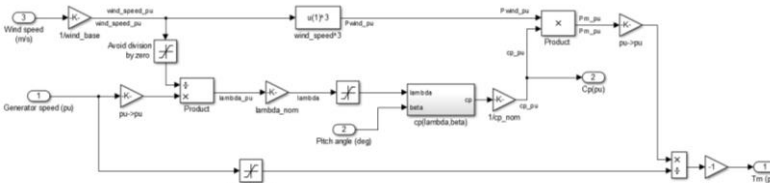
A.2 Sistem Turbin Angin Menggunakan *Supervisory Control*



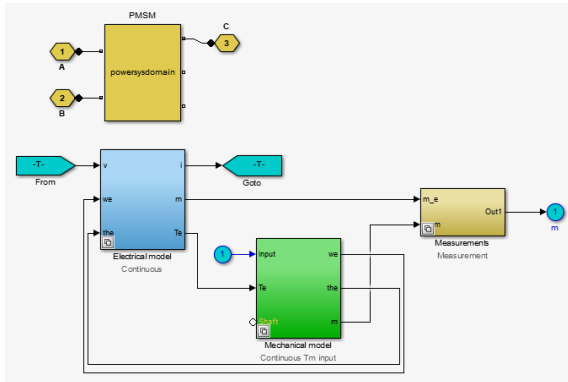
A.3 Sistem Turbin Angin Menggunakan Kontroler MPPT



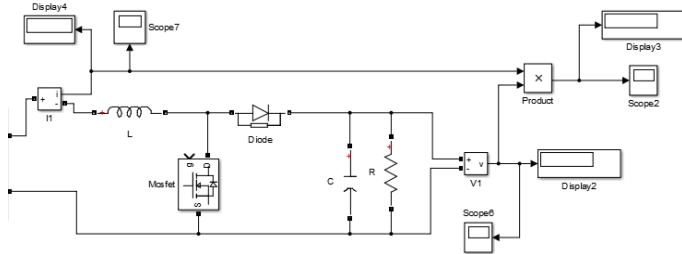
A.4 Model Aerodinamik dari Sistem Turbin Angin



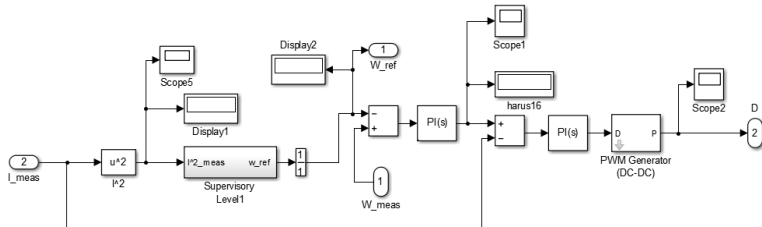
A.5 Model Permanent Magnet Synchronous Generator



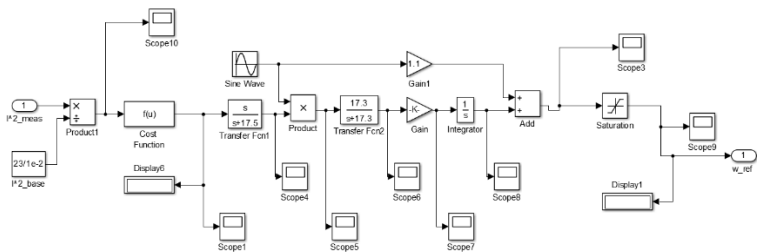
A.6 Model Boost Converter



A.7 Sistem Pengendalian Kecepatan Turbin Angin



A.8 Model Supervisory Level



“Halaman ini memang dikosongkan”

LAMPIRAN B
SCRIPT ALGORITMA PERTURB AND OBSERVER
UNTUK SIMULASI SISTEM TURBIN ANGIN
MENGGUNAKAN PENGENDALIAN MPPT PADA
MATLAB R2014A

```
function D = PandO (Param, V, I)
% MPPT menggunakan algoritma Perturb & Observe
% D output = Duty cycle dari boost converter
% (antara 0 sampai 1)
% Enabled input = 1 to enable the MPPT
controller
% V input = Wind voltage (V)
% I input = Wind current (A)
% Param input:
Dinit = Param(1); % Nilai inisial untuk keluaran
D
Dmax = Param(2); % Nilai maksimum D
Dmin = Param(3); % Nilai minimum D
deltaD = Param(4); % Increment value used to
increase/decrease the duty cycle D
% (increasing D = decreasing Vref)
persistent Vold Pold Dold;
if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;
if dP > 0
    if dV > 0
        D = Dold + deltaD;
    else
        D = Dold - deltaD;
    end
else
end
```

```
        if dV > 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    end

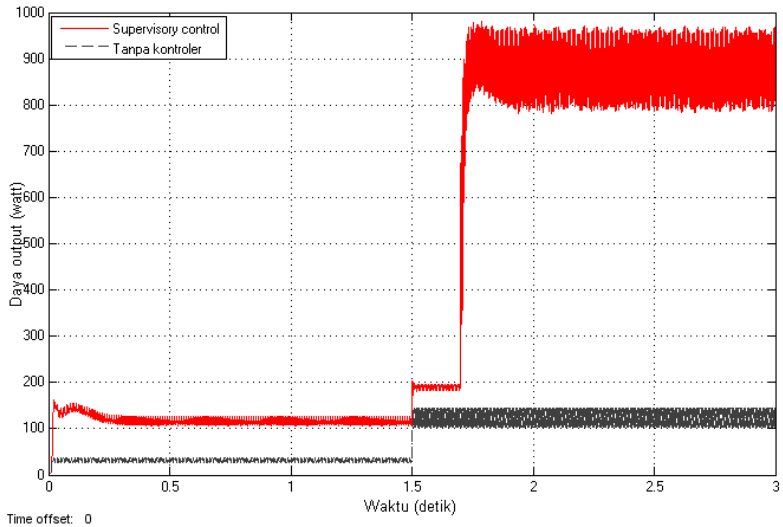
    if D >= Dmax || D <= Dmin
        D=Dold;
    end
    Dold=D;
    Vold=V;
    Pold=P;
```


LAMPIRAN C

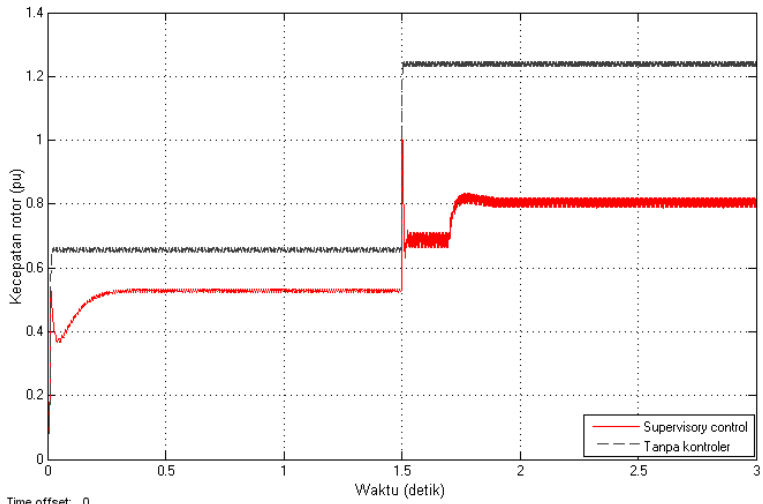
GRAFIK KOMPARASI SISTEM TURBIN ANGIN MENGUNAKAN SUPERVISORY CONTROL TERHADAP SISTEM TURBIN ANGIN TANPA PENGENDALIAN

C.1 Pada Kecepatan Angin 5 m/s ke 9 m/s

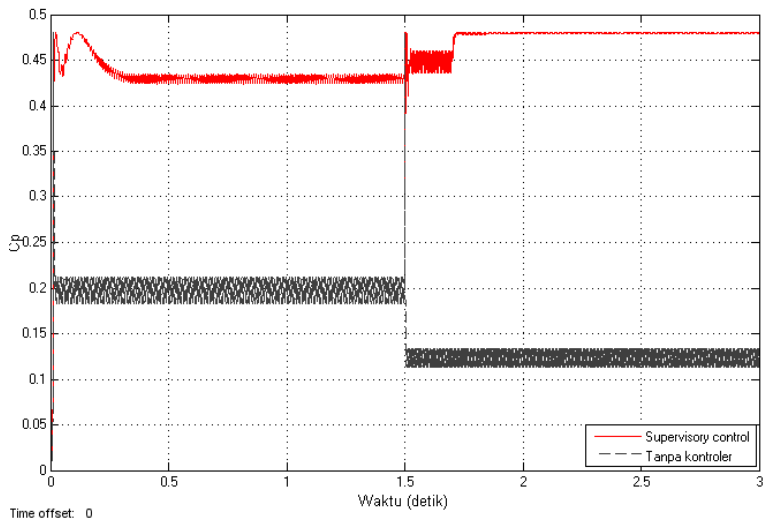
- Grafik Daya Keluaran



- Grafik Kecepatan Rotor Turbin Angin

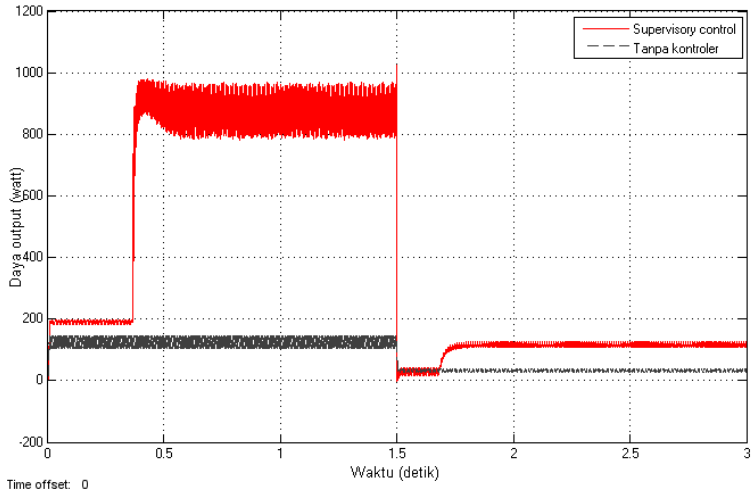


- Grafik Koefisien Daya

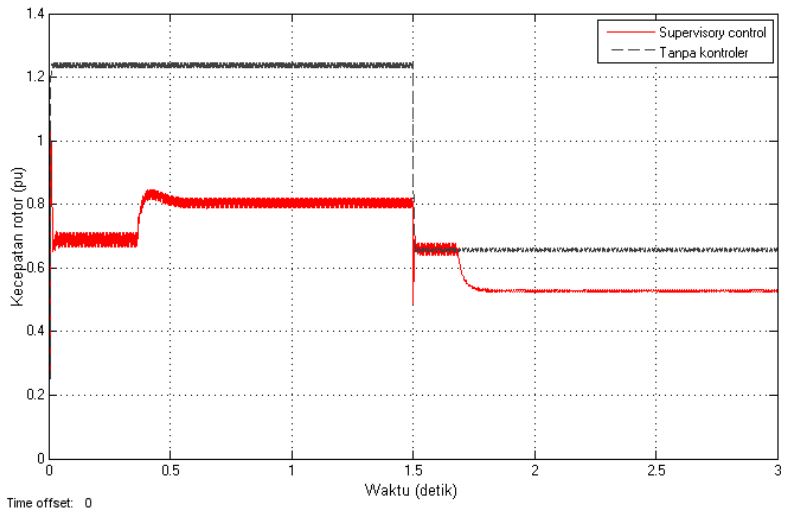


C.2 Pada Kecepatan Angin 9 m/s ke 5 m/s

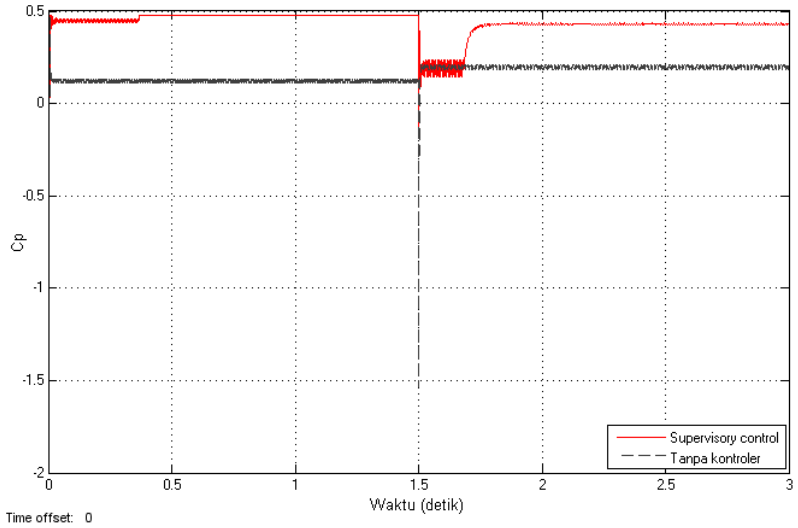
- Grafik Daya



- Grafik Kecepatan Rotor Turbin Angin



- Grafik Koefisien Daya

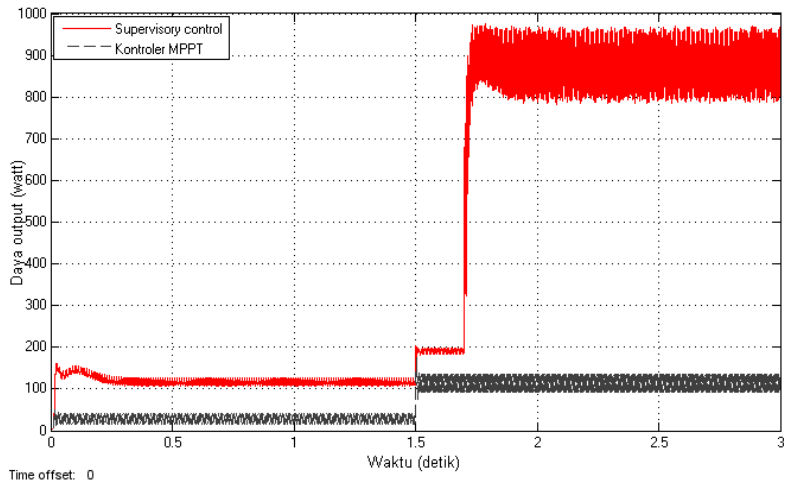


LAMPIRAN D

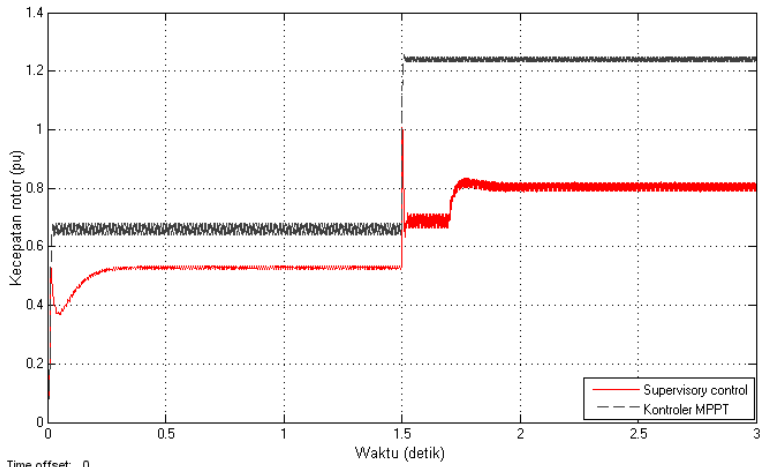
GRAFIK KOMPARASI SISTEM TURBIN ANGIN MENGUNAKAN SUPERVISORY CONTROL TERHADAP SISTEM TURBIN ANGIN MENGUNAKAN PENGENDALIAN MPPT

D.1 Pada Kecepatan Angin 5 m/s ke 9 m/s

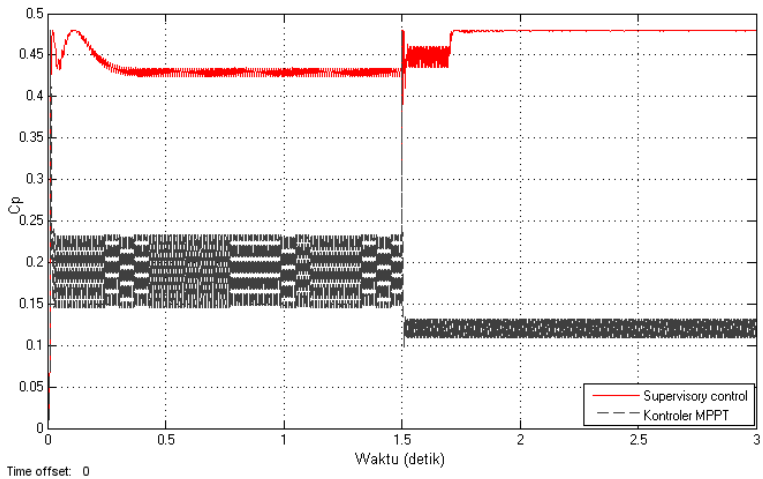
- Grafik Daya



- Grafik Kecepatan Rotor Turbin Angin

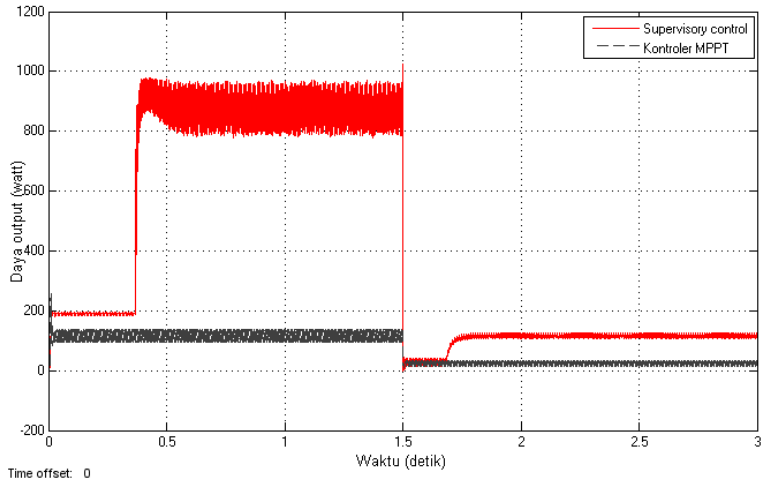


- Grafik Koefisien Daya

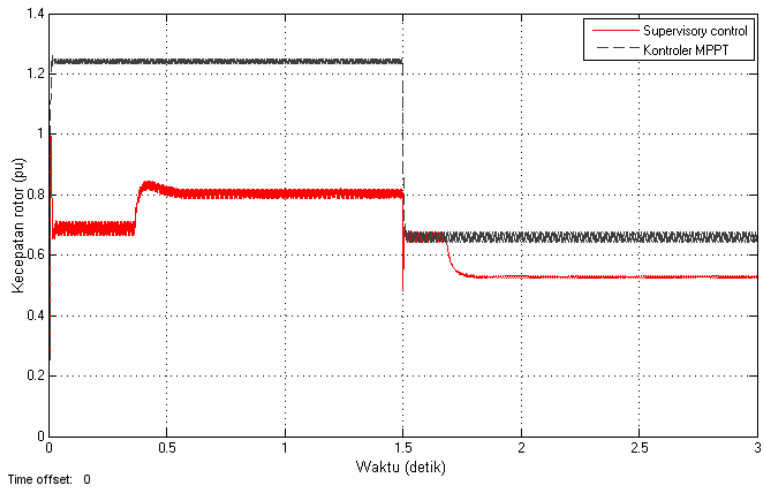


D.2 Pada Kecepatan Angin 9 m/s ke 5 m/s

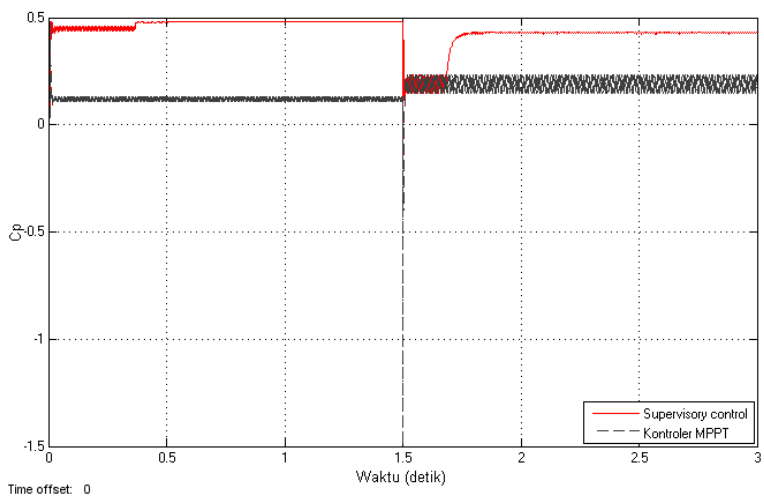
- Grafik Daya



- Grafik Kecepatan Rotor Turbin Angin



- Grafik Koefisien Daya



BIODATA PENULIS



Penulis bernama Roni Harianto dilahirkan di Lumajang, 20 Juli 1995. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN Senduro 2 pada tahun 2008, SMPN 1 Senduro pada tahun 2011, SMAN 2 Lumajang pada tahun 2014, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang, melalui jalur SNMPTN 2014. Penulis memiliki pengalaman program *intership* selama satu bulan di PT Dirgantara Indonesia, Bandung.

Pada bulan Juli 2018 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Implementasi *Supervisory Control* untuk Pengendalian Kecepatan Turbin Angin Menggunakan Metode *Direct Torque Control* Berbasis *Boost Converter***. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi melalui *email*: roniharianto95@gmail.com .