



TUGAS AKHIR - TF 181801

**EKSTRAKSI DAYA MAKSIMUM PADA
PHOTOVOLTAIC DAN TURBIN ANGIN
MENGUNAKAN ALGORITMA *MAXIMUM
POWER POINT TRACKING (MPPT)*
DENGAN METODE *PERTURB AND
OBSERVE (P&O)* UNTUK PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA HIBRIDA**

ASMA'UL HUSNA
NRP. 0231154000056

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

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019

“Halaman ini memang dikosongkan”



FINAL PROJECT - TF 181801

**MAXIMUM POWER EXTRACTION ON
PHOTOVOLTAIC AND WIND TURBINE USING
MAXIMUM POWER POINT TRACKING
ALGORITHM WITH PERTURB AND OBSERVE
METHOD ON HYBRID POWER PLANT**

Asma'ul Husna
NRP. 02311540000056

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

ENGINEERING PHYSICS DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya
2019

“Halaman ini memang dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Asma'ul Husna
NRP : 0231154000056
Departemen/Prodi : Teknik Fisika/S-1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Ekstraksi Daya Maksimum Pada *Photovoltaic* dan Turbin Angin Menggunakan Algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) Dengan Metode *Perturb And Observe* (P&O) untuk Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida” 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 dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 31 Juli 2019
Yang membuat pernyataan,

Asma'ul Husna
NRP. 0231154000056

“Halaman ini memang dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**EKSTRAKSI DAYA MAKSIMUM PADA *PHOTOVOLTAIC*
DAN TURBIN ANGIN MENGGUNAKAN ALGORITMA
MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) DENGAN
METODE PERTURB AND OBSERVE (P&O) UNTUK
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HIBRIDA**

Oleh :

Asma'ul Husna

NRP. 02311540000056

Surabaya, 30 Juli 2019

Menyetujui,
Dosen Pembimbing


Dr. Bambang Lelono W. S.T., M.T

NIP. 19690507 199512 1 001

Mengetahui,
Kepala Departemen Teknik Fisika FTI-ITS



vii

vii

“Halaman ini memang dikosongkan”

**EKSTRAKSI DAYA MAKSIMUM PADA *PHOTOVOLTAIC*
DAN TURBIN ANGIN MENGGUNAKAN ALGORITMA
MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) DENGAN
METODE PERTURB AND OBSERVE (P&O) UNTUK
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HIBRIDA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Program Studi S-1 Teknik Fisika
Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Asma'ul Husna

NRP. 0231154000056

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T, M.T.....(Pembimbing)
2. Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.....(Penguji I)
3. Ir. Ya'umar, M.T.....(Penguji II)
4. Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T.....(Penguji III)

“Halaman ini memang dikosongkan”

**EKSTRAKSI DAYA MAKSIMUM PADA *PHOTOVOLTAIC*
DAN TURBIN ANGIN MENGGUNAKAN ALGORITMA
MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) DENGAN
METODE *PERTURB AND OBSERVE* (P&O) UNTUK
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HIBRIDA**

Nama : Asma'ul Husna
NRP : 0231154000056
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.

Abstrak

Turbin angin dan *photovoltaic* sebagai teknologi konversi energi angin dan energi matahari masih memiliki banyak kendala yakni ketergantungan teknologi konversi tersebut terhadap cuaca dan lingkungan sehingga menjadikan daya yang dihasilkan tidak dapat maksimal dan tidak stabil. Oleh karena itu, pada Tugas Akhir ini dirancang mekanisme pemaksimalan daya keluaran dari turbin angin dan *photovoltaic* yakni menggunakan algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dengan metode *Perturb and Observe* (P&O) dengan *battery controller* sebagai penstabil daya keluaran sistem pembangkit sehingga didapatkan daya yang maksimal dan stabil. Sistem pengendalian tersebut tersusun atas algoritma MPPT pada masing-masing turbin angin dan *photovoltaic* yang dikendalikan oleh kontroler PI dan *battery controller*. Algoritma MPPT bekerja untuk menjejak arus dan tegangan maksimum pada masing-masing nilai irradiansi matahari, suhu permukaan sel, dan kecepatan angin. Sedangkan kontroler PI berfungsi untuk mengatur bukaan (*gate*) pada mosfet di DC-DC multi-input *Buck-Boost* konverter untuk mengalirkan arus dari turbin angin dan *photovoltaic* ke konverter yang kemudian daya keluaran konverter dikendalikan oleh *battery controller* untuk distabilkan. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan,

pada *photovoltaic* kontroler MPPT dapat menghasilkan daya keluaran pada irradiansi terbesar 1050,59 W/m² dan kecepatan angin 6 m/s sebesar 60 Watt dibandingkan tanpa kontroler sebesar 47,15 Watt. Pada turbin angin, Kontroler MPPT mampu menghasilkan daya keluaran pada kecepatan angia 8 m/s dan irradiansi matahari 838,63 W/m² sebesar 116,65 Watt dibandingkan tanpa kontroler dengan daya keluaran terbesar sebesar 17,32 Watt. Daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh kontroler MPPT yakni sebesar 134,4 Watt dibandingkan tanpa kontroler sebesar 46,2 Watt pada irradiansi matahari 1050,59 W/m² dan kecepatan angin 6 m/s. *Battery controller* dapat menstabilkan tegangan keluaran DC-DC Konverter Buck-Boost dengan nilai *error steady state* (ess) sebesar 0,27% dan *maximum overshoot* (Mp) sebesar 18,94% serta error rata-rata *battery controller* sebesar 8,59%.

Kata Kunci : photovoltaic, turbin angin, MPPT, battery controller

**MAXIMUM POWER EXTRACTION ON PHOTOVOLTAIC
AND WIND TURBINE USING MAXIMUM POWER POINT
TRACKING ALGORITHM WITH PERTURB AND OBSERVE
METHOD ON HYBRID POWER PLANT**

Name : *Asma'ul Husna*
NRP : *0231154000056*
Department : *Teknik Fisika FTI-ITS*
Supervisor : *Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.*

Abstract

Wind turbines and photovoltaics as wind energy conversion technologies and solar energy still have many obstacles. The dependence of the conversion technology on the weather and environment makes the power produced cannot be maximal and unstable. Therefore we need a maximizing mechanism for the output power of wind turbines and photovoltaic using the Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm with the Perturb and Observe (P & O) method with a battery controller as the generator system output power stabilizer so that the maximum and stable power is obtained. The control system is composed of MPPT algorithms on each wind and photovoltaic turbine which is controlled by the PI controller and battery controller. The MPPT algorithm works to track the maximum current and voltage at each solar irradiance value, solar cell, and wind speed while the PI controller functions to set the openings (gate) on the mosfet in the multi-input dc-dc Buck Boost Converter to drain current from the wind turbine and photovoltaic to the converter, then the output power of the converter is controlled by the battery controller to stabilize it. Based on the results of the research that has been done, on photovoltaic the MPPT controller is able to produce at the largest sun irradiance on 1050,59 W/m² and wind speed on 6 m/s as amount 60 Watts compared with no controller as amount 47,15 Watts. On wind turbines, the MPPT controller is able to produce the largest output power at speed of 8 m/s and sun irradiance on

838,63 W/m² are 116.65 Watts compared to without controllers with the largest output power of 17.32 Watts. The battery controller can stabilize the DC-DC output voltage of the Buck-Boost Converter with a steady state error value of 0.27% and a maximum overshoot (Mp) of 18.94% and an average error of the battery controller of 8.59%.

Keywords : *photovoltaic, wind turbine, MPPT, battery controller*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji dan syukur atas ke hadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Baginda Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **“EKSTRAKSI DAYA MAKSIMUM PADA PHOTOVOLTAIC DAN TURBIN ANGIN MENGGUNAKAN ALGORITMA MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) DENGAN METODE PERTURB AND OBSERVE (P&O) UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HIBRIDA”**.

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

1. Kedua orang tua H. Nur Yatim dan Solichatin serta saudara-saudari saya, Khoirun Nisa', Amirul Hasan dan Muhammad Agus Salim Romadlon, terimakasih telah tiada hentinya mendoakan penulis dan memberikan cinta dan kasih sayang baik secara moril dan materil serta semangat yang tak ada habisnya.
2. 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.
3. Bapak Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, nasihat, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
4. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku dosen penguji dan kepala laboratorium Fisika Rekayasa yang telah dengan

sabar memberikan ilmu, petunjuk serta membimbing saya selama masa perkuliahan dan pengerjaan Tugas Akhir.

5. Bapak Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc selaku dosen wali penulis yang telah dengan sabar membimbing penulis selama perkuliahan.
6. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar serta seluruh civitas akademik di Departemen Teknik Fisika – ITS.
7. Seluruh teman penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir, Putri, Ismi, Retno, Fikri, Hilman, Alan, Zanuvar, Ananta, Gagas, Mas Haryo, Mas Satria, Mbak Putri S2, Mbak Ajeng, dkk. Terimakasih atas bantuan, kerjasama dan semuanya.
8. Seluruh asisten Laboratorium Fisika Rekayasa dan teman-teman Teknik Fisika angkatan 2015 yang selalu memberikan semangat dan bantuan pada penulis.
9. Seluruh sahabat-sahabati PMII Sepuluh Nopember yang telah memberi semangat, hiburan, bantuan, dan doa selama pengerjaan Tugas Akhir.
10. Mas Muhammad Ja'far Ubaidillah, S.ST, Mas Akhmad Ibnu Hija, S.T, Mas Faris Hartono, S.T dan Deden Mahendra Wijaya, S.T yang telah banyak membantu penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu

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, 31 Mei 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN I	vii
LEMBAR PENGESAHAN II Error! Bookmark not defined.	
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	4
BAB II TEORI PENUNJANG.....	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida	5
2.2 Multi-input DC-DC Converter.....	20
2.3 <i>Maximum Power Point Tracking (MPPT)</i>	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Prosedur Umum Penelitian	25
3.3 Pembuatan Model Sistem Turbin Angin.....	31
3.3 Perancangan <i>Multi-input DC-DC Converter</i>	34
3.4 Perancangan Sistem Kontrol PI	38
3.5 Perancangan Algoritma MPPT (<i>Maximum Power Tracking</i>).....	39
3.6 Perancangan <i>Battery Controller</i> dan Kontroler PI.....	42
3.7 Uji Performansi Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida ..	44

3.8	Diagram Blok Sistem Penelitian Secara Keseluruhan.	44
BAB IV	ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	47
4.1	Hasil Pemodelan <i>Photovoltaic</i> MSX120.	47
4.2	Analisa <i>Multi-input</i> DC-DC Converter.	50
4.3	Analisa Implementasi Algoritma MPPT (Maximum Power Point Tracking) pada <i>Multi-input</i> DC-DC Converter.	55
4.4	Analisa Tegangan Keluaran Multi-input DC-DC Konverter.	68
4.5	Analisa Penstabilan Keluaran Tegangan pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida	71
BAB V	PENUTUP	77
5.1	Kesimpulan	77
5.2	Saran.	77
DAFTAR PUSTAKA		79
LAMPIRAN		79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Struktur pembentuk sel surya cells (Villalva, Gazoli, & Filho, 2009)	6
Gambar 2. 2 Rangkaian elektrik pada sel surya secara umum (Broujeni & Fathi, 2013)	8
Gambar 2.3 Komponen turbin angin (Manwell J. G., Wind Energy Explained, 2009).....	14
Gambar 2.4 Hubungan antara kecepatan angin, kecepatan rotor turbin angin dan daya turbin angin (Nurwati, 2010)	18
Gambar 2. 5 Konfigurasi sirkuit multiinput buck boost PCSC (Li, dkk., 2010).....	21
Gambar 2. 6 Karakteristik keluaran daya-kecepatan pada turbin angin (Ram & Rajasekar, 2017)	22
Gambar 2. 7 Karakteristik Daya MPP (<i>Maximum Power Point</i>)	23
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	27
Gambar 3. 2 Rangkaian ekivalen multi-input DC-DC converter	35
Gambar 3. 3 Diagram blok sistem kontrol PI pada <i>photovoltaic</i>	39
Gambar 3. 4 Diagram blok implementasi algoritma MPPT pada plant photovoltaic	39
Gambar 3. 5 Diagram blok implementasi algoritma MPPT pada plant turbin angin.....	40
Gambar 3. 6 Diagram alir MPPT dengan metode P&O pada <i>photovoltaic</i> (Chen, Liu, Hung, & Cheng, 2007) .	41
Gambar 3. 7 Diagram alir MPPT dengan metode P&O pada turbin angin (Zaini, 2016).....	42
Gambar 3. 8 Diagram blok sistem penstabil tegangan keluaran	43

Gambar 4. 1	Respon uji open loop photovoltaic kurva P-V	47
Gambar 4. 2	Respon uji open loop photovoltaic kurva I-V	47
Gambar 4. 3	Respon arus output photovoltaic pada uji closed loop saat terjadi perubahan kecepatan angin	53
Gambar 4. 4	Respon arus output generator turbin angin saat terjadi perubahan kecepatan angin.....	53
Gambar 4. 5	Respon daya output multi-input Buck-Boost Converter saat terjadi perubahan kecepatan angin	54
Gambar 4. 6	Respon daya output photovoltaic saat terjadi perubahan kecepatan angin dari 4 m/s ke 6 m/s ...	54
Gambar 4. 7	Respon daya turbin angin pada perubahan kecepatan angin dari 4 m/s ke 6 m/s	55
Gambar 4. 8	Tegangan keluaran multi-input konverter dengan PWM plant turbin angin konstan sebesar 0.5	56
Gambar 4. 9	Tegangan keluaran multi-input konverter dengan PWM plant photovoltaic konstan sebesar 0.5.....	57
Gambar 4. 10	Grafik perbandingan daya keluaran photovoltaic tanpa menggunakan kontroler dengan photovoltaic menggunakan kontroler MPPT	63
Gambar 4. 11	Grafik perbandingan daya output generator turbin angin saat profil kecepatan angin sesuai dengan Tabel 4.7	68
Gambar 4. 12.	Sinyal kontrol arus dari plant photovoltaic	69
Gambar 4. 13	Perbandingan nilai tegangan keluaran multi-input konverter dengan menggunakan MPPT dan tanpa kontroler.....	70
Gambar 4. 14	Perbandingan nilai arus keluaran multi-input konverter dengan menggunakan MPPT dan tanpa kontroler.....	70
Gambar 4. 15	Respon kontrol PI pada battery controller.....	74

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai parameter konstan pada sel surya (Broujeni & Fathi, 2013).....	10
Tabel 2.2 Nilai datasheet photovoltaic MSX120 (Kitson, dkk., 2017).....	10
Tabel 2.3 Nilai parameter sirkuit photovoltaic tipe MSX120 (Kitson, dkk., 2017).....	10
Tabel 3. 1 Spesifikasi Turbin Angin.....	31
Tabel 3.2 Definisi dan Nilai Berbagai Parameter pada Simulasi	32
Tabel 3.3 Parameter Turbin Angin	33
Tabel 3.4 Jenis Rotor PMSG	34
Tabel 3.5 Parameter PMSG	34
Tabel 3. 6 Nilai Parameter PV	36
Tabel 3. 7 Nilai Parameter Turbin Angin	36
Tabel 3. 8 Nilai Komponen Multi-Input Konverter Buck-Boost	37
Tabel 3. 9 Nilai Komponen Multi-Input Konverter Buck-Boost secara <i>Trial&Error</i>	38
Tabel 4. 1 Hasil pemodelan <i>photovoltaic</i> MSX120 pada setiap nilai irradiansi matahari dan suhu sel	49
Tabel 4. 2 Besar komponen penyusun multi-input DC-DC Buck-Boost konverter.....	50
Tabel 4. 3 Parameter kontroler PI pada plant Photovoltaic	52
Tabel 4. 4 Parameter kontroler PI pada <i>plant</i> Turbin Angin	52
Tabel 4. 5 Data kondisi lingkungan yang digunakan sebagai data simulasi sistem pembangkit listrik tenaga hibrida	58
Tabel 4. 6 Perbandingan daya keluaran dengan kontroler MPPT	59
Tabel 4. 7 Selisih daya photovoltaic tanpa kontroler dengan photovoltaic menggunakan kontroler MPPT	61
Tabel 4. 8 Profil kecepatan angin	64

Tabel 4. 9 Perbandingan daya keluaran turbin angin tanpa kontroler dengan daya keluaran menggunakan kontroler MPPT	65
Tabel 4. 10 Selisih daya keluaran turbin angin kontroler dan turbin angin menggunakan kontroler MPPT.....	66
Tabel 4. 11 Tabel parameter kontroler PI pada battery controller	73
Tabel 4. 12 Data keluaran battery controller	73

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia menjadi salah satu negara dengan potensi sumber energi terbarukan yang melimpah. Berdasarkan Outlook Energi Indonesia 2016 yang dikeluarkan oleh Dewan Energi Nasional (DEN) untuk sumber daya energi terbarukan surya dan angin sangat melimpah dengan kapasitas yang terpasang sangat jauh dibandingkan kapasitas totalnya. Energi surya atau panas matahari memiliki kapasitas sumber daya sebesar 4,80 kWh/m²/hari atau jika diakumulasikan sebesar 207,9 GW dibandingkan kapasitas terpasang hanya sebesar 78,5 MW. Energi angin di Indonesia memiliki kecepatan berkisar 3-6 m/s dan apabila di konversi menjadi energi listrik maka energi listrik yang dihasilkan sebesar 60 GW, dibandingkan dengan kapasitas terpasang saat ini sebesar 3,1 MW saja (DEN, 2016). Melihat potensi yang begitu besar di bidang energi baru terbarukan terutama pada bidang energi surya dan energi angin yang pemanfaatannya masih sedikit, maka penerapan pembangkit listrik tenaga hibrida menjadi solusi pemanfaatan energi surya dan energi angin di Indonesia.

Menurut Lazarov dalam Lee dkk Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH) menggunakan *renewable energy* dengan sistem hibrida dimana tersusun dari dua atau lebih dari sumber *renewable energy* yang mampu memproduksi energi, dengan kata lain terdapat dua sistem dari konversi *renewable energy* menjadi energi listrik yang beroperasi secara bersamaan (Lee, Lee, Cho, Ham, & Hong, 2017). Energi alternative yang dimanfaatkan secara bersamaan (*multisource*) mempunyai potensi yang besar untuk meningkat ke kualitas pemanfaatan energi listrik yang lebih tinggi dan lebih dapat diandalkan untuk di masyarakat dalam

pemanfaatannya daripada menggunakan satu sumber energi alternatif (*single source*) (Broujeni & Fathi, 2013).

Multi input dc-dc converter memungkinkan variasi dari beberapa sumber energy untuk dikombinasikan inputnya menggunakan satu konverter. Multi input dc-dc converter memiliki kelebihan untuk mengkombinasikan kelebihan dari beberapa sumber energi, dengan menggunakan multi input dc-dc converter mampu meningkatkan keandalan dan penggunaan dari sumber energi yang berkelanjutan. Selain itu, multi input dc-dc converter mempunyai kelebihan juga dalam menghemat komponen yang digunakan, seragam, dan kontrol yang terpusat dari pada menggunakan *single input dc-dc converter* (Tao, Katsopoulos, Duarte, & Hendrix, 2006). Multi input dc-dc *converter* yang akan diteliti kali ini berjenis *buck-boost converter* karena mampu menaik-turunkan tegangan *output* sesuai dengan beban yang akan dialiri listrik (Bae & Kwasinski, 2009).

Permasalahan menggunakan *wind turbine* dan *photovoltaic* adalah banyaknya variabel yang mempengaruhi nilai *output* dari sistem, maka perlu adanya kontrol pemaksimalan konversi energi pada *wind turbine* dan *photovoltaic* salah satunya adalah dengan algoritma MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) dengan metode P&O (*Perturbation and Observation*). *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) merupakan metode untuk mendapatkan daya maksimum pada suatu sumber daya. P&O (*Perturbation and Observation*) merupakan metode penentuan posisi daya maksimum dengan melakukan *tracking* posisi daya maksimum. Metode P&O ini terdiri dari dua tahap, *perturb* yaitu mengubah dan *observe* yaitu menghitung perubahan daya akibat aksi *perturb* sebelumnya. Jika perubahan daya positif maka *perturb* selanjutnya akan tetap pada arah yang sama, sedangkan jika perubahan daya

negatif maka *perturb* akan dibalik (Partha, Wijaya, Janardana, Budiastara, & Weking, 2016).

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh B. Mangu, dkk menggunakan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk manajemen operasi daya yang dihasilkan pembangkit listrik tenaga hibrida berupa turbin angin dan *photovoltaic*. manajemen daya dilakukan oleh masing-masing konverter DC-DC dari masing-masing sistem pembangkit yang diarahkan ke beban serta ke baterai jika daya beban sudah tercukupi (Mangu, Akshatha, & Suryanarayana, 2016). Penelitian tersebut hanya menggunakan algoritma MPPT dengan *multi-input transformer coupled bidirectional dc-dc converter* pada penerapannya, hal ini menimbulkan banyaknya biaya serta kurang praktis pada pembangkit tersebut, serta belum adanya metode pemaksimalan daya pada masing-masing sumber daya.

Bergantungnya turbin angin dan *photovoltaic* pada lingkungan memberikan dampak fluktuasinya nilai keluaran daya pada sistem PLTH yang mengakibatkan gampang rusaknya alat elektronik yang ada pada rumah tangga maupun industri ataupun pada sistem penyimpanan dalam hal ini adalah baterai, sehingga perlu adanya suatu mekanisme penstabilan output tegangan yang akan disalurkan pada baterai atau beban. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini dirancang suatu *multi input dc-dc converter* yang dikombinasikan dengan algoritma MPPT dan metode P&O untuk kedua sumber energi yaitu turbin angin dan *photovoltaic*. Tujuan yang diharapkan dengan rancangan *multi input dc-dc converter* ini adalah mampu lebih memaksimalkan potensi energi terbarukan yang ada di Indonesia dengan kontrol yang mampu untuk menghasilkan daya maksimal pada setiap sistem pembangkitnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, dapat diperoleh rumusan masalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana merancang algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dengan metode P&O (*Perturbation and Observation*) pada *Photovoltaic* dan turbin angin untuk memaksimalkan ekstraksi daya pada pembangkit listrik tenaga hibrida?
- b. Bagaimana menstabilkan output tegangan pembangkit listrik tenaga hibrida?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, maka adapun tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Merancang algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dengan metode P&O (*Perturbation and Observe*) pada *Photovoltaic* dan Turbin Angin untuk memaksimalkan ekstraksi daya pada pembangkit listrik tenaga hibrida
- b. Merancang sistem untuk menstabilkan output tegangan pembangkit listrik tenaga hibrida

1.4 Batasan Masalah

Untuk menghindari luasnya permasalahan yang dapat muncul pada saat penelitian berlangsung, maka pada tugas akhir ini ditentukan batasan permasalahan sebagai berikut.

- a. Pada penelitian ini berfokus untuk memaksimalkan daya.
- b. Ladang angin yang ditinjau memiliki *range* kecepatan angin yakni 3-9 m/s.
- c. Baterai yang digunakan berkapasitas 12 Volt, sehingga output *Battery Controller* sebesar 12 Volt.

BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida

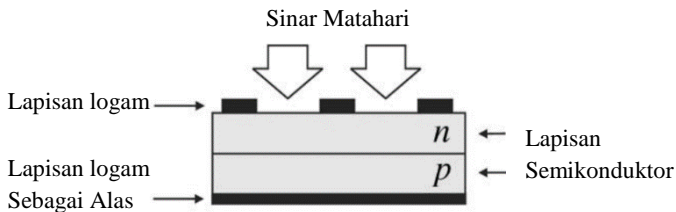
Pembangkit listrik Tenaga Hibrida (PLTH) merupakan suatu pembangkit yang mengkombinasikan beberapa penghasil sumber daya yang memiliki tipe sumber energi terbarukan yang berbeda. Hal ini bertujuan untuk mereduksi kemungkinan adanya kekurangan energi listrik (Valenciaga & Puleston, 2005). PLTH mempunyai potensi yang besar untuk memenuhi kebutuhan pelanggan yang semakin lama semakin tinggi. PLTH juga menjadi sumber energi yang reliable jika dibandingkan dengan pembangkit tunggal (Broujeni & Fathi, 2013). Banyaknya sumber yang berbeda membuat PLTH menjadi alternatif sebagai pembangkit tenaga listrik dengan energi terbarukan pada daerah terpencil dengan sumber daya alam yang melimpah. Keuntungan menggunakan PLTH daya yang dihasilkan disimpan dalam sistem penyimpanan dalam hal ini baterai, sehingga mengurangi adanya rugi-rugi daya yang dihasilkan oleh pembangkit (Nurrohim, 2012).

Pada pembangkit listrik tenaga hibrida sumber energi terbarukan yang akan digunakan pada tugas akhir ini adalah matahari dan angin, yang sangat melimpah keberadaannya terutama di Indonesia. Sistem konversi energi matahari menjadi listrik adalah dengan sel surya (*photovoltaic*), sedangkan sistem konversi energi angin menjadi listrik adalah dengan menggunakan turbin angin (*wind turbine*).

2.1.1 Sel Surya (*Photovoltaic*)

Sel Surya atau *Photovoltaic* adalah suatu sumber energi listrik yang berasal dari pemanfaatannya cahaya matahari sebagai sumber energi menjadi energi listrik (Dzulkarnain, et al., 2014). Sel surya salah satu sistem konversi energi terbarukan yang sangat

berpotensi di Indonesia, mengingat Indonesia adalah negara tropis dengan energi surya atau panas matahari memiliki kapasitas sumber daya sebesar 4,80 kWh/m²/day atau jika diakumulasikan sebesar 207,9 GW dibandingkan kapasitas terpasang hanya sebesar 78,5 MW (DEN, 2016). Menurut Sedra dan Smith dalam Villalva dkk sel surya pada dasarnya merupakan sambungan dioda semikonduktor *p-n junction* yang terpapar sinar matahari secara langsung. sel surya terdiri dari cell yang terbuat dari beberapa jenis dari semikonduktor yang berbeda dalam proses pembuatannya. Semikonduktor yang pada umumnya dijadikan sebagai *cell* pada sel surya adalah silikon. Silikon (Si) pada sel surya terdiri layer tipis film Si yang terhubung dengan terminal elektrik. Salah satu sisi dari layar Si diolah untuk membentuk *p-n junction*. Lapisan logam tipis di tempatkan pada permukaan diatas sel surya yang berhadapan langsung dengan matahari (Villalva, dkk., 2009), maka bentuk lapisan-lapisan panyusun sel surya dapat dilihat pada gambar 1 berikut.



Gambar 2. 1 Struktur pembentuk sel surya cells (Villalva, Gazoli, & Filho, 2009)

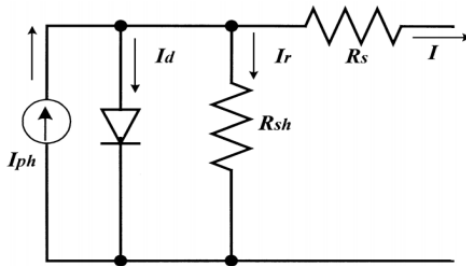
Cahaya matahari yang mengenai *cell* pada sel surya akan menghasilkan muatan yang berasal dari arus elektrik hal ini dapat terjadi jika *cell* mengalami arus pendek (Moller, 1993). Muatan dihasilkan ketika energi foton dari sinar matahari mampu untuk

mengeluarkan elektron kovalen dari semikonduktor, hal ini bergantung dengan bahan semikonduktor dan juga panjang gelombang dari sinar matahari yang mengenai permukaan semikonduktor. Pada dasarnya, fenomena sel surya dapat dideskripsikan sebagai penyerapan radiasi panas matahari, menghasilkan arus, dan perpindahan pembawa muatan pada *p-n junction* serta mengoleksi muatan elektrik pada terminal dari sel surya (Fahrenbruch & Bube, 1983). Sel surya dalam menghasilkan pembawa muatan elektrik bergantung pada *flux* dari cahaya matahari yang mengenai sel surya dan kapasitas penyerapan dari semikonduktor penyusunnya. kapasitas penyusun terutama bergantung dari besarnya nilai *bandgap* semikonduktor, yang terdapat pada permukaan cell, konsentrasi intrinsik dari pembawa muatan semikonduktor, dari mobilitas elektron, nilai rekomendasi, dari temperatur dan beberapa faktor lainnya (Villalva, dkk., 2009).

Radiasi sinar matahari tersusun dari energi-energi foton yang memiliki jumlah energi yang berbeda-beda. Energi foton yang memiliki besar energi kurang dari *bandgap* semikonduktor penyusun sel surya tidak dapat digunakan untuk mengkonversi energi dari radiasi sinar matahari menjadi tegangan maupun arus listrik. Energi foton yang besarnya melebihi energi *bandgap* semikonduktor mampu menghasilkan listrik baik tegangan maupun arus, namun hanya yang besarnya sesuai dengan besar *bandgap* tersebut, sisanya akan menjadi panas pada badan sel surya. Semikonduktor yang mempunyai besar *bandgap* rendah mempunyai keuntungan rentang spektrum dari radiasi sinar matahari yang mampu dikonversikan menjadi energi listrik lebih besar, namun tegangan yang dihasilkan lebih kecil. Si bukanlah satu-satunya semikonduktor yang digunakan untuk menyusul sel surya, bahkan bukanlah yang terbaik, namun Si mempunyai keuntungan proses fabrikasinya yang ekonomis dalam skala yang besar. Material lain mungkin memang lebih besar dalam efisiensi,

namun memiliki biaya produksi yang besar dan biaya komersialisasi yang mahal.

Pada sel surya rangkaian elektrik juga mempengaruhi hasil dari keluaran daya sel surya. Macam-macam rangkaian komponen pada sel surya tergantung pada jumlah hambatannya serta letaknya. Hambatan yang letaknya seri terhadap sumber arus dan berjumlah satu, sedangkan jenis yang lain memiliki dua hambatan yang letaknya seri serta paralel terhadap sumber arus.



Gambar 2. 2 Rangkaian elektrik pada sel surya secara umum (Broujeni & Fathi, 2013)

Berdasarkan gambar 2.2 maka persamaan karakteristik arus dan tegangan (I-V) dari sel surya adalah sebagai berikut (Moller, 1993).

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i (T - T_r)] \frac{\Sigma}{1000} \quad (2.1)$$

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left[\exp \frac{V_{oc} \cdot q}{n \cdot N_s \cdot k \cdot T} \right] - 1} \quad (2.2)$$

$$I_{sh} = \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

$$I_d = \left[\exp \left[\frac{v + \left[\frac{I \cdot R_s}{N_p} \right]}{n \cdot V_t \cdot N_s} \right] - 1 \right] (N_p \cdot I_{os}) \quad (2.4)$$

$$I = (I_{ph} \cdot N_p) - (I_d \cdot I_{sh}) \quad (2.5)$$

Dimana :

- I = Arus keluaran dari sel surya (A)
- V = Tegangan keluaran dari sel surya (Volt)
- I_{ph} = Arus yang disebabkan oleh besarnya intensitas cahaya (A)
- Σ = Irradiasi matahari (W/m²)
- q = Muatan elektron (1.6×10^{-19} C)
- T_r = Temperatur referensi (°C)
- T = Temperatur dari *cell* (°C)
- E_{go} = Besarnya *bandgap* energi dari silicon (Joule)
- K = Ketetapan Boltzman
- R_s = Besarnya hambatan pada rangkaian seri (Ohm)
- R_{sh} = Besarnya hambatan pada rangkaian paralel (Ohm)
- n = *Ideality factor cell*
- I_{sc} = Besarnya arus pada *short circuit* (A)
- I_d = Besarnya arus yang mengalir pada diode (A)
- I_{os} = Besarnya arus pada *open circuit* (A)
- I_{rs} = Besarnya arus *inverse* pada dioda (A)
- K_i = Temperatur koefisien
- N_p = Jumlah sel secara paralel
- N_s = Jumlah sel secara seri

Diantara parameter-parameter pada persamaan diatas nilai : A , I_{sc} , R_s , R_{sh} dan E_{go} memiliki peranan yang besar dalam menentukan karakteristik dari elektrik keluaran sel surya, sedangkan lainnya yang memiliki nilai konstan hanya mempunyai sedikit pengaruh dalam menentukan karakteristik keluaran elektrik sel surya. Berdasarkan Wang dalam penelitiannya menyebutkan

bahwa besaran-besaran konstan pada sel surya memiliki nilai pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Nilai parameter konstan pada sel surya (Broujeni & Fathi, 2013)

Parameter	Nilai
K (J/K)	$1.3806505 \times 10^{-23}$
q (C)	1.6×10^{-19}
Tr (K)	298.15
Ior	0.2287×10^{-16}

Tugas akhir ini menggunakan spesifikasi dari *photovoltaic* bertipe MSX120 dengan spesifikasi seperti yang dipaparkan seperti Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 dibawah ini.

Tabel 2.2 Nilai datasheet photovoltaic MSX120 (Kitson, dkk., 2017)

Datasheet Parameter	Nilai	Datasheet Parameter	Nilai
Isc (A)	3.87	Ns	72
Voc (V)	42.1	Ki (%/°C)	0.065
Impp (A)	1.2	Kv(mv/ °C)	-160
Vmpp (V)	18.6	n	1.4707

Tabel 2.3 Nilai parameter sirkuit photovoltaic tipe MSX120 (Kitson, dkk., 2017)

Parameter	Nilai
Rsh (Ω)	940.9
Rs (Ω)	0.4539
A (<i>diode quality</i>)	1.4707
VtSTC (V)	0.0378

Parameter-parameter diatas merupakan parameter yang terjadi ketika *photovoltaic* berada pada kondisi pengujian yang standar

atau *Standar Tes Condition (STC)* yakni kondisi dimana irradiasi matahari sebesar 1000 W/m^2 , serta temperatur pada *photovoltaic* sebesar 25°C . Selain itu, parameter hasil perhitungan pada STC untuk *photovoltaic* tipe MSX120 ditunjukkan pada tabel 2.3.

2.1.2 Turbin Angin

Salah satu bentuk sistem konversi energi angin adalah turbin angin. Turbin angin mengkonversi energi angin menjadi energi listrik melalui sebuah generator yang berperan untuk mengubah energi putar rotor yang diakibatkan adanya energi kinetik turbin menjadi energi listrik (Asy'ari, 2018). Sistem turbin angin tidak hanya mengkonversikan energi kinetik angin menjadi energi listrik, akan tetapi dapat juga sebagai energi mekanis atau energi lain yang dapat dimanfaatkan dalam kebutuhan sehari-hari (Harianto, 2018).

Kinerja turbin angin untuk dapat menghasilkan daya listrik bergantung dengan adanya interaksi antara angin dan rotor. Angin yang akan memutar rotor terdiri dari angin rata-rata serta fluktuasi turbulensi dari aliran angin. 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 J. G., *Wind Energy Explained (2nd ed.)* Wind Energy Explained (2nd ed.), 2009).

2.1.2.1 Komponen Turbin Angin

Di dalam turbin angin itu sendiri terdapat beberapa komponen seperti Gambar 2.3 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.

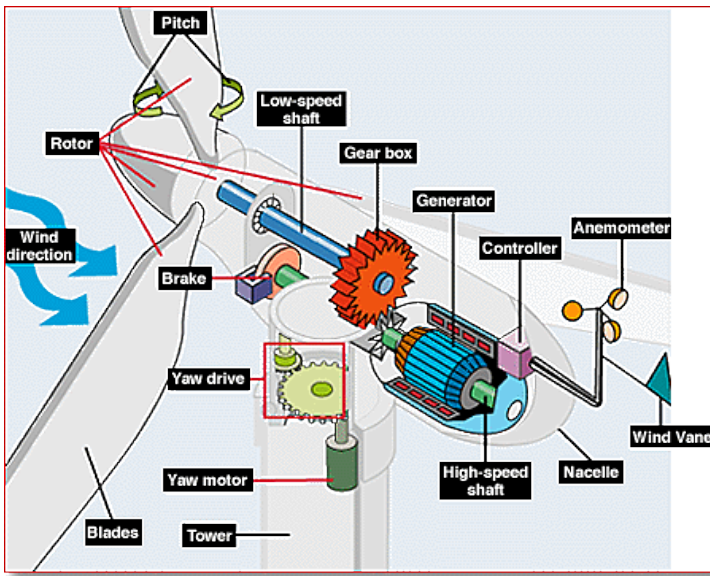
d. Penyimpanan Energi

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 2.3 adalah sebagai berikut:



Gambar 2.3 Komponen turbin angin (*Manwell J. G., Wind Energy Explained, 2009*)

- 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 hidrolis 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.
 - 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.

2.1.2.2 Prinsip Kerja Turbin Angin

Secara sederhana, proses konversi diawali dari adanya energi kinetik angin yang bergerak mengenai bilah-bilah turbin sehingga menyebabkan bilah-bilah turbin berputar. Putaran bilah-bilah turbin akan menggerakkan rotor yang tersambung dengan generator listrik, sehingga menjadi energi listrik. Turbin angin dapat berputar dikarenakan adanya vektor dari gaya *lift* dan gaya *drag* yang dihasilkan akibat bentuk aerodinamis dari penampang bilah turbin angin tersebut. Ketika sebuah penampang *airfoil* terkena angin dari arah depan, maka akan menghasilkan vektor gaya *lift* (L) dan *drag* (D). Perubahan gaya *lift* dan gaya *drag* ini dipengaruhi langsung oleh bentuk geometri bilah, kecepatan dan arah angin terhadap garis utama bilah (*pitch* bilah). Perubahan gaya *lift* dan *drag* menyebabkan kecepatan bilah dan torsi poros akan berubah pula. Perubahan *pitch* bilah ini akan mempengaruhi kecepatan bilah (RPM) dari rotor karena adanya perubahan jumlah daya tiup angin yang diterima oleh bilah yang dikonversi menjadi kecepatan putar rotor (Asy'ari, 2018).

Kecepatan minimal angin untuk dapat memutar bilah turbin adalah sebesar 3 m/s. Agar diperoleh daya listrik yang stabil sesuai dengan kapasitas generatornya, maka dibutuhkan kecepatan rata-rata angin sebesar 6 m/s sampai dengan 10 m/s. Dengan begitu, daerah yang cocok digunakan dalam penerapan turbin angin daerah pegunungan, pesisir, dan pantai.

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.

2.1.2.3 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 (Garduni-Ramirez & Lee, 2005), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$P_a = \dot{m} \frac{v^2}{2g} \quad (2.6)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (2.7)$$

Apabila persamaan (2.2) disubstitusikan pada persamaan (2.1), maka diperoleh persamaan (2.3).

$$P_a = \frac{1}{2g} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.8)$$

Berdasarkan hukum mekanika rotasi daya turbin angin diperoleh:

$$P = T \cdot \omega \quad (2.9)$$

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

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.10)$$

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (2.11)$$

Dengan :

P_a = daya spesifik angin (W)

P = daya keluaran turbin angin (W)

\dot{m} = laju massa (kg/s)

v = kecepatan angin (m/s)

ρ = massa jenis angin (kg/m³)

ω = kecepatan rotor turbin angin (rad/s)

A = luas area yang dilalui angin (m²)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

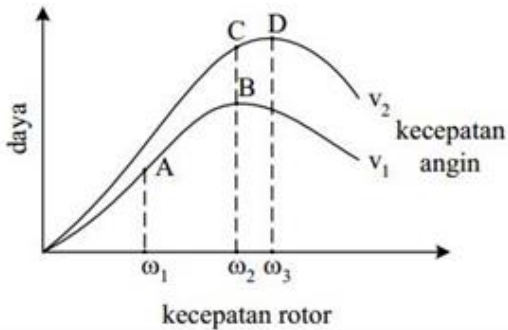
R = jari-jari *blade* (m)

C_p = koefisien daya

T = torsi generator (Nm)

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

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v_{in}} \quad (2.12)$$



Gambar 2.4 Hubungan antara kecepatan angin, kecepatan rotor turbin angin dan daya turbin angin (Nurwati, 2010)

Hubungan antara daya yang dikonversikan oleh turbin angin dengan kecepatan rotor turbin angin dan kecepatan angin ditunjukkan oleh kurva pada Gambar 2.4. Dari Gambar 2.4

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. 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. Setiap kecepatan angin memiliki kecepatan rotor yang optimal.

Perputaran bilah pada turbin angin dipengaruhi oleh besar kecilnya torsi yang ada. Secara umum, torsi turbin angin dirumuskan sebagai berikut:

$$T_T = \frac{P}{\omega} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v_w^3 \quad (2.13)$$

Pada torsi mengandung koefisien torsi sebagai berikut:

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{\omega} = \frac{R}{\lambda \cdot v_w} \quad (2.15)$$

Dari persamaan-persamaan di atas diperoleh torsi turbin yaitu:

$$T_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p}{\lambda} \cdot \frac{R}{v_w} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_w^3 \quad (2.16)$$

$$T_T = \frac{1}{2} \cdot C_T \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_w^2 \quad (2.17)$$

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:

$$\Sigma T = T_T - T_L - b \cdot \omega = J \cdot \alpha = J \cdot \dot{\omega} \quad (2.18)$$

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

$$T_T - T_L - b \cdot \omega = J \cdot s \cdot \omega \quad (2.19)$$

dan diperoleh kecepatan rotor

$$\omega = \frac{\omega(s)}{T_T(s) - T_L(s)} = \frac{1}{Js + b} \quad (2.20)$$

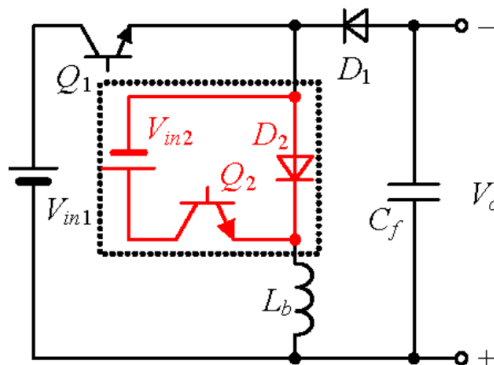
2.2 Multi-input DC-DC Converter

Multiinput DC-DC Converter adalah suatu perangkat elektronika yang telah dikembangkan teknologinya dimana mampu untuk masukan dari dua sumber daya atau lebih yang berbeda artinya penggabungan dari dua atau lebih konverter DC-DC baik seri maupun paralel untuk menyuplai beban yang sama dengan karakteristik masing-masing (Dzulkarnain, Ashari, & Riawan, 2014). *Multiinput DC-DC Converter* mempunyai kapabilitas untuk memiliki sumber daya masukan dari berbagai macam sumber daya yang ada selain itu, *Multiinput DC-DC Converter* mampu untuk meningkatkan keandalan dari sistem (Dobbs & Chapman, 2003). *Multiinput DC-DC Converter* juga mampu untuk mengkombinasikan keuntungan-keuntungan dari masing-masing sumber daya yang menjadi masukan konverter, seperti sel surya, *fuel cells*, baterai dan berbagai sumber daya lainnya dengan perbedaan karakteristik tegangan serta arus pada masing-masing sumber daya untuk pengoptimalan penggunaan energi serta ekonomi (Khaligh, 2008). Secara umum DC-DC konverter memiliki fungsi sebagai berikut (Rashid, 2011):

- Untuk mengubah tegangan masukan sesuai dengan tegangan keluaran yang diinginkan
- Untuk mengatur besarnya keluaran tegangan sesuai dengan variasi beban
- Untuk mereduksi riak tegangan AC pada tegangan DC keluaran dari konverter dibawah tingkatan yang dibutuhkan
- Untuk memenuhi isolasi antara sumber masukan dan beban (hal ini tidak selalu dibutuhkan)

- Untuk melindungi sistem penyuplai dan tegangan masukan dari *electromagnetic interference* (EMI)
- Untuk memenuhi standar keamanan internasional dan nasional

Pada gambar 2.5 merupakan konfigurasi sirkuit untuk tipe *multiinput* DC-DC converter yang dipakai pada tugas akhir ini yaitu *multi input buck boost* PCSC (*Pulsating Current Source Cell*) yaitu konverter yang menggunakan induktor sebagai sumber penyimpanan arus. PCSC menggunakan sinyal *pulse* arus untuk mengatur daya keluaran.

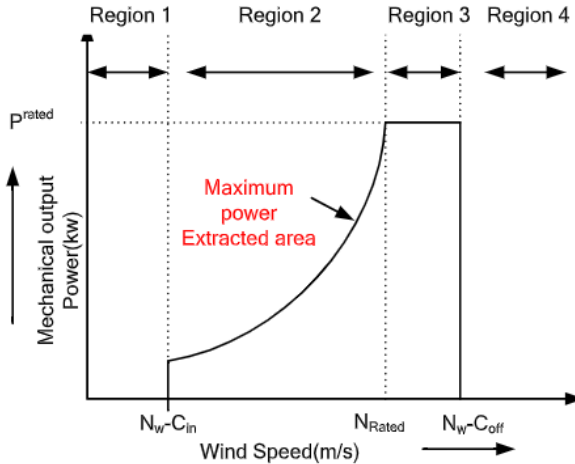


Gambar 2. 5 Konfigurasi sirkuit multiinput buck boost PCSC (Li, dkk., 2010)

2.3 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan sebuah metode untuk menentukan titik dimana daya maksimum dihasilkan oleh panel surya maupun turbin angin. Sistem MPPT bekerja dengan cara memaksa panel surya dan turbin angin agar bekerja pada titik daya maksimumnya, sehingga daya yang mengalir ke beban adalah daya maksimal. Pada umumnya digunakan DC-DC converter dalam sebuah sistem MPPT untuk menggeser daya

operasi dari panel surya dan turbin angin menjadi titik daya maksimalnya. (Babgei, 2013). MPPT memerlukan dua komponen pendukung dalam pengoperasiannya: arus input (I) dan tegangan input (V). Dua komponen ini dikombinasikan untuk mendapatkan nilai daya P.



Gambar 2. 6 Karakteristik keluaran daya-kecepatan pada turbin angin (Ram & Rajasekar, 2017)

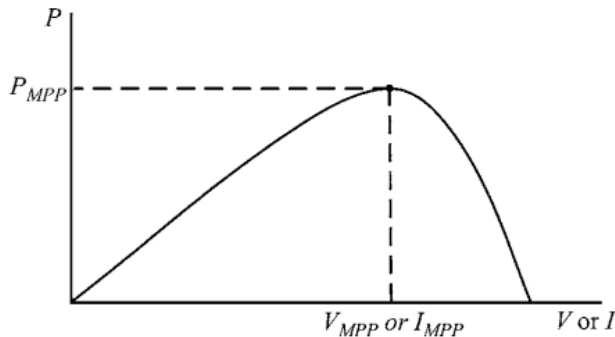
Karakteristik keluaran daya-kecepatan pada turbin angin dapat dilihat pada gambar 2.6. Berdasarkan pada kecepatan angin, ada empat wilayah operasi yang berbeda. Wilayah 1 dan 4 tidak layak karena tidak ada output daya yang dapat diharapkan sebelum kecepatan potong (C_{in}) dan setelah dipotong (C_{off}). Karenanya, operasi turbin angin selama ini tidak direkomendasikan untuk terkoneksi dengan jaringan (*grid connected*). Sementara itu, wilayah kedua antara $N_C - W_{in}$ dan N_{Rated} adalah zona optimal untuk pembangkit listrik. Selain itu, operasi titik daya maksimum hanya dimungkinkan bila turbin angin telah beroperasi di wilayah ini. Karena di wilayah ketiga, ($N_{Rated} - N_C - W_{off}$), turbin telah mencapai batas daya maksimum. Sehingga perlu ada kontrol atas daya

keluaran turbin angin. Dengan demikian, wilayah 2 adalah zona yang dioptimalkan untuk menerapkan pelacakan titik daya maksimum (MPP) (Ram & Rajasekar, 2017).

Dalam menemukan titik daya maksimum, salah satunya dapat digunakan metode *Perturb and Observe* (P&O) (Chapman & Eram, 2007). *Perturb and Observe* terdiri dari dua tahapan yaitu :

- a. *Perturb*, mengirimkan perubahan kepada tegangan atau arus referensi
- b. *Observe*, melakukan penghitungan daya yang disebabkan oleh *perturb*-nya.

Pembandingan daya sebelum dan sesudah proses *perturb* dilakukan digunakan sebagai acuan untuk menambah atau mengurangi tegangan untuk langkah berikutnya dan mendapatkan nilai MPP-nya.



Gambar 2. 7 Karakteristik daya MPP (*Maximum Power Point*)
(Chapman & Eram, 2007)

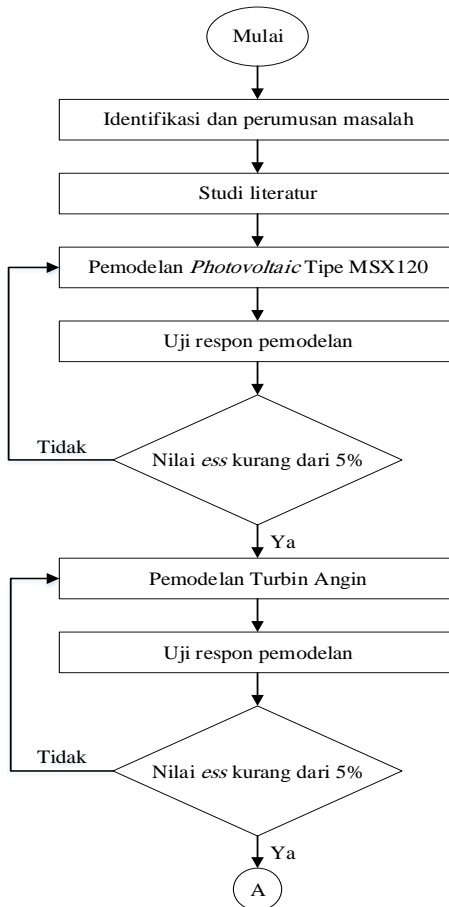
Berdasarkan gambar 2.7, tegangan atau arus akan ditingkatkan apabila titik kerja berada di sebelah kiri V_{mpp} dan I_{mpp} , serta tegangan atau arus akan dikurangi apabila titik kerja berada di sebelah kanan V_{mpp} dan I_{mpp} . Karena itu, jika ada perubahan daya, *perturb* ΔV atau ΔI selanjutnya harus dijaga tetap

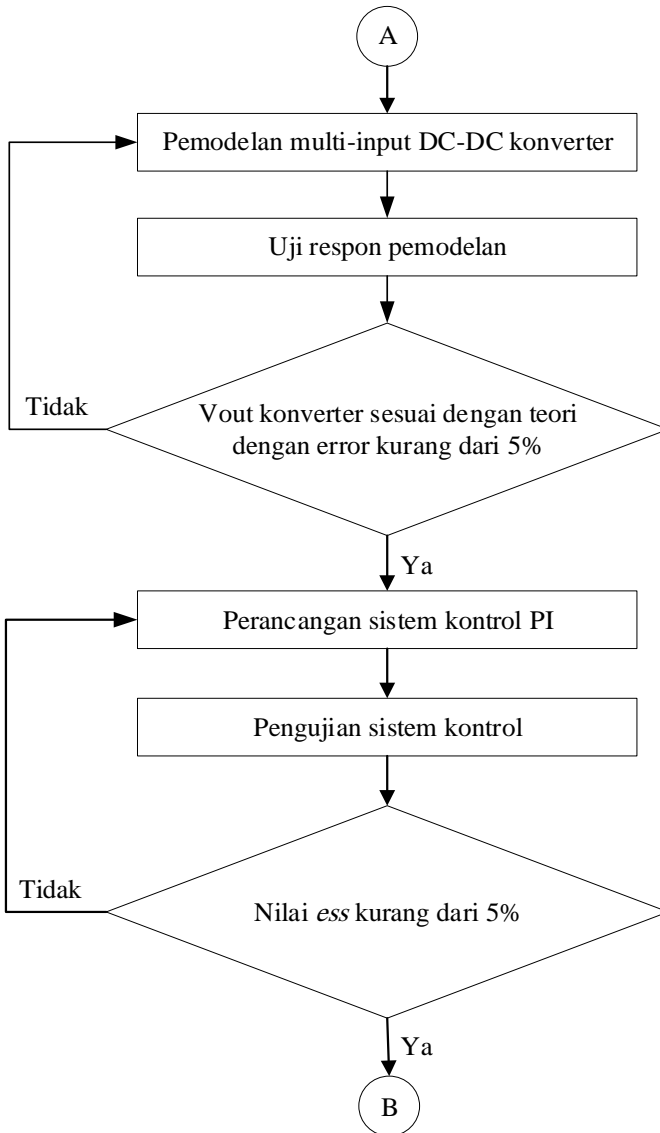
sama untuk dapat selalu mencapai titik maksimum. Dan apabila terjadi penurunan daya, maka *perturb* ΔV atau ΔI harus dibalik.

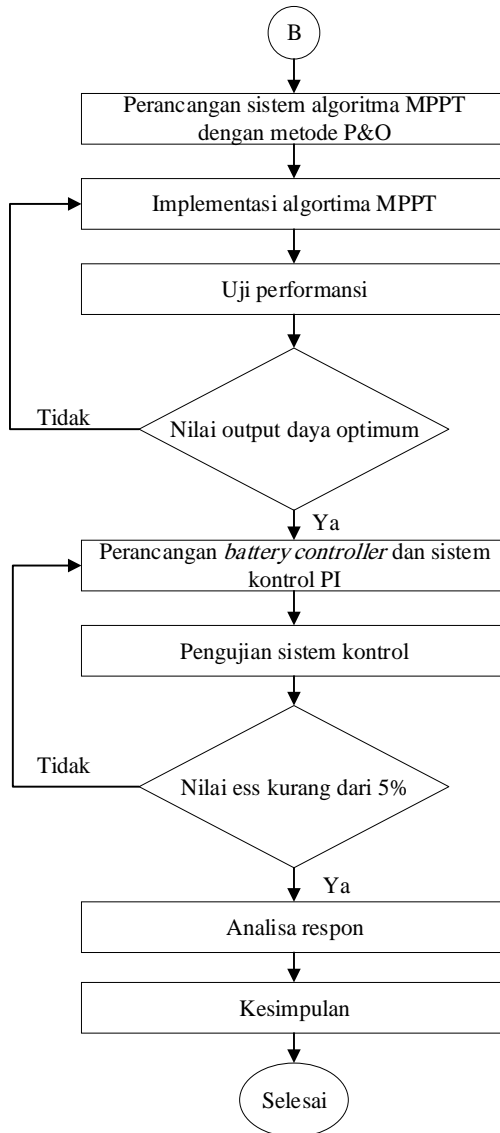
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Prosedur Umum Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini ditampilkan dengan sebuah diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 3.1.







Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

Langkah pertama dalam penelitian Tugas Akhir ini yaitu dengan melakukan studi literatur terlebih dahulu. Studi literatur dilakukan dengan melakukan studi dari literatur-literatur yang ada. literatur dapat berupa *text book*, *manual book*, jurnal-jurnal penelitian, serta penelitian-penelitian tugas akhir yang memiliki kemiripan topik serta metode. Topik dan metode yang dicari meliputi proses ekstraksi daya pada *photovoltaic* dan turbin angin, implementasi algoritma MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), implementasi DC-DC *converter* pada *photovoltaic* dan turbin angin dengan metode *Perturb and Observe* pada *photovoltaic* dan turbin angin. Dengan adanya tahap studi literatur ini diharapkan dapat mempermudah penyelesaian masalah yang ada pada saat penelitian berlangsung.

Tahap selanjutnya adalah dilakukan pemodelan plant hibrida yang terdiri dari *photovoltaic* dan turbin angin. Pemodelan *photovoltaic* dilakukan menggunakan simulink yang ada pada *software* Matlab. Pemodelan didasarkan pada pemodelan matematis yang didapatkan pada tahap studi literatur dengan data-data karakteristik *photovoltaic* yang diperoleh dari *manual book*. Setelah pemodelan berhasil didapatkan maka dilanjutkan dengan melakukan pengujian model matematis dimana akan dilakukan pengujian model yang ada pada simulink dengan melihat *error* yang ada. *Error* berasal dari selisih hasil tegangan dan arus *photovoltaic* hasil pemodelan dengan tegangan dan arus output *photovoltaic* MSX120 pada literatur. Apabila *error* yang dihasilkan dari pemodelan masih belum sesuai dengan yang diharapkan maka dilakukan pemodelan ulang *photovoltaic* sampai *error* yang dihasilkan sesuai.

Tahap selanjutnya yakni dilakukan pemodelan turbin angin. Pemodelan turbin angin dilakukan menggunakan simulink yang ada pada *software* Matlab. Pemodelan didasarkan pada pemodelan

matematis yang didapatkan pada tahap studi literatur dengan data-data karakteristik turbin yang diperoleh dari *manual book*. Setelah pemodelan berhasil didapatkan maka dilanjutkan dengan melakukan pengujian model matematis dimana akan dilakukan pengujian model yang ada pada simulink dengan melihat *error* yang ada. *Error* nantinya akan disesuaikan dengan cara validasi dengan *error* yang telah ditentukan diawal pemodelan turbin. Apabila *error* yang dihasilkan dari pemodelan masih belum sesuai dengan yang diharapkan, maka dilakukan pemodelan ulang turbin angin sampai *error* yang dihasilkan sesuai.

Setelah *error* dari kedua plant *photovoltaic* dan turbin angin sesuai dengan *error* yang diharapkan. Langkah selanjutnya yakni merancang DC-DC Konverter yaitu Konverter *Buck-Boost*. Pemodelan konverter ini juga dilakukan menggunakan Simulink. Setelah selesai dimodelkan, dilakukan pengujian validasi *error*. Apabila *error* yang dihasilkan dari pemodelan belum sesuai dengan *error* yang diinginkan, maka dilakukan pemodelan ulang Konverter *Buck-Boost* sampai *error* yang dihasilkan sesuai.

Setelah mendapatkan *error* yang sesuai dari Konverter *Buck-Boost*. Langkah selanjutnya yakni merancang sistem kontrol PI. Perancangan sistem kontrol PI ini bertujuan untuk mendapatkan respon yang lebih baik dari plant hibrida. Pengujian sistem kontrol PI dengan melihat parameter-parameter respon berupa *maximum overshoot* (Mp), *time settling* (Ts) dan *error steady state* (Ess). Apabila parameter-parameter respon tersebut sudah sesuai dengan *range* yang diinginkan, maka sistem kontrol sudah layak digunakan. Apabila belum sesuai dengan *range* yang diinginkan, maka dilakukan perancangan ulang sistem kontrol PI.

Langkah selanjutnya yakni merancang algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dengan metode *Perturb and Observe* (P&O). Algoritma MPPT ini digunakan untuk menjejak arus maksimum dari photovoltaic dan turbin angin. Sehingga

nantinya akan dihasilkan ekstraksi daya yang maksimum. Kemudian algoritma MPPT diimplementasikan pada konverter dengan menggunakan kontroler. Apabila hasil implementasi MPPT sudah memenuhi hasil yang diinginkan, maka dilanjutkan ke langkah selanjutnya. Jika belum memenuhi, maka dilakukan perancangan ulang algoritma MPPT.

Setelah didapatkan ekstraksi daya maksimum dari sistem DC-DC konverter dilakukan perancangan kontroler baterai. Kontroler baterai ini berfungsi untuk menstabilkan tegangan output dari konverter sebelum masuk baterai, dimana baterai memiliki tegangan sebesar 12 volt dan menjadi setpoint. Perancangan kontroler baterai menggunakan kontrol PID dan konverter *buck-boost* guna menghasilkan respon tegangan yang baik dari pembangkit listrik tenaga hibrida. Kemudian dilakukan pengujian kontroler baterai dengan melihat parameter-parameter responnya berupa *maximum overshoot* (M_p), *time settling* (T_s) dan *error steady state* (E_{ss}). Apabila parameter-parameter respon tersebut sudah sesuai dengan *range* yang diinginkan dan tegangan keluaran dari kontroler baterai sudah mendekati 12 volt, maka sistem baterai kontrol sudah layak digunakan. Apabila belum sesuai dengan *range* yang diinginkan, maka dilakukan perancangan ulang sistem kontroler baterai.

3.2 Pemodelan *Photovoltaic* tipe MSX120

Pemodelan dilakukan menggunakan Simulink pada Matlab 2014a berdasarkan rumus-rumus persamaan *photovoltaic* (2.1), (2.2), dan (2.3) yang telah tertuliskan diatas. *Photovoltaic* yang digunakan merupakan tipe MSX120 berdasarkan parameter-parameter pada Bab II.

Pengujian pemodelan dilakukan dengan cara membandingkan nilai I_{mpp} dan V_{mpp} pada kondisi STC (*Standar Test Condition*)

dari *datasheet* dengan hasil respon pemodelan yang telah dilakukan. Perhitungan nilai *error* pemodelan adalah sebagai berikut :

$$Error = \frac{Tegaangan\ terukur - Tegangan\ secara\ Teori}{Tegangan\ secara\ teori} \times 100\% \quad (3.1)$$

3.3 Pembuatan Model Sistem Turbin Angin

Dalam perancangan pemodelan turbin angin terlebih dahulu ditentukan karakteristik turbin angin yang diinginkan. Karakteristik-karakteristik yang dicari digunakan dalam pengisian parameter dari setiap blok komponen dari sistem turbin angin yang akan dirancang. Pada penelitian kali ini turbin angin yang digunakan mengacu pada data turbin angin dari penelitian (Manwell, 2009). Berikut merupakan data karakteristik turbin angin yang digunakan.

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

Dengan data spesifikasi yang telah diperoleh pada Tabel 3.1, maka pemodelan turbin angin dapat dilakukan.

Nilai TSR pada persamaan (2.12) dapat didefinisikan melalui persamaan (3.1) sebagai berikut.

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

Dari persamaan (3.1) berhasil diperoleh nilai untuk koefisien C_1 sampai C_6 sebagai berikut:

$$C_1 = 0.645$$

$$C_2 = 116$$

$$C_3 = 0.4$$

$$C_4 = 5$$

$$C_5 = 21$$

$$C_6 = 0.00912$$

Dengan diketahuinya nilai koefisien selanjutnya dilakukan pemodelan rotor dan generator. Pemodelan rotor dan generator didasarkan pada persamaan berikut (Zaini, 2016):

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

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

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

Dengan

T_m = Torsi mekanik rotor (Nm)

H_{wt} = Konstanta inersia (detik)

K_{sh} = Konstanta pegas pada rotor

D_{mutual} = Konstanta redaman pada motor

Persamaan (3.2), (3.3), dan (3.4) akan disimulasikan pada *software* Simulink Matlab dengan parameter rotor, generator, dan turbin angin sebagai berikut.

Tabel 3.2 Definisi dan nilai berbagai parameter pada simulasi

Parameter	Definisi	Nilai	Satuan
$C_{p_{max}}$	Koefisien daya maksimum	1	Pu
V x	Kecepatan angin	4 - 10	m/s

Tabel 3.2. Lanjutan

Parameter	Definisi	Nilai	Satuan
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

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

Terdapat 3 variabel inputan pada turbin angin. Ketiga variabel tersebut adalah kecepatan angin, sudut *pitch*, dan kecepatan putar rotor. Sedangkan keluaran dari turbin angin adalah torsi mekanik dari generator. Dalam simulasi kali variabel yang diubah-ubah adalah kecepatan angin, dimana menyesuaikan profil angin yang ada di Jawa Timur yaitu berkisar dari 0 – 10 m/s. Variabel input kecepatan rotor merupakan variabel terikat dimana bergantung kepada kecepatan angin dan pembebanan dari generator. Sedangkan sudut *pitch* bernilai tetap sebesar nol karena memang diluar dari batasan masalah paa penelitian kali ini. Output torsi mekanik dari turbin angin nantinya akan menjadi inputan dari generator, hal inilah yang nantinya akan mempengaruhi daya keluaran generator yang dihasilkan.

Simulasi yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan generator PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) 3 fasa dengan parameter ditunjukkan pada Tabel 3.4 dan 3.5 sebagai berikut.

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

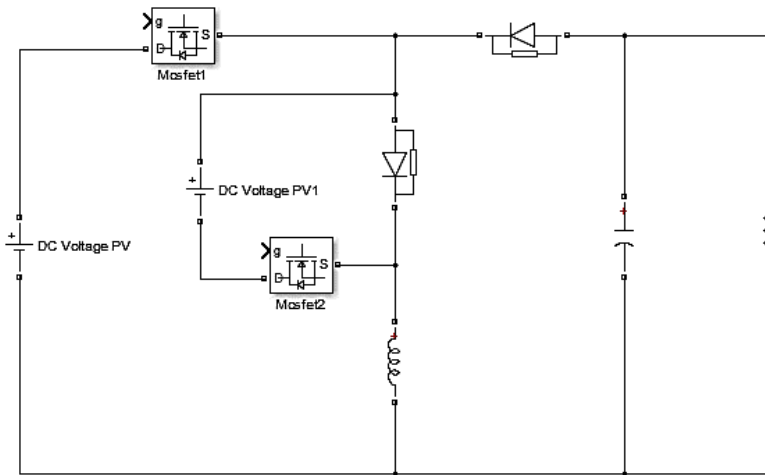
Parameter	Nilai	Satuan
<i>Stator phase resistance</i> Rs	0,18	Ohm
<i>Armature inductance</i>	0,000835	H
<i>Flux linkage</i>	0,0714	V.s
<i>Inertia</i> (J)	0,00062	Kg.m ²
<i>Viscous damping</i> (F)	0,0003035	N.m.s
<i>Pole pairs</i> (p)	4	-
<i>Static friction</i> (Tf)	0	N.m
<i>Initial condition</i> ω mekanik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

3.3 Perancangan *Multi-input DC-DC Converter*

Pemodelan *Multi-input DC-DC Converter* dilakukan dengan menggunakan rangkaian elektrik secara langsung dengan rangkaian Buck-Boost Converter seperti yang dijelaskan oleh (Li Y, dkk., 2010). Rangkaian ekuivalen *Multi-input DC-DC Converter* dapat dilihat pada gambar 3.2.

Berdasarkan gambar 3.2 terdapat beberapa komponen elektrik seperti resistor, kapasitor, inductor, mosfet dan dioda yang akan

mempengaruhi efisiensi kerja dari konverter. Proses switching yang terjadi pada mosfet akan mempengaruhi besarnya arus yang dihasilkan oleh masing-masing sumber pembangkit listrik yakni *photovoltaic* dan turbin angin. Pengujian pemodelan *multi-input DC-DC Converter* dilakukan dengan cara uji open loop pemodelan dari Simulink.



Gambar 3. 2 Rangkaian ekivalen multi-input DC-DC converter

Uji *openloop* dilakukan dengan melihat nilai *output* dari konverter dan respon *output* dari *Buck-Boost Converter*. Besarnya nilai *output* dari konverter dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$V_o = \frac{d_1}{1-d_2} V_{pv} + \frac{d_2}{1-d_2} V_{turbin\ angin} \quad (3.5)$$

Pada perancangan multi-input konverter *Buck-Boost*, besar nilai induktor (L) dan kapasitor (C) diperoleh menggunakan perhitungan yang merujuk pada penelitian (Dzulqarnain, Prof. Dr.

Ir. Mochamad Ashari, & Chandra, 2011). Berikut merupakan parameter yang didapatkan :

Tabel 3. 6 Nilai parameter PV (*Dzulkarnain , Ashari, & Riawan, 2014*)

Parameter	Nilai
• Tegangan input (Vin)	15-21 Volt
• Tegangan output (Vout)	12-16,8 Volt
• Arus output	3 Ampere
• Frekuensi switching (f)	40 kHz
• Ripple arus diasumsikan $\Delta I = 10\%$	$\Delta I = \frac{10}{100} \times 3 = 0,3 A$
• Ripple tegangan diasumsikan $\Delta V_c = 2\%$	$\Delta V_c = \frac{2}{100} \times 12 = 0,24 V$

Kemudian nilai parameter turbin angin didapatkan sebagai berikut :

Tabel 3. 7 Nilai parameter turbin angin (*Dzulkarnain , Ashari, & Riawan, 2014*)

Parameter	Nilai
• Tegangan input (Vin)	15-21 Volt
• Tegangan output (Vout)	12-16,8 Volt
• Arus output	3 Ampere
• Frekuensi switching (f)	40 kHz
• Ripple arus diasumsikan $\Delta I = 10\%$	$\Delta I = \frac{10}{100} \times 3 = 0,3 A$
• Ripple tegangan diasumsikan $\Delta V_c = 2\%$	$\Delta V_c = \frac{2}{100} \times 12 = 0,24 V$

Jika diasumsikan tegangan output yang diinginkan adalah 12 Volt, maka nilai *duty cycle* dapat dihitung sesuai dengan persamaan sebagai berikut :

$$D = \frac{V_o}{(V_d+V_o)} = \frac{12}{20+12} = \frac{12}{32} = 0,375 \quad (3.6)$$

Setelah didapatkan nilai *duty cycle*, kemudian nilai induktor (L) dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} L_{min} &= \frac{V_d+V_o}{\Delta I_l \times f (V_d+V_o)} = \frac{20+12}{0,3 \times 40000 \times (20+12)} \\ &= 0,0000625 \text{ H} \\ &= 625 \mu\text{H} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Setelah didapatkan nilai induktor (L), kemudian nilai kapasitor (C) dan R dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} C_{min} &= \frac{I_o \times V_o}{\Delta V_o \times f (V_d+V_o)} = \frac{3 \times 12}{0,24 \times 40000 \times (20+12)} \\ &= 0,00007 \text{ F} = 70 \mu\text{F} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$R = \frac{V_o}{I} = \frac{12}{3} = 4 \text{ Ohm} \quad (3.9)$$

Dari perhitungan nilai minimal inductor, kapasitor dan resistor, didapatkan nilai komponen multi-input konverter *Buck-Boost* sebagai berikut.

Tabel 3. 8 Nilai komponen multi-input konverter buck-boost

Parameter	Nilai
Induktor (L_{min})	625 μH
Kapasitor (C_{min})	70 μF
Resistor (R)	4 Ohm

Setelah didapatkan nilai dari masing-masing komponen, selanjutnya dilakukan pengujian pada rangkaian multi-input *buck-boost converter*. Uji *open loop* dilakukan untuk mengetahui apakah

konverter sudah bisa berjalan dengan baik. Uji *open loop* dilakukan dengan memberikan menganalisa pengaruh nilai *duty cycle* dari 0 dan 1 yang diberikan pada Mosfet terhadap arus dan tegangan output rangkaian multi-input *buck-boost converter*. Apabila terjadi perubahan nilai yang menyesuaikan set point, maka multi-input *buck-boost converter* dapat dikatakan dapat bekerja. Setelah dilakukan uji *open loop* diketahui bahwa dengan parameter yang telah diperoleh dari perhitungan masih belum bisa mendapatkan kinerja multi-input *buck-boost converter* sesuai dengan harapan. Maka dilakukan perancangan kembali nilai masing-masing komponen melalui jalan *trial & error* namun tetap memperhatikan nilai komponen berdasarkan perhitungan. Berikut merupakan komponen multi-input *buck-boost converter* dengan *trial & error*.

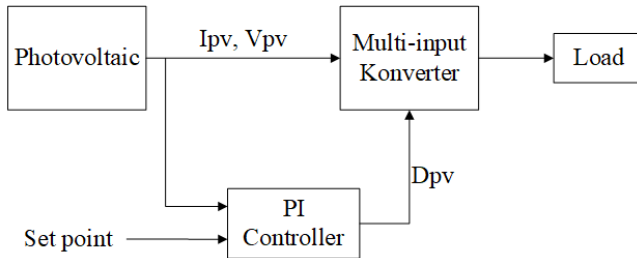
Tabel 3. 9 Nilai komponen multi-input konverter buck-boost secara *trial&error*

Parameter	Nilai
Induktor (L)	220 μH
Kapasitor (C)	470 μF
Resistor (R)	50 Ω

3.4 Perancangan Sistem Kontrol PI

Sistem kontrol PI pada sistem ekstraksi daya maksimum bertujuan untuk mengontrol besarnya arus yang terukur disesuaikan dengan *set point*. Keluaran dari kontrol PI yaitu berupa nilai *duty cycle*. *Duty cycle* akan masuk ke PWM (*Pulse Widht Modulation*) *Generator* untuk dijadikan sinyal PWM yang menjadi nilai masukan proses *switching* pada *gate converter* untuk mengatur nilai arus agar sesuai dengan set point. Metode yang digunakan dalam menjejak besarnya nilai *gain proportional* (K_p) dan *gain integral* (τ_i) yakni menggunakan metode *trial and error*. Pada sistem pembangkit listrik tenaga hibrida ini, sistem kontrol

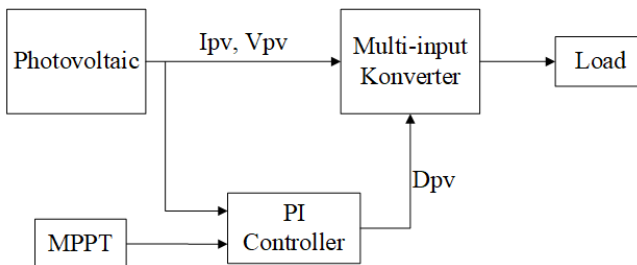
hanya terdapat pada plant Photovoltaic saja. Berikut ini merupakan diagram blok sistem kontrol PI pada plant *photovoltaic* dan turbin angin.



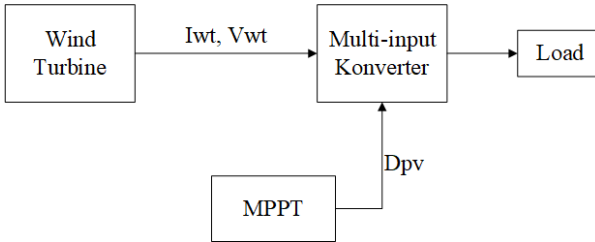
Gambar 3. 3 Diagram blok sistem kontrol PI pada *photovoltaic*

3.5 Perancangan Algoritma MPPT (*Maximum Power Tracking*)

Algoritma MPPT pada sistem ekstraksi daya maksimum bertujuan untuk menjejak daerah kerja daya maksimum. Daya maksimum dipengaruhi oleh 2 variabel yakni arus dan tegangan. Pada penelitian ini, variabel yang dijejak oleh MPPT untuk dicari nilai maksimum yakni arus pada photovoltaic dan tegangan untuk turbin angin. Sehingga daya keluaran dari sistem pembangkit listrik tenaga hibrida ini dapat maksimal. Berikut algoritma MPPT yang diimplementasikan pada masing-masing *plant*.



Gambar 3. 4 Diagram blok implementasi algoritma MPPT pada plant *photovoltaic*



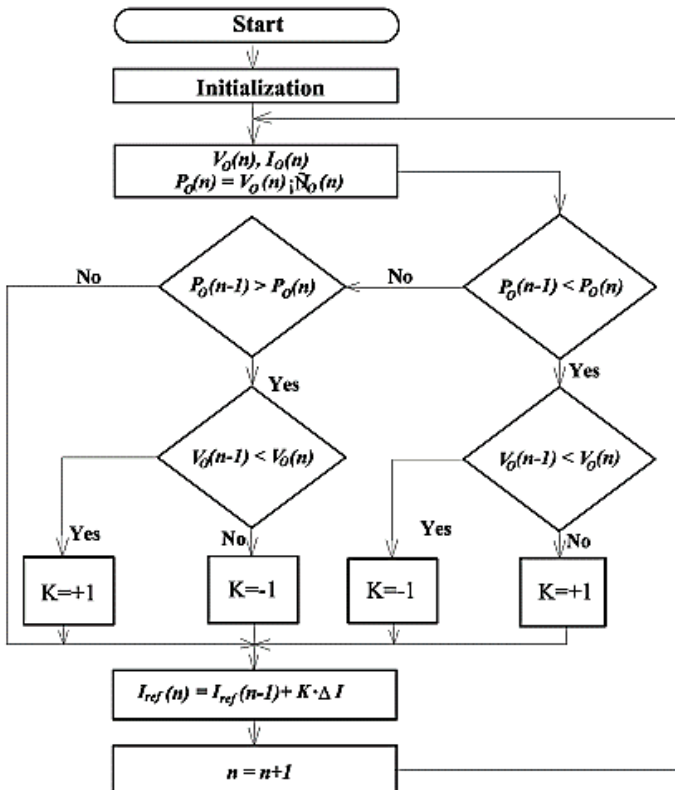
Gambar 3. 5 Diagram blok implementasi algoritma MPPT pada plant turbin angin

Pada algoritma MPPT ini menggunakan metode *Perturb and Observe*. Metode *Perturb and Observe* berfungsi untuk menjejak posisi daya maksimum.

Metode *Perturb & Observe* terdiri dari dua tahap, *perturb* yaitu mengubah tegangan dan *observe* yaitu menghitung perubahan daya akibat aksi *perturb* sebelumnya. Perbandingan daya sebelum dan sesudah proses *perturb* dilakukan digunakan sebagai acuan untuk menambah atau mengurangi tegangan untuk langkah berikutnya dan mendapatkan nilai MPP-nya. Apabila tegangan atau arus akan ditingkatkan apabila titik kerja memiliki nilai yang lebih kecil dari V_{mpp} dan I_{mpp} nya, serta tegangan atau arus akan dikurangi apabila titik kerja memiliki nilai lebih besar dari nilai V_{mpp} dan I_{mpp} nya. Karena itu, jika ada perubahan daya, *perturb* ΔV atau ΔI selanjutnya harus dijaga tetap sama untuk dapat selalu mencapai titik maksimum. Dan apabila terjadi penurunan daya, maka *perturb* ΔV atau ΔI harus dibalik.

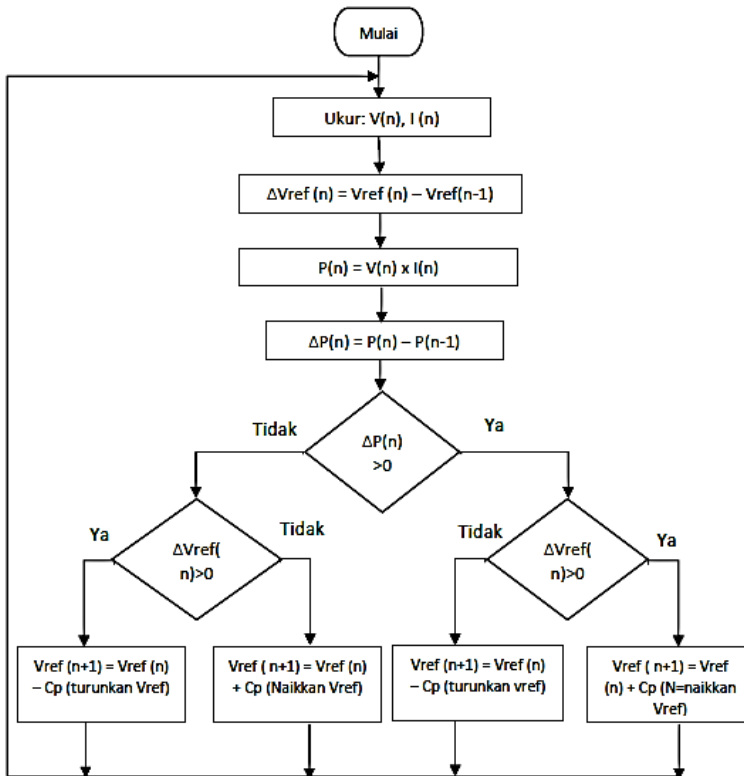
Pada penelitian ini terdapat dua sumber yakni *photovoltaic* dan turbin angin. Kedua keluaran dari *photovoltaic* dan turbin angin akan dimaksimalkan guna mencapai titik kerja daya maksimum, sehingga didapatkan ekstraksi daya yang maksimum dari keduanya.

Gambar 3.7 di bawah ini merupakan diagram alir MPPT dengan metode *Perturb and Observe* pada plant *photovoltaic*.



Gambar 3. 6 Diagram alir MPPT dengan metode P&O pada *photovoltaic* (Chen, Liu, Hung, & Cheng, 2007)

Berdasarkan Gambar 3.7, dapat diketahui bahwa referensi yang digunakan dalam kontroler MPPT pada *photovoltaic* yakni arus. Hal tersebut sesuai dengan output utama dari plant *photovoltaic* yang berupa arus akibat adanya irradiansi. Sedangkan pada turbin angin, referensi yang digunakan pada kontroler MPPT yakni tegangan. Hal itu dikarenakan keluaran dari generator turbin angina berupa tegangan. Berikut merupakan diagram alir algoritma kontroler MPPT pada turbin angin.

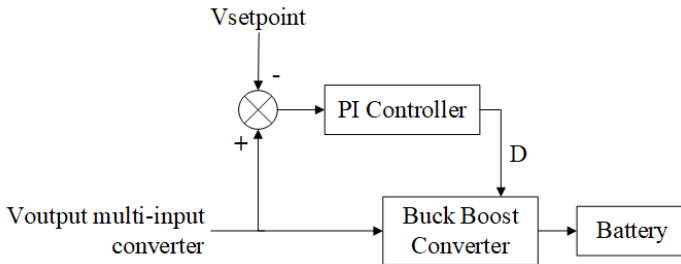


Gambar 3. 7 Diagram alir MPPT dengan metode P&O pada turbin angin (Zaini, 2016)

3.6 Perancangan *Battery Controller* dan Kontroler PI

Kontroler PI yang diimplementasikan untuk tegangan keluaran dari sistem ekstraksi daya maksimum dirancang untuk menstabilkan tegangan yang akan disalurkan pada baterai sebesar 12 Volt.

Berikut ini merupakan gambar diagram blok proses penstabilan tegangan keluaran dari pembangkit listrik tenaga hibrida.



Gambar 3. 8 Diagram blok sistem penstabil tegangan keluaran

$V_{setpoint}$ pada diagram blok di atas adalah tegangan pada spesifikasi baterai, yaitu 12 Volt. Dalam proses penstabilan tegangan perlu adanya kontrol PI untuk melakukan kontrol tegangan dengan cara menjejak tegangan dari sistem ekstraksi daya maksimum yang telah dimaksimalkan menuju ke beban, dimana dalam penelitian ini yakni baterai. Dalam menentukan besarnya nilai *gain proportional* (K_p) dan *gain integral* (τ_i) yakni menggunakan metode *trial and error*. Pengujian sistem kontrol dilakukan dengan cara membandingkan nilai tegangan keluaran konverter dengan set point.

Pada *battery controller*, konverter berperan sebagai aktuator. Konverter yang digunakan pada *battery controller* ini yaitu konverter *Buck-Boost*. Pada rangkaian konverter ini terdapat beberapa elemen elektronika yang antara lain kapasitor, inductor, resistor, mosfet dan dioda. Pada proses perancangan perlu adanya perhitungan-perhitungan untuk komponen elektronika dengan rumus yang terdapat pada penelitian (Sidabutar, dkk., 2014) sebagai parameter *Battery Controller* yakni sebagai berikut :

- Nilai *Duty Cycle*

$$\frac{V_{baterai}}{V_o} = \frac{D}{1-D} \quad (3.10)$$

- Nilai Hambatan

$$R = \frac{V_{baterai}}{I_{baterai}} \quad (3.11)$$

- Nilai ΔV_o

$$\Delta V_o = \pm 1\% V_{baterai} \quad (3.12)$$

- Nilai Induktor Minimum (L_{min})

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2}{2 \times F} \quad (3.13)$$

- Nilai Kapasitor Minimum (C_{min})

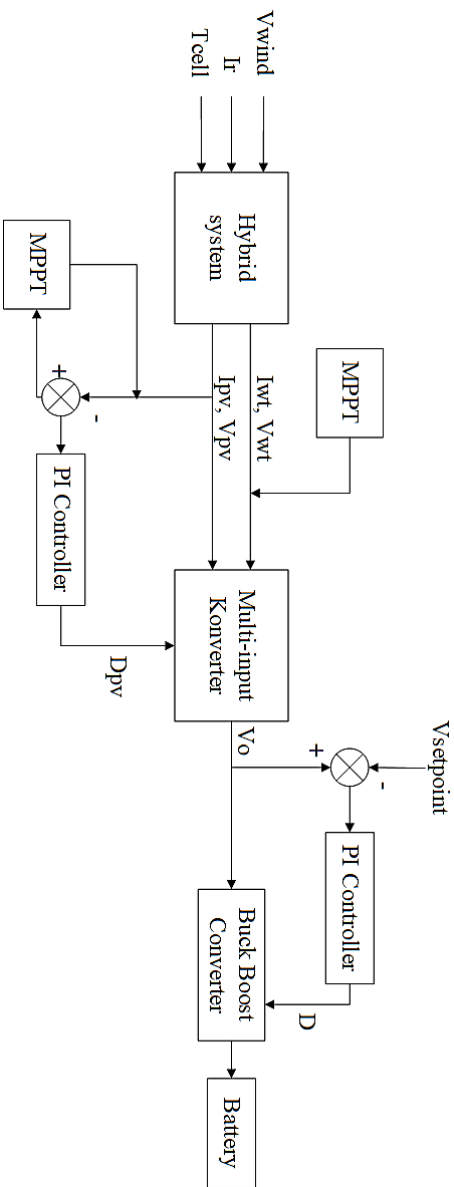
$$C_{min} = \frac{V_{baterai} \times D}{R \times F \times \Delta V_{baterai}} \quad (3.14)$$

3.7 Uji Performansi Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida

Sistem pembangkit listrik tenaga hibrida (PLTH) yang telah diimplementasikan oleh algoritma MPPT, perlu dilakukan uji performansi untuk mengetahui apakah optimasi daya yang dilakukan oleh algoritma MPPT bekerja dengan baik atau tidak. Proses pengujian dilakukan dengan membandingkan sistem PLTH yang sudah diberikan algoritma MPPT dengan sistem PLTH tanpa menggunakan MPPT dengan input berupa kecepatan angin, irradiansi matahari dan temperatur sel yang sama secara simultan. Hasil uji performansi ini berupa respon daya perbandingan sistem PLTH menggunakan MPPT dengan tanpa MPPT. Dari respon perbandingan kedua sistem tersebut, dapat diketahui apakah ekstraksi daya sudah optimum. Apabila belum optimum, dilakukan kembali pemodelan algoritma MPPT guna mencapai ekstraksi daya yang maksimum.

3.8 Diagram Blok Sistem Penelitian Secara Keseluruhan

Pada tugas akhir ini, dirancang sistem pembangkit listrik tenaga hibrida yang akan distabilkan tegangan keluarannya dengan *battery controller*. Pada Gambar 3.9 dapat dilihat diagram blok ini secara keseluruhan.



Gambar 3.9 Diagram blok keseluruhan sistem

Pada pembangkit listrik tenaga hibrida terdiri dari dua sumber yakni sel surya (*photovoltaic*) dan turbin angin. Pada masing-masing plant dilakukan pengekstrasian daya secara maksimum yakni pada *photovoltaic* dilakukan ekstraksi dari input berupa irradiansi matahari dan suhu sel dikonversi menjadi energi listrik dan pada turbin angin dilakukan ekstraksi daya dari input berupa energi mekanik menjadi energi listrik. Ekstraksi daya pada kedua plant digunakan algoritma MPPT dengan metode P&O. Input untuk algoritma MPPT berupa perhitungan daya dari masing-masing *photovoltaic* dan turbin angin, yang kemudian dilakukan perhitungan untuk menjejak nilai arus dan tegangan maksimum sebagai referensi untuk *photovoltaic* dan turbin angin. Nilai arus dan tegangan referensi tersebut digunakan set point pada sistem pembangkit listrik tenaga hibrida secara *close loop* dengan kontroler PI. Pada *photovoltaic*, nilai arus referensi kemudian dibandingkan dengan nilai arus terukur sedangkan pada turbin angin nilai tegangan referensi dibandingkan dengan tegangan terukur sehingga didapatkan error. Perbandingan hasil arus maupun tegangan pada *photovoltaic* dan turbin angin yang menghasilkan error akan digunakan oleh kontroler PI untuk menghasilkan nilai *duty cycle*. Multi input DC-DC converter bertugas sebagai aktuator yang menjalankan perintah sesuai dengan nilai *duty cycle* yang diberikan. Nilai *duty cycle* menunjukkan rasio waktu *on* dan *off* mosfet dalam satu periode. Nilai *duty cycle* tersebut digunakan untuk men-*drive* mosfet mengatur rasio bukaan *switch*. Arus yang mengalir melalui masing-masing mosfet pada kedua plant akan dialirkan ke konverter, sehingga didapatkan tegangan keluaran yang maksimum. Agar dapat dimanfaatkan sebagai sumber listrik, tegangan keluaran dari sistem pembangkit listrik tenaga hibrida disimpan terlebih dahulu pada baterai. *Battery controller*

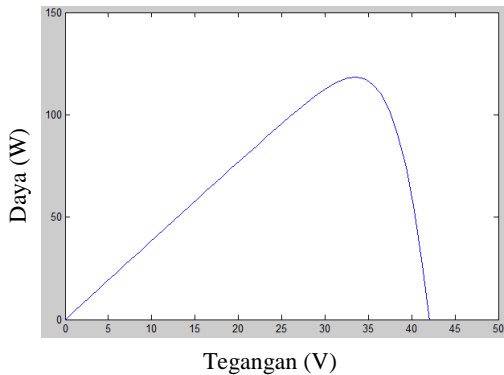
digunakan untuk menstabilkan tegangan keluaran dari pembangkit hibrida agar sesuai dengan spesifikasi baterai yang digunakan yakni 12 volt. Tegangan sebesar 12 volt digunakan sebagai tegangan referensi (*set point*) dengan input berupa tegangan keluaran konverter. Nilai error dari perbandingan set point dengan tegangan keluaran konverter akan dikendalikan dengan kontroler PI yang akan menghasilkan nilai *duty cycle*. Pada *battery controller* ini digunakan konverter buck-boost yang bertugas sebagai aktuator untuk menghasilkan nilai tegangan yang sesuai dengan kapasitas baterai yang digunakan yakni 12 volt.

“Halaman ini memang dikosongkan”

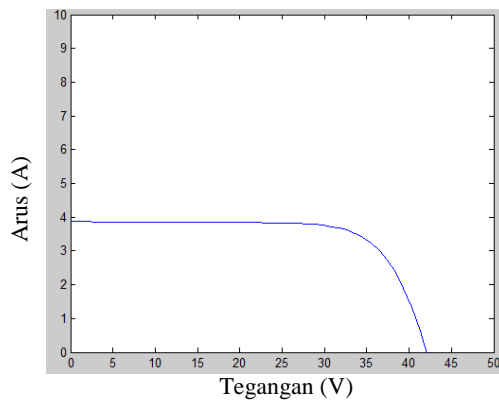
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pemodelan *Photovoltaic* MSX120

Karakteristik *photovoltaic* dapat diamati dari kurva antara daya dengan tegangan serta kurva arus dengan tegangan. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada penelitian kali ini didapatkan kurva seperti Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



Gambar 4. 1 Respon uji *open loop photovoltaic* kurva P-V



Gambar 4. 2 Respon uji *open loop photovoltaic* kurva I-V

Pada gambar 4.1, sumbu X merupakan tegangan dan sumbu Y adalah daya. Berdasarkan kurva tersebut, maka daya (P) memiliki titik paling optimum berada pada tegangan sebesar 33.5 Volt. Dimana berarti *photovoltaic* MSX120 memiliki daya optimum pada nilai optimal tegangan (V_{mpp}) sebesar 33.5 Volt. Dibandingkan dengan tegangan optimum untuk mengeluarkan daya terbesar secara literatur yaitu sebesar 33.7 Volt (Kitson, dkk., 2017), sehingga memiliki nilai *error* yang dapat dihitung menggunakan persamaan 3.1 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \frac{V \text{ hasil pemodelan} - V \text{ menurut datasheet}}{V \text{ menurut datasheet}} \times 100\% \\ &= \frac{33.5 - 33.7}{33.7} \times 100\% \\ &= 0.6 \% \end{aligned}$$

Sedangkan pada gambar 4.2, sumbu X adalah tegangan dan sumbu Y adalah arus. Berdasarkan literatur (Kitson, dkk., 2017), pada kondisi arus optimal (I_{mpp}) sebesar 3,52 Ampere. Sedangkan hasil pemodelan *photovoltaic* sebesar 3,54 Ampere. sehingga memiliki nilai *error* yang dapat dihitung menggunakan persamaan 3.1 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \frac{\text{Arus hasil pemodelan} - \text{Arus menurut datasheet}}{\text{Arus menurut datasheet}} \times 100\% \\ &= \frac{3.54 - 3.52}{3.52} \times 100\% \\ &= 0.5 \% \end{aligned}$$

Berdasarkan kedua perhitungan *error* diatas, maka nilai *error* keduanya kurang dari 1 % yang berarti *error* pemodelan

photovoltaic bernilai sangat kecil. Sehingga sudah memenuhi syarat untuk dapat digunakan.

Pada karakteristik *photovoltaic*, dilakukan juga pengukuran terhadap keluaran dari *photovoltaic* berupa arus maksimum, tegangan maksimum dan daya maksimum pada kondisi lingkungan. Pengukuran data kondisi lingkungan dilakukan setiap 30 menit sekali di atap Venus, Gedung Teknik Fisika ITS pada tanggal 12 Maret 2019. Berikut merupakan data karakteristik *photovoltaic* pada kondisi lingkungan yang tertuang pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil pemodelan *photovoltaic* MSX120 pada setiap nilai irradiansi matahari dan suhu sel

Jam	Ir (W/m ²)	Suhu (°C)	I (A)	V (V)	P (W)
07.00	479,90	30,00	1,585469	32,19398	51,04256
07.30	500,27	34,02	1,608135	34,75664	55,89336
08.00	700,00	35,19	1,640819	33,7327	55,34927
08.30	776,00	40,53	1,654714	33,8504	56,01273
09.00	785,33	53,00	1,847659	27,10134	50,07405
09.30	838,63	50,24	1,858411	30,66249	56,98351
10.00	941,92	53,20	2,034446	30,64676	62,34918
10.30	1037,64	53,00	1,646676	29,88724	49,2146
11.00	1067,80	59,60	1,640656	29,48081	48,36785
11.30	1045,01	60,37	1,61265	28,82495	46,48457
12.00	1050,59	62,80	1,619732	29,11097	47,15197
12.30	1050,37	61,78	1,631745	29,73095	48,51333
13.00	1040,78	60,40	1,67547	30,50467	51,10965
13.30	954,08	55,14	1,607988	30,42036	48,91558
14.00	898,20	54,80	1,616879	32,11896	51,93246
14.30	845,02	51,11	1,61126	32,11001	51,73757

Tabel 4.1. Lanjutan.

Jam	Ir (W/m ²)	Suhu (°C)	I (A)	V (V)	P (W)
15.00	802,90	50,55	1,549354	30,79812	47,71721
15.30	730,84	49,94	1,604107	30,88549	49,54364
16.00	620,89	45,19	1,517964	30,43659	46,20166
16.30	500,23	40,01	1,511335	30,47055	46,0512
17.00	342,34	35,09	1,514026	30,41802	46,05367

Tabel 4.1 diatas dapat juga dijadikan acuan validasi nilai keluaran arus, tegangan serta daya pada *photovoltaic* dengan menggunakan kontroler *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) menggunakan metode P&O.

4.2 Analisa *Multi-input DC-DC Converter*

Multi-input DC-DC converter sebagai aktuator untuk mengoptimalkan besarnya arus yang dikontrol sehingga *photovoltaic* dan turbin angin mampu menghasilkan daya yang maksimal. Pada penelitian ini digunakan *multi-input Converter*, dengan mosfet utama bersumber dari *photovoltaic* dan mosfet kedua bersumber dari turbin angin. Proses perancangan *multi-input DC-DC converter* disesuaikan dengan besarnya komponen-komponen yang terdapat pada *battery controller*. Besarnya komponen penyusun *multi-input DC-DC converter* sebagai berikut.

Tabel 4. 2 Besar komponen penyusun multi-input DC-DC Buck-Boost konverter

Komponen	Nilai
Resistor (R)	50 Ω
Induktor (L)	220 μH
Kapasitor (C)	470 μF

Proses validasi rancangan *multi-input DC-DC converter* dilakukan dengan simulasi, jika V_{pv} diasumsikan sebesar 15 Volt, dan $V_{turbin\ angin}$ diasumsikan sebesar 15 Volt. *Photovoltaic* diletakkan di mosfet 1, sehingga *duty cycle* mosfet 1 (d_1) diberikan nilai sebesar 0.6. Sedangkan turbin angin diletakkan di mosfet 2, sehingga *duty cycle* mosfet 2 (d_2) diberikan nilai sebesar 0.5. Maka besar nilai output dari konverter yaitu :

$$\begin{aligned} V_o &= \frac{d_1}{1-d_2} V_{pv} + \frac{d_2}{1-d_2} V_{turbin\ angin} \\ &= \frac{0.6}{1-0.5} 15 + \frac{0.5}{1-0.5} 15 \\ &= 18 + 15 \\ V_o &= 33\ Volt \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka nilai V_o sebesar 33 Volt. Sedangkan hasil simulasi sebesar 33.89 Volt. Sehingga besar error yang didapatkan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Error &= \frac{V_{\text{hasil simulasi}} - V_{\text{perhitungan}}}{V_{\text{hasil perhitungan}}} \times 100\% \\ &= \frac{33.89 - 33}{33} \times 100\% \\ e &= 2,696\% \end{aligned}$$

Perhitungan diatas menunjukkan nilai *error* kurang dari 5%, sehingga nilai tersebut masih dalam ambang batas yang dapat digunakan. Maka dari itu, perancangan *multi-input Buck Boost Converter* dapat digunakan.

Setelah *multi-input Buck Boost Converter* dinyatakan dapat digunakan, kemudian dilakukan integrasi dengan kontroler PI pada masing-masing *plant*. Tujuan pemberian kontroler PI ini yakni untuk mengatur bukaan mosfet (*dutycycle*) yang berfungsi sebagai gerbang arus yang mengalir dari *photovoltaic* dan turbin angin menuju ke rangkaian *Buck-Boost Converter*, serta untuk mengoptimalkan arus agar sesuai dengan *set point*. Dalam

penelitian ini, *set point* berasal dari algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Tabel 4.3 dan tabel 4.4 merupakan nilai parameter kontroler PI yang ditanam pada masing-masing *photovoltaic* dan turbin angin.

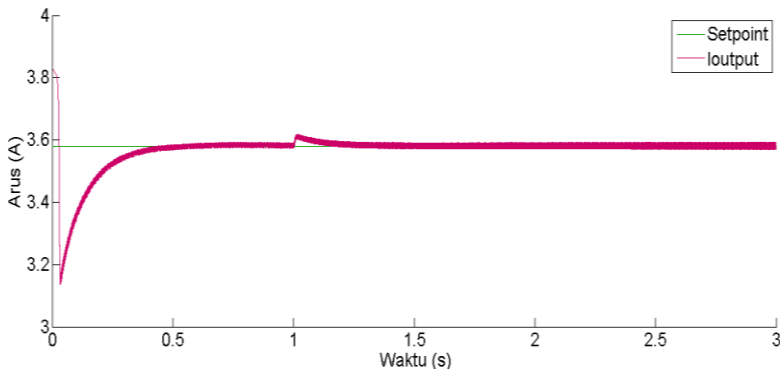
Tabel 4. 3 Parameter kontroler PI pada plant *Photovoltaic*

Parameter kontroler	Besar nilai
Gain Proportional (Kp)	1
Gain Integral (τ_i)	10

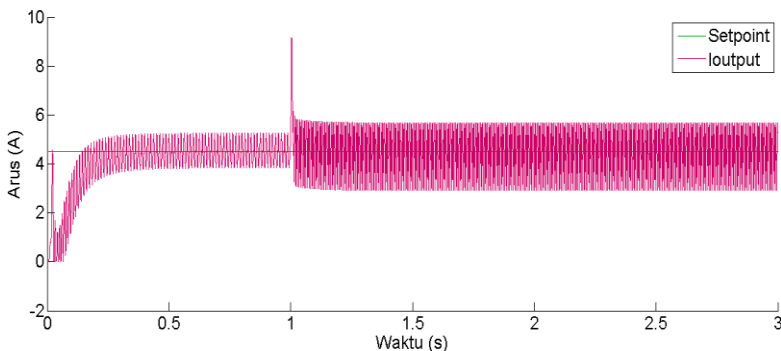
Tabel 4. 4 Parameter kontroler PI pada plant Turbin Angin

Parameter kontroler	Besar nilai
Gain Proportional (Kp)	0.000001
Gain Integral (τ_i)	1

Berdasarkan tabel 4.3 dan tabel 4.4 terlihat bahwa *plant photovoltaic* dan turbin angin memiliki nilai parameter kontroler PI yang berbeda dikarenakan keduanya memiliki karakteristik yang berbeda. Dengan adanya kontroler PI pada *multi-input Buck Boost Converter*, masing-masing plant dapat menjejak *set point* dan steady. Untuk dapat mengetahui masing-masing kontroler dapat menjejak *set point* perlu dilakukan uji performansi dengan memberikan inputan pada *photovoltaic* berupa irradiansi matahari dan suhu sel dengan berupa fungsi *ramp*, sedangkan pada turbin angin diberikan input berupa kecepatan angin yang berubah yakni dari kecepatan 4 m/s naik menjadi 6 m/s. Respon dari penjejakan *set point* pada masing-masing *photovoltaic* dan turbin angin dapat dilihat pada gambar 4.4 dan 4.5.

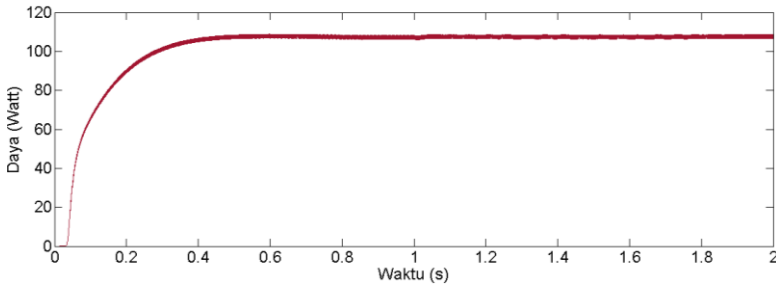


Gambar 4. 3 Respon arus output *photovoltaic* pada uji *closed loop* saat terjadi perubahan kecepatan angin



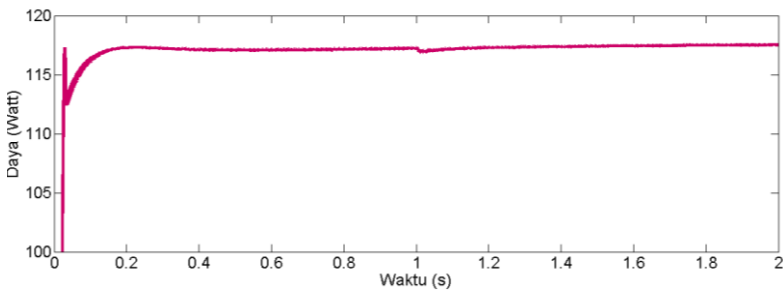
Gambar 4. 4 Respon arus output generator turbin angin saat terjadi perubahan kecepatan angin

Berdasarkan gambar 4.3 dan 4.4, diketahui bahwa pada detik ke 1 terdapat lonjakan arus baik di *photovoltaic* maupun di turbin angin. Hal itu dikarenakan pada detik ke 1 terdapat peningkatan kecepatan angin dari 4 m/s menjadi 6 m/s. Namun meskipun terdapat lonjakan tiba-tiba, arus dari kedua *plant* terbukti tetap dapat menjejak *set point* dan stabil.

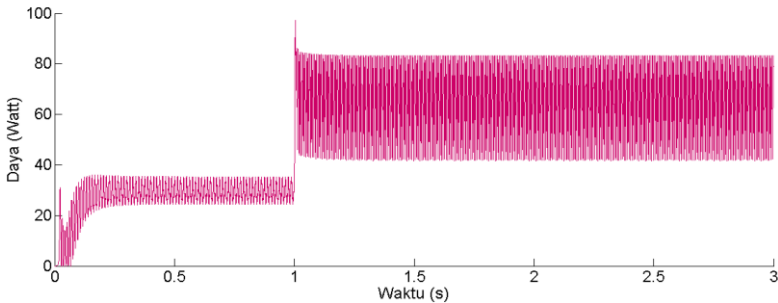


Gambar 4. 5 Respon daya output multi-input Buck-Boost Converter saat terjadi perubahan kecepatan angin

Meskipun arus dari masing-masing *plant* tetap dapat menjejak set point, namun daya pada detik ke 1 tetap mengalami peningkatan yang dikarenakan adanya peningkatan kecepatan angin. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan angin berpengaruh pada tegangan keluaran turbin angin, daya turbin angin akan mempengaruhi tegangan keluaran dari konverter seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.5.



Gambar 4. 6 Respon daya output photovoltaic saat terjadi perubahan kecepatan angin dari 4 m/s ke 6 m/s



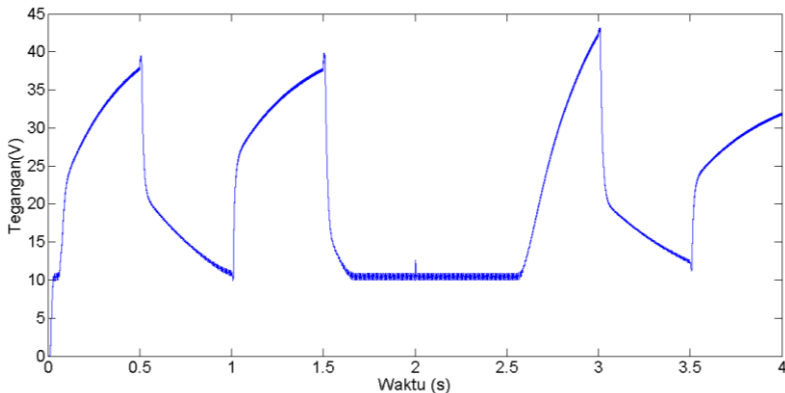
Gambar 4. 7 Respon daya turbin angin pada perubahan kecepatan angin dari 4 m/s ke 6 m/s

Gambar 4.6 merupakan respon daya *photovoltaic* terhadap perubahan kecepatan angin dari 4 m/s ke 6 m/s. Dari respon tersebut dapat disimpulkan bahwa daya *photovoltaic* tetap pada kondisi maksimal meskipun seperti pada gambar 4.7 terdapat kenaikan daya pada turbin angin akibat kenaikan kecepatan angin. Hal ini berarti bahwa *multi-input Buck-Boost Converter* dengan Kontroler PI mampu tetap menjaga pada kondisi optimum meskipun terdapat gangguan eksternal secara mendadak.

4.3 Analisa Implementasi Algoritma MPPT (Maximum Power Point Tracking) pada *Multi-input DC-DC Converter*

Untuk mengetahui kinerja pada masing-masing plant *photovoltaic* dan turbin angin yang sudah terdapat algoritma MPPT, perlu dilakukan uji implementasi. Uji implementasi dilakukan dengan 2 cara yakni pertama implementasi algoritma MPPT hanya diimplementasikan pada plant *photovoltaic* dengan diberikan kondisi lingkungan berupa temperatur sel dan irradiansi matahari berubah setiap 30 menit. Sedangkan pada turbin angin diberikan nilai PWM (*Pulse Widht Modulator*) yang konstan dan diberikan kecepatan angina yang konstan pula. Kedua, algoritma MPPT hanya diimplementasikan pada plant turbin angin dengan

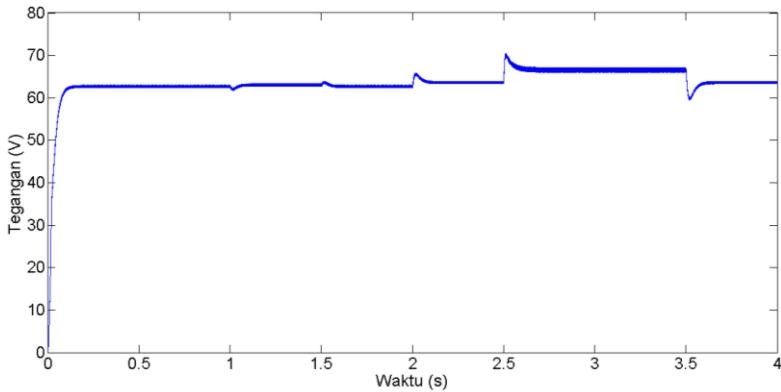
kecepatan angin yang berubah-ubah. Sehingga untuk plant *photovoltaic* diberikan nilai PWM konstan dengan nilai irradiansi matahari dan suhu sel konstan juga. Dengan dilakukan pengujian tersebut dapat diketahui pengaruh implementasi algoritma MPPT pada tegangan keluaran konverter. Berikut merupakan hasil pengujian dengan algoritma MPPT.



Gambar 4. 8 Tegangan keluaran multi-input konverter dengan PWM plant turbin angin konstan sebesar 0.5

Pada gambar 4.8 menunjukkan tegangan keluaran *multi-input converter* yang hanya dipengaruhi oleh *photovoltaic*. Dikarenakan input nya yang berupa irradiansi matahari dan temperatur sel berubah-ubah dan PWM (*Pulse Widht Modulator*) plant turbin angin diatur konstan yakni sebesar 0.5 dan kecepatan angin konstan yaitu sebesar 4 m/s. Dari gambar 4.8 diketahui bahwa tegangan keluaran *multi-input converter* naik-turun akibat perubahan input lingkungan.

Sedangkan hasil uji keluaran tegangan keluaran *multi-input converter* yang dipengaruhi turbin angin dapat dilihat pada gambar 4.9 di bawah ini.



Gambar 4. 9 Tegangan keluaran multi-input konverter dengan PWM plant *photovoltaic* konstan sebesar 0.5

Pada gambar 4.9 menunjukkan tegangan keluaran *multi-input converter* yang hanya dipengaruhi oleh turbin angin yang sudah terimplementasi algoritma MPPT. Hal itu dikarenakan input nya yang berupa kecepatan angin berubah-ubah dan PWM (*Pulse Widht Modulator*) plant *photovoltaic* diatur konstan yakni sebesar 0.5 serta irradiansi matahari dan temperatur sel diatur konstan yakni sebesar 1000 W/m^2 dan $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Dari gambar 4.9 di atas diketahui bahwa tegangan keluaran *multi-input converter* naik-turun akibat perubahan kecepatan angin pada turbin angin.

Berdasarkan gambar 4.8 dan 4.9 dapat disimpulkan bahwa algoritma MPPT memiliki pengaruh terhadap tegangan keluaran *multi-input converter*. Hal itu dapat terlihat apabila salah satu plant dibuat konstan, sehingga hasil implementasi MPPT pada masing-masing plant menghasilkan nilai yang berbeda pada multi-input converter.

4.4 Analisa Ekstraksi Daya Maksimum Pada Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida

Proses ekstraksi daya maksimum pada sistem hibrida digunakan data kondisi lingkungan sebagai data simulasi yakni irradiansi matahari, suhu permukaan sel *photovoltaic* serta kecepatan angin. Data-data kondisi lingkungan tersebut berubah setiap 30 menit secara *real-time* atau berubah setiap 0,5 detik pada simulasi. Data-data lingkungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.4 di bawah ini.

Tabel 4.5 Data kondisi lingkungan yang digunakan sebagai data simulasi sistem pembangkit listrik tenaga hibrida

Waktu	V angin (m/s)	Ir (W/m^2)	T($^{\circ}C$)
07.00	4,00	479,9	30
07.30	4,00	500,27	34,02
08.00	3,00	700	35,19
08.30	4,00	776	40,53
09.00	6,00	785,33	53
09.30	8,00	838,63	50,24
10.00	8,00	941,92	53,2
10.30	6,00	1037,64	53
11.00	6,00	1067,8	59,6
11.30	6,00	1045,01	60,37
12.00	6,00	1050,59	62,8
12.30	6,00	1050,37	61,78
13.00	3,00	1040,78	60,4
13.30	6,00	954,08	55,14
14.00	5,00	898,2	54,8
14.30	5,00	845,02	51,11

Tabel 4.5. Lanjutan

Waktu	V angin (m/s)	Ir (W/m ²)	T(°C)
15.00	5,00	802,9	50,55
15.30	4,00	730,84	49,94
16.00	5,00	620,89	45,19
16.30	4,00	500,23	40,01
17.00	4,00	342,34	35,09

4.4.1 Daya Keluaran pada *photovoltaic*

Daya keluaran dari *photovoltaic* yang tanpa kontroler seperti yang telah tercatat di tabel 4.1 dibandingkan dengan menggunakan daya keluaran dari *photovoltaic* dengan kontroler MPPT. Analisa dilakukan pada setiap besar irradiansi matahari dan suhu *photovoltaic* setiap 30 menit. Pengaruh irradiansi matahari dan suhu *photovoltaic* diamati melalui perubahan nilai arus (I) dan tegangan (V) yang akan mempengaruhi besarnya daya (P) keluaran *photovoltaic*. Berikut data perbandingan keluaran *photovoltaic* dengan menggunakan kontroler MPPT dan tanpa kontroler MPPT pada setiap irradiansi matahari dan suhu *photovoltaic*.

Tabel 4. 6 Perbandingan daya keluaran dengan kontroler MPPT

Ir (W/m ²)	Suhu (°C)	Tanpa kontroler			Kontroler MPPT		
		I (A)	V (V)	P (W)	I (A)	V (V)	P (W)
479,9	30	1,59	32,19	51,04	1,49	32,45	48,42
500,27	34,02	1,61	34,76	55,89	1,86	31,15	57,99
700	35,19	1,64	33,73	55,35	1,99	29,55	58,81
776	40,53	1,65	33,85	56,01	2,04	28,75	58,59
785,33	53	1,85	27,1	50,07	2,06	29	59,7
838,63	50,24	1,86	30,66	56,98	2,06	29,08	59,91

Tabel 4. 6. Lanjutan.

Ir (W/m ²)	Suhu (°C)	Tanpa kontroler			Kontroler MPPT		
		I (A)	V (V)	P (W)	I (A)	V (V)	P (W)
941,92	51,8	2,03	30,65	62,35	2,06	29,08	59,94
1037,64	53	2,11	27,58	49,21	2,06	28,77	59,34
1067,8	59,6	2,14	27,27	48,37	2,06	28,37	58,49
1050,59	62,8	2,12	22,25	47,15	2,11	28,42	60
1050,37	61,8	2,12	22,88	48,51	2,35	28,51	66,87
1040,78	60,4	2,09	24,47	51,11	2,32	28,55	66,13
954,08	55,1	2,02	24,24	48,92	2,39	28,61	68,31
898,2	54,8	1,92	27,05	51,93	2,41	29,29	70,58
845,02	51,1	1,91	27,08	51,74	2,41	29,78	71,86
802,9	50,6	1,75	27,26	47,72	2,34	29,72	69,66
730,84	49,9	1,6	30,89	49,54	2,32	29,14	67,63
620,89	45,2	1,52	30,44	46,2	2,22	28,88	64,07
500,23	40	1,51	30,47	46,05	2,23	28,05	62,65
342,34	35,1	1,51	30,42	46,05	2,24	23,6	52,88

Berdasarkan Tabel 4.6, parameter yang memiliki pola perubahan pada setiap kondisi lingkungan adalah arus. Semakin besar arus, maka semakin besar pula daya yang dihasilkan. Besarnya tegangan yang dihasilkan oleh *photovoltaic* dipengaruhi oleh arus yang dikontrol oleh kontroler PI. Pada karakteristik *photovoltaic* perubahan irradiansi matahari mempengaruhi besarnya arus yang dihasilkan, sedangkan suhu mempengaruhi tegangan yang dihasilkan. Pada Tabel 4.6, baik pada *photovoltaic* tanpa menggunakan kontroler maupun menggunakan kontroler MPPT irradiansi matahari pada 941,92 W/m² menghasilkan daya yang lebih besar daripada daya pada irradiansi matahari 1037,64 W/m², hal ini disebabkan temperatur sel pada 1037,64 W/m² lebih tinggi dari pada temperatur sel pada irradiansi 941,92 W/m². Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai irradiansi

matahari, maka akan semakin besar pula arus yang dihasilkan. Namun temperatur sel yang semakin tinggi dapat menyebabkan tegangan *photovoltaic* turun. Hal inilah yang menyebabkan irradiansi matahari 941,92 W/m² menghasilkan daya yang lebih besar daripada irradiansi matahari 1037,64 W/m².

Berikut merupakan perbandingan selisih daya yang dihasilkan *photovoltaic* menggunakan kontroler MPPT dengan tanpa menggunakan kontroler adalah sebagai berikut.

Tabel 4. 7 Selisih daya *photovoltaic* tanpa kontroler dengan *photovoltaic* menggunakan kontroler MPPT

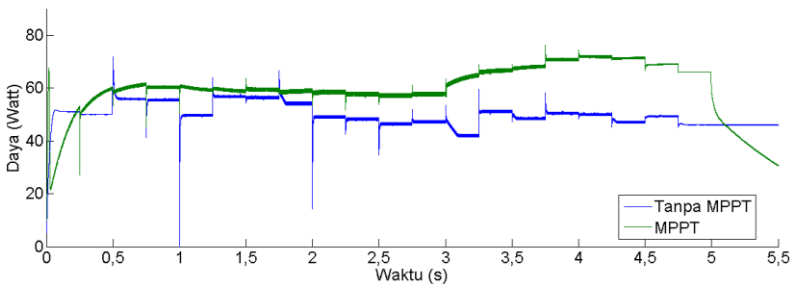
Ir (W/m ²)	Suhu (°C)	P tanpa kontroler (W)	P kontroler MPPT (W)	Selisih P (%)
479,9	30	51,04	48,41	5,14%
500,27	34,02	55,89	57,99	-3,75%
700	35,19	55,34	58,80	-6,25%
776	40,53	56,012	58,58	-4,60%
785,33	53	50,07	59,70	-19,22%
838,63	50,24	56,98	59,90	-5,14%
941,92	51,8	62,34	59,93	3,86%
1037,64	53	49,21	59,33	-20,57%
1067,8	59,6	48,36	58,48	-20,92%
1045,01	60,37	46,48	58,43	-25,71%
1050,59	62,8	47,15	59,99	-27,24%
1050,37	61,78	48,51	66,86	-37,84%
1040,78	60,4	51,10	66,12	-29,38%
954,08	55,14	48,91	68,31	-39,65%
898,2	54,8	51,93	70,58	-35,91%
845,02	51,11	51,73	71,86	-38,90%
802,9	50,55	47,71	69,66	-45,99%
730,84	49,94	49,54	67,63	-36,51%

Tabel 4.7. Lanjutan

Ir (W/m ²)	Suhu (°C)	P tanpa kontroler (W)	P kontroler MPPT (W)	Selisih P (%)
620,89	45,19	46,20	64,07	-38,68%
500,23	40,01	46,05	62,64	-36,04%

Tabel 4.7 diatas merupakan selisih daya yang dihasilkan *photovoltaic* menggunakan kontroler MPPT dibandingkan tanpa controller. Besarnya prosentase yang dihasilkan antara *photovoltaic* menggunakan kontroler MPPT dengan *photovoltaic* tanpa menggunakan kontroler didapatkan dari selisih antara daya keluaran tanpa kontroler dengan daya keluaran menggunakan kontroler MPPT dibandingkan besarnya daya tanpa kontroler dan dikalikan 100%. Dari tabel 4.6 diketahui terdapat tanda negatif dan positif pada nilai error. Error positif menunjukkan bahwa *photovoltaic* tanpa menggunakan kontroler menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan *photovoltaic* dengan menggunakan kontroler MPPT, sedangkan error negatif menunjukkan bahwa *photovoltaic* dengan menggunakan kontroler MPPT menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan *photovoltaic* tanpa menggunakan kontroler. Berdasarkan tabel 4.6, selisih daya keluaran paling kecil berada pada pukul 07.30 WIB dengan irradiansi matahari 500,27 W/m² dan temperatur 34,02 °C yaitu sebesar -3,75%. Selain itu, kontroler MPPT terbukti mampu memaksimalkan ekstraksi daya *photovoltaic*. Hal itu terlihat dari pukul 07.00-17.00 WIB, daya keluaran *photovoltaic* dengan kontroler MPPT menghasilkan daya keluaran yang lebih besar dari *photovoltaic* tanpa kontroler kecuali pada pukul 07.00 WIB dan 10.00 WIB. Hal tersebut menunjukkan bahwa kontroler MPPT mampu menjejak titik daya maksimum pada setiap irradiansi, sehingga dapat dihasilkan daya keluaran maksimum.

Berikut merupakan grafik perbandingan daya keluaran *photovoltaic* tanpa menggunakan kontroler dibandingkan dengan menggunakan kontroler MPPT yang tertuang pada gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Grafik perbandingan daya keluaran *photovoltaic* tanpa menggunakan kontroler dengan *photovoltaic* menggunakan kontroler MPPT

Berdasarkan gambar 4.10 diketahui bahwa daya keluaran *photovoltaic* dengan menggunakan kontroler MPPT mampu memaksimalkan ekstraksi daya dibandingkan dengan *photovoltaic* tanpa menggunakan kontroler.

4.4.2 Daya Keluaran pada Turbin Angin

Daya keluaran turbin angin bergantung pada besar nilai kecepatan angin. Kecepatan angin yang digunakan sebagai masukan turbin angin ini berasal dari data kecepatan angin rata-rata harian Jawa Timur. Dalam analisa turbin angin ini, data kecepatan angin yang digunakan hanya pada jam 07.00-17.00 WIB, dikarenakan menyesuaikan dengan pengukuran data pada *photovoltaic*.

Data yang diambil merupakan daya keluaran turbin angin yang sudah terintegrasi dengan *photovoltaic* dalam dc-dc multi-input *Buck-Boost* konverter dan belum menggunakan kontroler MPPT. Berikut merupakan profil kecepatan angin yang digunakan sebagai data simulasi.

Tabel 4. 8 Profil kecepatan angin

Jam	Kecepatan angin (m/s)
07.00	4,00
07.30	4,00
08.00	3,00
08.30	4,00
09.00	6,00
09.30	8,00
10.00	8,00
10.30	6,00
11.00	6,00
11.30	6,00
12.00	6,00
12.30	6,00
13.00	3,00
13.30	6,00
14.00	5,00
14.30	5,00
15.00	5,00
15.30	4,00
16.00	5,00
16.30	4,00
17.00	4,00

Dari Tabel 4.8 diatas kemudian dilakukan simulasi dengan tanpa kontroler dan dengan kontroler MPPT. Kemudian dibandingkan daya keluaran turbin angin pada keduanya. Berikut merupakan perbandingan daya keluaran turbin angin tanpa kontroler dengan daya keluaran turbin angin menggunakan kontroler MPPT.

Tabel 4. 9 Perbandingan daya keluaran turbin angin tanpa kontroler dengan daya keluaran menggunakan kontroler MPPT

Kecepatan angin (m/s)	Tanpa kontroler MPPT			Dengan kontroler MPPT		
	I (A)	V (V)	P (W)	I (A)	V (V)	P (W)
4	0,41	12,25	5,00	2,82	15,06	42,54
4	0,52	12,44	6,48	2,61	15,89	41,49
4	0,58	12,43	7,22	3,20	25,77	82,35
6	0,50	19,55	9,72	3,71	25,58	94,99
8	0,62	26,55	16,58	3,26	35,37	115,22
8	0,65	26,57	17,32	3,31	35,27	116,65
6	0,56	19,55	10,91	3,30	25,92	85,54
6	0,60	19,57	11,68	3,40	25,15	85,40
6	0,59	19,57	11,55	3,45	24,65	85,01
6	0,59	19,57	11,51	3,46	24,47	84,62
6	0,59	19,58	11,62	3,48	18,70	65,09
3	0,45	8,89	3,99	2,23	22,79	50,72
6	0,61	19,55	11,89	3,69	18,67	68,87
5	0,57	16,37	9,39	3,71	17,50	64,97
5	0,53	16,86	8,91	3,76	17,20	64,70
4	0,55	14,96	8,29	3,28	15,98	52,42
5	0,54	15,88	8,55	3,23	15,44	49,87
4	0,55	12,44	6,82	3,04	14,91	45,3
4	0,55	12,51	6,85	2,86	15,11	43,22

Berdasarkan Tabel 4.9, turbin angin dengan menggunakan kontroler MPPT menghasilkan daya keluaran yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin tanpa kontroler. Seperti terlihat pada kecepatan angin 8 m/s, didapatkan daya keluaran paling besar

pada turbin tanpa kontroler maupun dengan kontroler MPPT yakni 17,32 Watt dan 116,65 Watt. Terdapat selisih besar daya yang signifikan pada keduanya. Besar nilai tegangan pada turbin angin dengan kontroler MPPT memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan tegangan keluaran dari turbin angin tanpa kontroler. Hal tersebut disebabkan karena kontroler MPPT menjejak tegangan maksimum pada setiap kecepatan angin. Dengan didapatkannya tegangan yang maksimum, maka akan didapatkan yang yang maksimum.

Selisih daya yang dihasilkan turbin angin tanpa kontroler dibandingkan turbin angin menggunakan kontroler MPPT, dapat dilihat pada tabel 4.10.

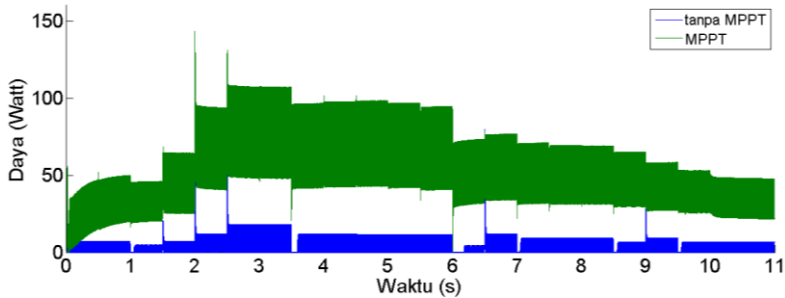
Tabel 4. 10 Selisih daya keluaran turbin angin kontroler dan turbin angin menggunakan kontroler MPPT

Jam	Kecepatan angin (m/s)	Selisih (%)
07.00	4,00	-750,31%
07.30	4,00	-540,47%
08.00	3,00	-501,70%
08.30	4,00	-1041,06%
09.00	6,00	-876,87%
09.30	8,00	-594,92%
10.00	8,00	-573,39%
10.30	6,00	-684,24%
11.00	6,00	-631,25%
11.30	6,00	-636,14%
12.00	6,00	-635,24%
12.30	6,00	-460,07%
13.00	3,00	-1169,99%
13.30	6,00	-479,28%

Tabel 4.10. Lanjutan.

Jam	Kecepatan angin (m/s)	Selisih (%)
14.00	5,00	-591,72%
14.30	5,00	-626,22%
15.00	5,00	-551,70%
15.30	4,00	-532,39%
16.00	5,00	-483,44%
16.30	4,00	-564,31%
17.00	4,00	-530,65%

Berdasarkan tabel 4.10 diatas, besarnya prosentase daya keluaran yang dihasilkan antara turbin angin menggunakan kontroler MPPT dengan turbin angin tanpa kontroler didapatkan dari selisih antara daya keluaran tanpa kontroler dengan daya keluaran menggunakan kontroler MPPT dibandingkan besarnya daya tanpa kontroler dan dikalikan 100%. Dari tabel 4.10 diketahui terdapat tanda negatif dan positif pada nilai error. Error positif menunjukkan bahwa turbin angin tanpa kontroler menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin dengan menggunakan kontroler MPPT, sedangkan error negatif menunjukkan bahwa turbin angin dengan menggunakan kontroler MPPT menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin tanpa kontroler. Berdasarkan tabel 4.10, selisih daya keluaran paling kecil berada pada pukul 12.30 WIB dengan kecepatan angin 6 m/s yaitu sebesar -460,07%. Selain itu, kontroler MPPT terbukti mampu memaksimalkan ekstraksi daya turbin angin. Hal itu terlihat dari pukul 07.00-17.00 WIB, daya keluaran turbin angin dengan kontroler MPPT menghasilkan daya keluaran yang lebih besar dari turbin angin tanpa kontroler. Hal tersebut menunjukkan bahwa kontroler MPPT mampu menjejak titik daya maksimum pada setiap kecepatan angin, sehingga dapat dihasilkan daya keluaran maksimum.



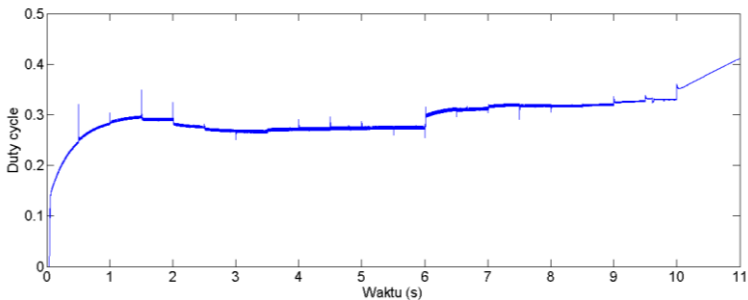
Gambar 4. 11 Grafik perbandingan daya output generator turbin angin saat profil kecepatan angin sesuai dengan Tabel 4.7

Berdasarkan gambar 4.11 diketahui bahwa daya keluaran turbin angin dengan menggunakan kontroler MPPT mampu memaksimalkan ekstraksi daya dibandingkan dengan turbin angin tanpa kontroler.

4.4.3 Analisa Tegangan Keluaran Multi-input DC-DC Konverter

Besar tegangan keluaran dari multi-input DC-DC Konverter tidak lepas dari pengaruh kinerja algoritma MPPT dan kontroler PI. Hal itu dikarenakan hasil nilai perbandingan nilai arus referensi keluaran dari MPPT dengan arus terukur dari *plant* digunakan oleh kontroler PI untuk menghasilkan nilai *duty cycle* pada PWM (*Pulse Widht Modulation*) generator. Sinyal kontrol arus yang terkandung dalam *duty cycle* tersebutlah yang mengendalikan rasio bukaan mosfet. Mosfet sendiri berfungsi sebagai kran yang dilalui oleh arus yang berasal dari *plant* baik *photovoltaic* maupun turbin angin untuk dialirkan ke multi-input converter.

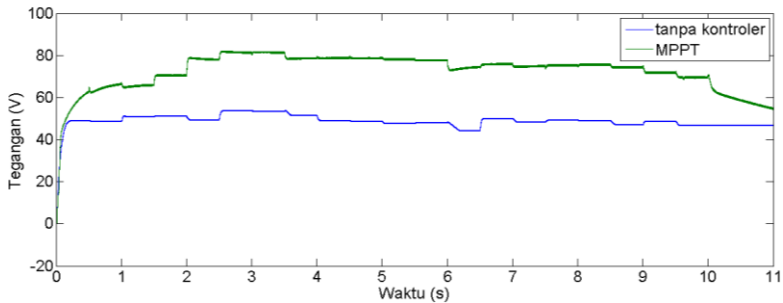
Berikut merupakan grafik sinyal kontrol arus yang mengendalikan mosfet pada PWM generator.



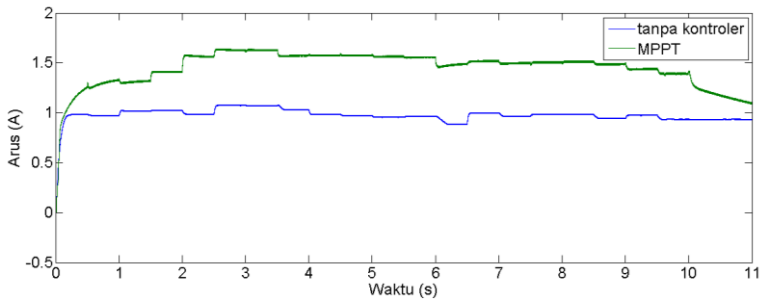
Gambar 4. 12. Sinyal kontrol arus dari plant *photovoltaic*

Pada gambar 4.12 diatas merupakan nilai *duty cycle* yang mengandung sinyal kontrol arus pada plant *photovoltaic*. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa besar nilai *duty cycle* tiap waktunya naik-turun, dikarenakan adanya perubahan nilai input pada *photovoltaic* yakni irradiansi matahari dan suhu sel. Selain nilai *duty cycle* yang bergantung pada perubahan nilai input, juga bergantung pada nilai error antara setpoint (arus referensi) dengan arus terukur dari plant. Error tersebut kemudian oleh kontroler PI dikendalikan agar didapatkan error minimum atau sesuai dengan setpoint. Hal itu diketahui dengan nilai *duty cycle* yang stabil, pada grafik terdapat pada detik ke 2,5 sampai detik ke 6. Kemudian terjadi peningkatan nilai *duty cycle* yang juga disebabkan peningkatan irradiansi matahari dan suhu sel.

Tegangan dan arus keluaran dari konverter tentunya dipengaruhi oleh tegangan input nya. Jika tegangan inputnya bernilai besar, maka tegangan keluarannya pun juga akan ikut besar. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.13 dan 4.14 di bawah ini sebagai berikut.



Gambar 4. 13 Perbandingan nilai tegangan keluaran multi-input konverter dengan menggunakan MPPT dan tanpa kontroler



Gambar 4. 14 Perbandingan nilai arus keluaran multi-input konverter dengan menggunakan MPPT dan tanpa kontroler

Berdasarkan gambar 4.13 dan 4.14 di atas, dapat dilihat bahwa tegangan dan arus keluaran dari multi-input konverter yang menggunakan kontroler MPPT memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa kontroler. Hal itu disebabkan adanya pemaksimalan ekstraksi tegangan dan arus pada masing-masing plant yang menggunakan kontroler MPPT. Sehingga ketika kedua sumber yakni *photovoltaic* dan turbin angin dijumlahkan tegangan dan arus keluarannya, akan didapatkan nilai yang maksimal. Tegangan dan arus keluaran yang maksimal tersebut akan

menghasilkan tegangan dan arus keluaran multi-input konverter yang maksimal pula.

4.5 Analisa Penstabilan Keluaran Tegangan pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida

Tegangan keluaran pada PLTH perlu dilakukan penstabilan tegangan keluaran dengan menggunakan *Battery Controller* yang didalamnya terdapat aktuator berupa DC-DC konverter dengan kontrol PI sebagai metode kontrol menjejak nilai tegangan sesuai dengan *set point* yaitu 12 Volt sesuai dengan tegangan pada baterai. DC-DC konverter terdiri dari beberapa komponen elektronik yang spesifikasinya dapat ditentukan dengan cara berikut. Berdasarkan penelitian Sidabutar dkk pada tahun 2014 (Sidabutar, dkk., 2014).

Tegangan masukan minimal (V_o)	= 19,84 Volt
Tegangan keluaran Battery Controller	= 12 Volt
Arus keluaran	= 2,4 Ampere
Frekuensi switching	= 40.000 Hz

- Menentukan nilai *Duty Cycle*

$$\frac{V_{baterai}}{V_o} = \frac{D}{1-D}$$

$$\frac{12}{19,84} = \frac{D}{1-D}$$

$$12 - 12 D = 19,84 D$$

$$31,84 D = 12$$

$$D = 0,38$$

- Menentukan nilai hambatan

$$R = \frac{V_{baterai}}{I_{baterai}}$$

$$R = \frac{12}{2,4} = 5 \text{ Ohm}$$

- Menentukan Nilai ΔV_o
 $\Delta V_o = \pm 1\% V_{baterai}$
 $\Delta V_o = \pm 1\% \times 12 \text{ Volt}$
 $\Delta V_o = \pm 0,12 \text{ Volt}$

- Menentukan Nilai Induktor Minimum (L_{min})

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2}{2 \times F}$$

$$L_{min} = \frac{(1 - 0,28)^2}{2 \times 40000}$$

$$L_{min} = 24,025 \mu H$$

- Menentukan Nilai Kapasitor Minimum (C_{min})

$$C_{min} = \frac{V_{baterai} \times D}{R \times F \times \Delta V_{baterai}}$$

$$C_{min} = \frac{12 \times 0,38}{50 \times 40000 \times 0,12}$$

$$C_{min} = 0,00019 F = 19 \mu F$$

Berdasarkan perhitungan diatas maka spesifikasi untuk DC-DC konverter dapat ditentukan, hambatan atau beban pada konverter memiliki besar sebesar 5Ω , induktor minimum (L_{min}) berdasarkan perhitungan memiliki besar sebesar $6,019 \mu H$ pada simulasi konverter dipasang nilai sebesar $220 \mu H$ dikarenakan disesuaikan dengan induktor yang terdapat pada pasar, besar kapasitor minimum (C_{min}) berdasarkan perhitungan sebesar $153,022 \mu F$, pada simulasi nilai kapasitor dipasang sebesar $470 \mu F$ berdasarkan besarnya kapasitor yang ada pada pasar secara umumnya dan masih memenuhi parameter minimal dari hasil perhitungan. Dikarenakan besarnya nilai dari komponen akan dapat distabilkan menjadi 12 Volt .

Pada *Battery Controller* ini menggunakan parameter kontroler PI dengan metode *trial and error* sebagai berikut.

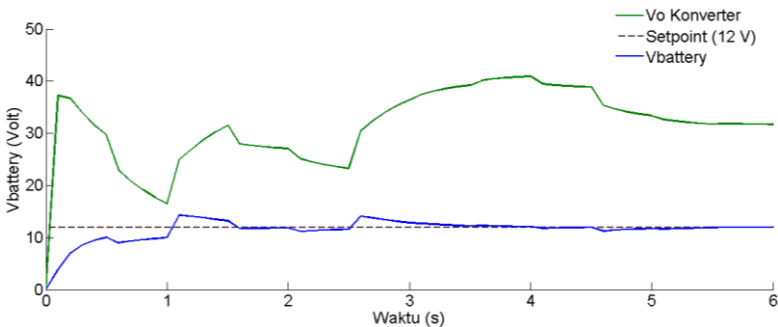
Tabel 4. 11 Tabel parameter kontroler PI pada *battery controller*

Parameter controller	Besar nilai
Gain Proportional (Kp)	0.000001
Gain Integral (τ_i)	0,1

Tabel 4. 12 Data keluaran *battery controller*

Jam	V angin (m/s)	I _r (W/m ²)	T(°C)	V _o (V)	V _{bat} (V)	Error
07.00	4,00	479,9	30	24,65	3,61	-69,93%
07.30	4,00	500,27	34,02	31,69	9,35	-22,09%
08.00	3,00	700	35,19	20,98	9,31	-22,41%
08.30	4,00	776	40,53	19,72	11,35	-5,40%
09.00	6,00	785,33	53	28,62	13,78	14,86%
09.30	8,00	838,63	50,24	29,05	12,24	2,03%
10.00	8,00	941,92	53,2	27,23	11,82	-1,47%
10.30	6,00	1037,64	53	26,08	11,31	-5,77%
11.00	6,00	1067,8	59,6	24,54	12,38	3,14%
11.30	6,00	1045,01	60,37	25,75	13,41	11,75%
12.00	6,00	1050,59	62,8	33,91	12,7	5,87%
12.30	6,00	1050,37	61,78	37,28	12,31	2,57%
13.00	3,00	1040,78	60,4	38,91	12,25	2,07%
13.30	6,00	954,08	55,14	40,41	11,99	-0,08%
14.00	5,00	898,2	54,8	40,4	11,87	-1,06%
14.30	5,00	845,02	51,11	39,09	11,55	-3,77%
15.00	5,00	802,9	50,55	36,29	11,66	-2,87%
15.30	4,00	730,84	49,94	33,72	11,73	-2,23%
16.00	5,00	620,89	45,19	32,35	11,9	-0,86%
16.30	4,00	500,23	40,01	31,84	11,99	-0,09%
17.00	4,00	342,34	35,09	31,77	11,99	-0,06%

Berdasarkan tabel 4.12 dapat dilihat bahwa nilai keluaran *battery controller* naik turun, namun pada akhirnya dapat mendekati set point yakni 12 Volt. Naik turun dari keluaran *battery controller* dikarenakan adanya perubahan parameter kondisi lingkungan. Nilai rata-rata error dari *battery controller* yakni 8,59%. Berikut merupakan respon *battery controller* menggunakan kontroler PI terhadap *setpoint* sebesar 12 Volt pada setiap kondisi lingkungan.



Gambar 4.15 Respon kontrol PI pada *battery controller*

Gambar 4.15 diatas merupakan hasil respon kontrol *battery controller* dengan set point 12 volt. Respon tegangan keluaran dari *battery controller* naik turun mengikuti tegangan keluaran converter. Tegangan konverter juga memiliki trend naik turun akibat adanya perubahan irradiansi matahari, suhu panel dan kecepatan angin setiap 30 menit. Namun, respon naik turun tersebut dapat distabilkan oleh *battery controller* untuk dapat mencapai set point dan dapat steady. Nilai *error steady state* (ess) sebesar 0,27% dan *maximum overshoot* (Mp) sebesar 18,94%. Kedua parameter tersebut menjadi acuan respon kontrol dikatakan baik atau buruk. Melihat bahwa nilai ess kurang dari 5% dan nilai

Mp kurang dari 25%, maka respon kontrol penstabil tegangan keluaran dari pembangkit listrik tenaga hibrida ini dikatakan baik.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan beberapa analisa yang telah dilakukan, maka kesimpulan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

- a. Kontroler MPPT mampu mengekstraksi daya maksimum pada *photovoltaic* dengan nilai K_p sebesar 1 dan K_i sebesar 10 pada irradiansi $1050,59 \text{ W/m}^2$ dan kecepatan angin 6 m/s sebesar 60 Watt dibandingkan tanpa kontroler sebesar $47,15 \text{ Watt}$.
- b. Kontroler MPPT mampu mengekstraksi daya maksimum pada turbin angin pada kecepatan angin 8 m/s dan irradiansi matahari $838,63 \text{ W/m}^2$ sebesar $116,65 \text{ Watt}$ dibandingkan tanpa kontroler sebesar $17,32 \text{ Watt}$.
- c. Daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh kontroler MPPT yakni sebesar $134,4 \text{ Watt}$ dibandingkan tanpa kontroler sebesar $46,2 \text{ Watt}$ pada irradiansi matahari $1050,59 \text{ W/m}^2$ dan kecepatan angin 6 m/s .
- d. *Battery controller* dapat menstabilkan tegangan keluaran DC-DC Konverter Buck-Boost dengan nilai *error steady state* (*ess*) sebesar $0,27\%$ dan *maximum overshoot* (M_p) sebesar $18,94\%$ serta error rata-rata *battery controller* sebesar $8,59\%$.

5.2 Saran

Adapun saran lebih lanjut terkait penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Perlu adanya pembanding kontroler lain yang memiliki performa dan keandalan lebih baik agar dapat mengekstraksi daya lebih maksimal.

- b. Adanya validasi data pada turbin angin yang sesuai dengan spesifikasi generator turbin, dimana berasal dari alat nyata bukan dari literature maupun simulasi dari Simulink Matlab serta sistem manajemen pengisian baterai pada sistem pembangkit listrik tenaga hibrida.

DAFTAR PUSTAKA

- A.R., J. (2011). *Wind Turbine Technology*. United States of America: CRC Press.
- Abdullah, M. A., Yatim, A., Wei, C., & Tan. (2011). A Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energ System. *IEEE*, 321-326.
- Alik, R., Jusoh, A., & Sutikno, T. (2015). A Review on Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic System. *TELKOMNIKA*, 745-751.
- Ashari, M. (2015). *Sistem Konverter DC Desain Rangkaian Elektronika Daya*. Surabaya: ITS Press.
- Asy'ari, M. K. (2018). *Rancang Bangun DC-DC Buck Converter Berbasis Pengendalian Logika Fuzzy Tipe - 2 pada Prototipe Turbin Angin Skala Kecil*. Surabaya: Departemen Teknik Fisika, ITS.
- BPPT. (2016). *Indonesia Energy Outlook 2016*. Retrieved from www.bppt.go.id
- Chapman, S. J. (2005). *Electric Machinery Fundamentals (4th ed.)*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Chen, Y.-M., Liu, Y.-C., Hung, S.-C., & Cheng, C.-S. (2007). Multi-Input Inverter for Grid-Connected Hybrid PV/Wind Power System. *IEEE*, 1070-1077.
- Dobbs, B. G., & Chapman, P. L. (2003). A multiple-input dc- dc converter. *IEEE Power Electronics Letters*, 6-9.

- Dzulkarnain , Y., Ashari, M., & Riawan, D. C. (2014). Desain dan Implementasi Multi-Input Konverter DC-DC pada Sistem Tenaga Listrik Hibrida. *POMITS*, 1-6.
- Dzulqarnain, Y., Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M., & Chandra, D. (2011). DESAIN DAN IMPLEMENTASI MULTI-INPUT KONVERTER DC-DC PADA SISTEM TENAGA LISTRIK HIBRIDA PV/WIND. *JURNAL ITS*, 1-6.
- Hariato, R. (2018). *Implementasi Supervisory Control untu Pengendalian Kecepatan Turbin Angin Menggunakan Metode Direct Torque Control Berbasis Boost Converter*. Surabaya: Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Heier, S. (1998). *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. John Wiley & Sons Ltd.
- Khaligh, A. (2008). A Multiple-Input Dc-Dc Positive Buck-Boost Converter Topology. *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition* (pp. 1522-1526). Austin: IEEE.
- Manwell, J. G. (2009). *Wind Energy Explained (2nd ed.)*Wind Energy Explained (2nd ed.). Chicester, USA: Jhon Wiley & Sons Ltd.
- Nasional, S. J. (2016). *Outlook Energi 2016*.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.

Partha, C. G., Wijaya, I. W., & Janardana, I. G. (2012). SISTEM ON GRID PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MATAHARI MENGGUNAKAN MAXIMUM POWER POINT TRACKING.

PLN, P. (2016). *Statistik PLN 2015*.

Ram, J., & Rajasekar, N. (2017). Design and overview of maximum power point tracking techniques in wind and solar photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1138-1159.

Rashid, H. M. (2011). *Power Electronics Handbook : Devices, Circuits, And Applications Third Edition*. Pencilosa : Elsevier.

Sidabutar, D. S., Musyafa, A., & Hantoro, R. H. (2014). Rancang Bangun Buck-Boost Converter Pada Panel Surya Menggunakan Metode Kontrol PI Dan PID Berbasis Mikrokontroler. Surabaya.

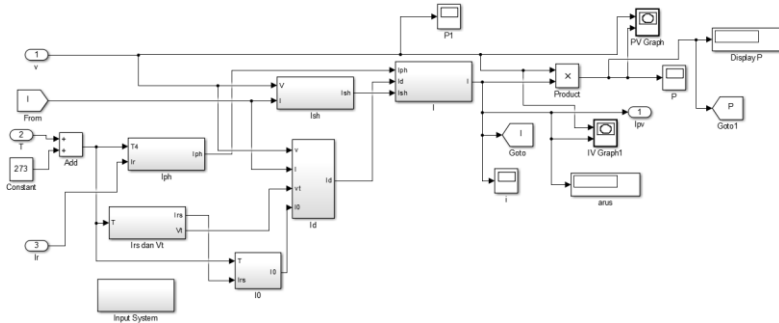
Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1198-1208.

Zaini, H. J. (2016). *Implementasi Maximum Power Point Tracker (MPPT) pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Metode Perturb and Observe*. Yogyakarta: Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

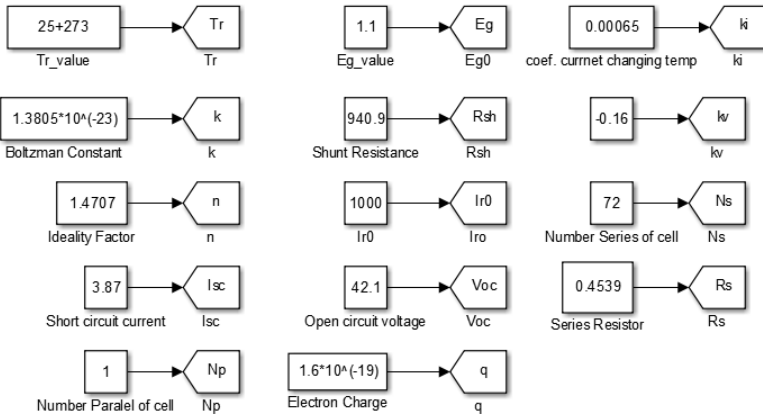
LAMPIRAN A

SIMULINK SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HIBRIDA PADA MATLAB 2014A

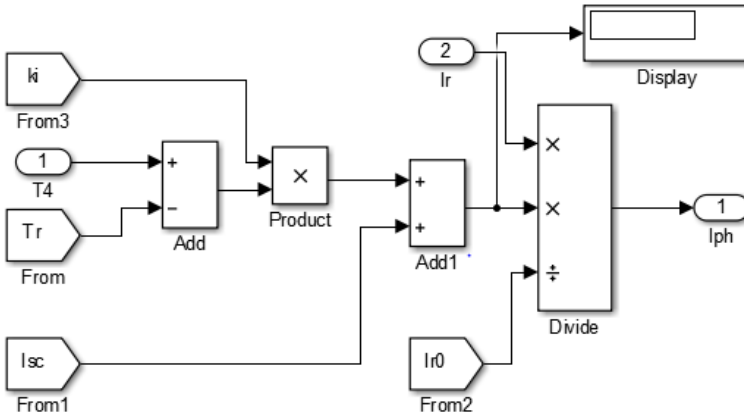
A.1 Model sistem *Photovoltaic*



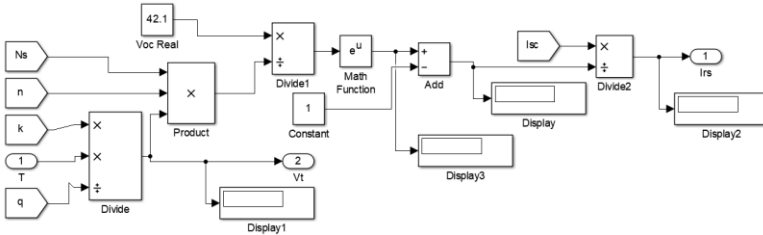
A.2 Parameter Input Sistem *Photovoltaic*



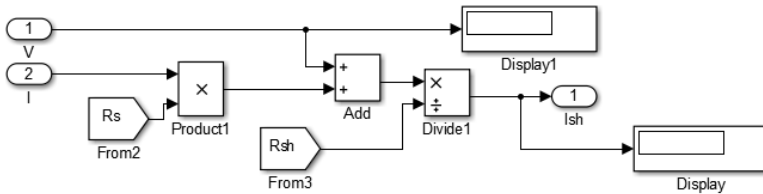
A.3 Model Perhitungan Iph dari Sistem *Photovoltaic*



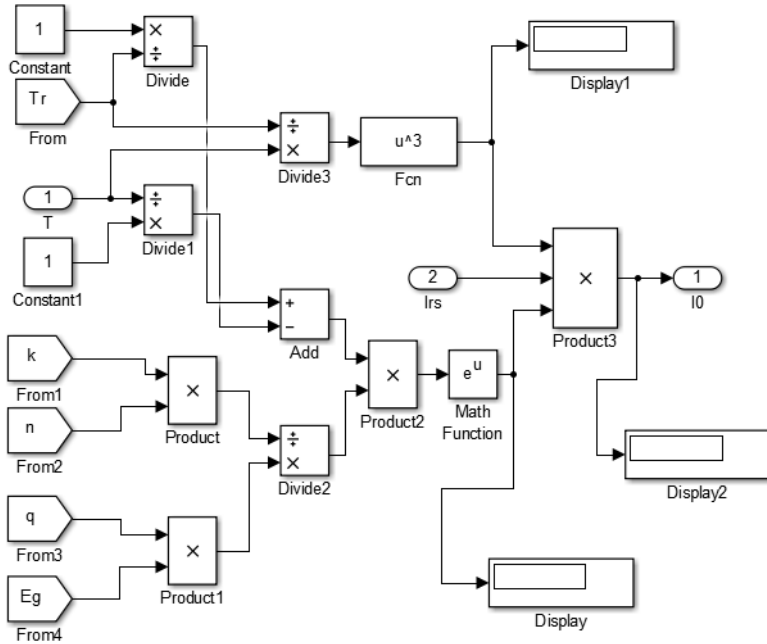
A.4 Model Perhitungan Irs dan Vt dari Sistem *Photovoltaic*



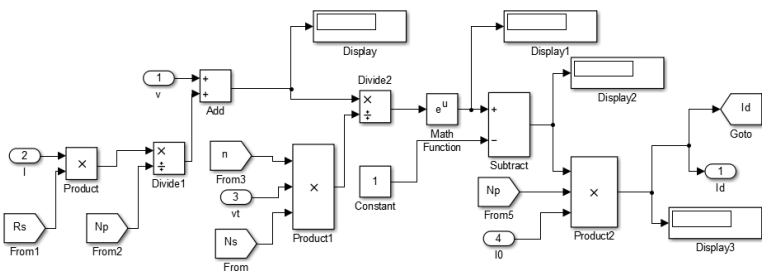
A.5 Model Perhitungan Ish dari Sistem *Photovoltaic*



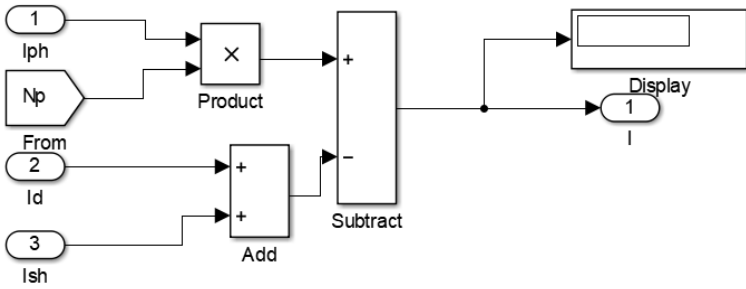
A.6 Model Perhitungan I_0 dari Sistem *Photovoltaic*



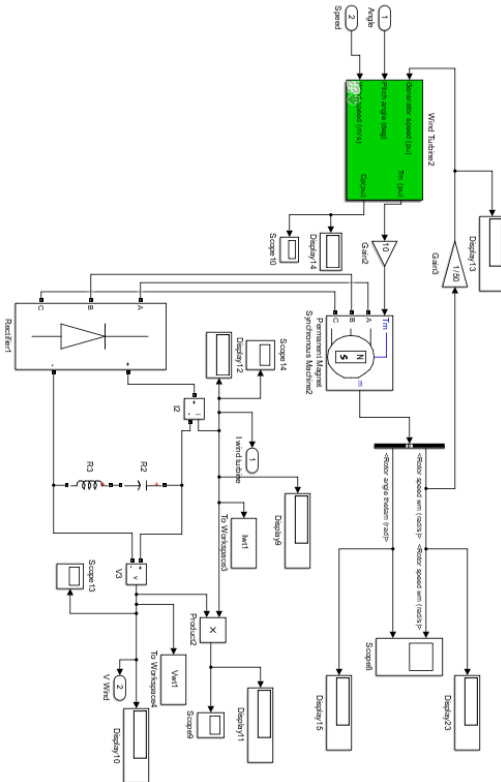
A.7 Model Perhitungan I_d dari Sistem *Photovoltaic*



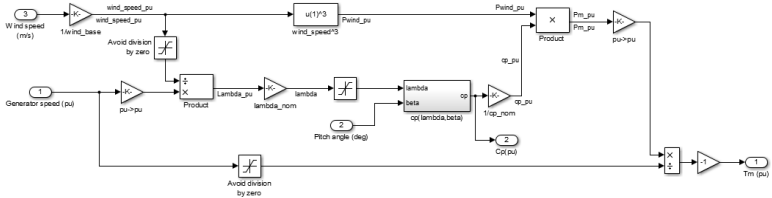
A.8 Model Perhitungan I dari Sistem *Photovoltaic*



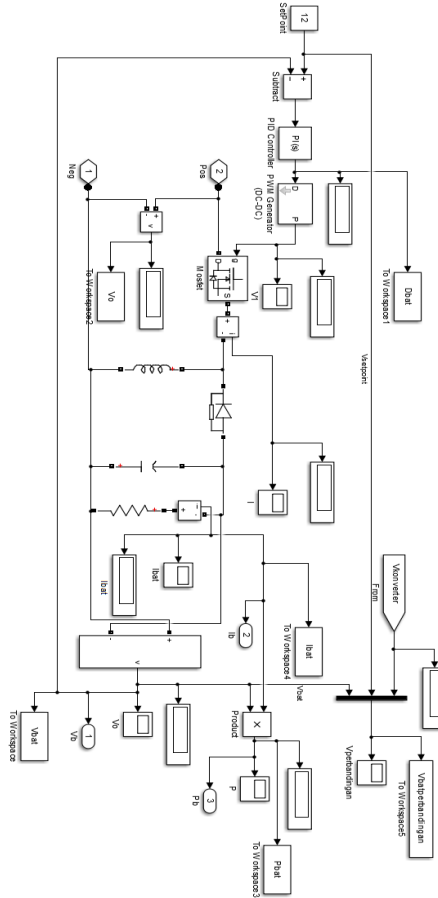
A.9 Sistem Turbin Angin Tanpa Kontroler



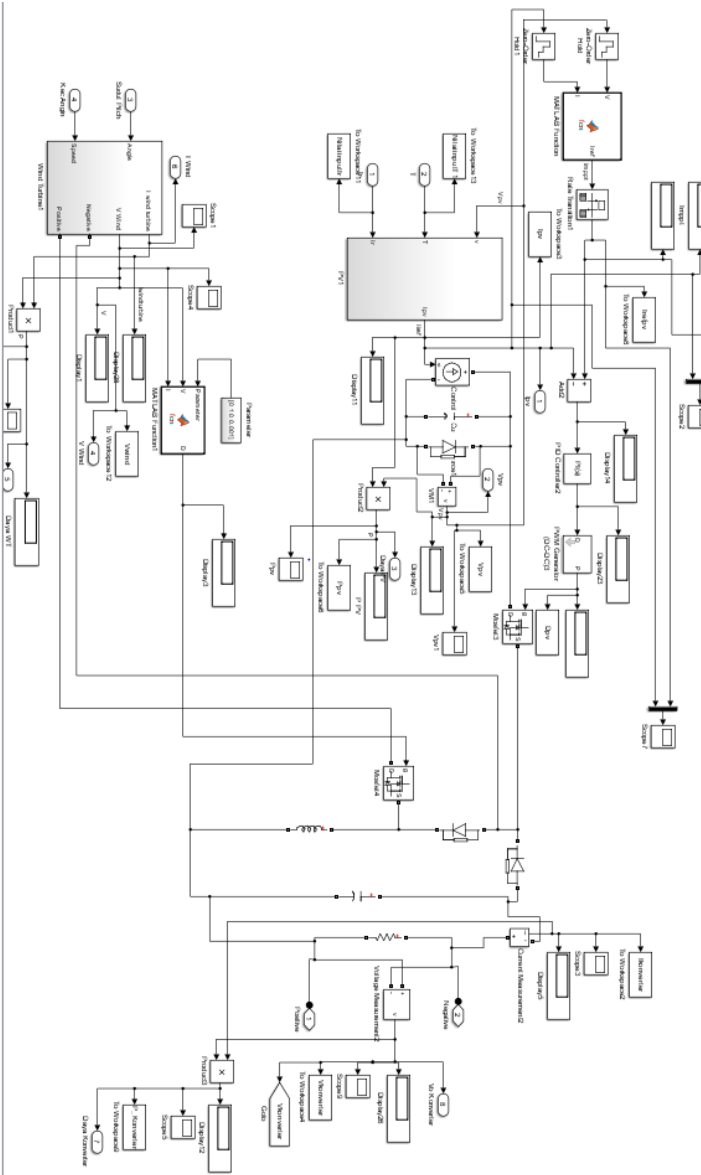
A.10 Model Aerodinamik dari Sistem Turbin Angin



A.11 Sistem Battery Controller



A.12 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida



LAMPIRAN B

SCRIPT ALGORITMA *PERTURB AND OBSERVE* UNTUK SIMULASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HIBRIDA MENGUNAKAN PENGENDALIAN *MAXIMUM POWER POINT TRACKING* PADA MATLAB 2014A

B.1 ALGORITMA MPPT UNTUK SISTEM *PHOTOVOLTAIC*

```
function Iref = fcn (V, I)
%#codegen

% I input = Current PV(I)1

persistent Vo Po Io;

if isempty(Io)
    Vo=0;
    Po=0;
    Io=0;
end

P= V*I;
if Po < P
    if Vo < V
        K = -1;
    else
        K = 1;
    end
elseif Po > P
    if Vo < V
        K = 1;
    else
```

```

        K = -1;
    end
else
K=0;
end

DeltaI = Io-I;
Io=I;
Po=P;
Vo=V;

Iref=Io+(K*DeltaI);

Io=Iref;
end

```

B.2 ALGORITMA MPPT UNTUK SISTEM TURBIN ANGIN

```

function D = fcn (Parameter, V, I)
% D output = Duty cycle(antara 0 sampai 1)
% Enabled input = 1 to enable the MPPT
controller
% I input = Wind voltage (V)
% I input = Wind current (A)
% Param input:
Dinit = Parameter(1); % Nilai inisial untuk
keluaran D
Dmax = Parameter(2); % Nilai maksimum D
Dmin = Parameter(3); % Nilai minimum D
deltaD = Parameter(4); % Increment Value
used to increase/decrease the duty cycle D
% (increasing D = increasing 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
    if dV > 0
        D = Dold - deltaD;
    else
        D = Dold + deltaD;
    end
end

if D > Dmax || D < Dmin
    D = Dold;
end

Dold=D;
Pold=P;
Vold=V;

end

```


BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Asma'ul Husna, dilahirkan di Jombang, 29 Maret 1998. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di MI Hidayatul Muftadi'in pada tahun 2009, SMPN 3 Jombang pada tahun 2012 dan SMAN 3 Jombang pada tahun 2015. Pendidikan sarjana ditempuh di Departemen Teknik Fisika ITS pada tahun 2015. Penulis juga memiliki pengalaman *internship* di PT. Petrokimia Gresik selama satu bulan. Selama masa perkuliahan, penulis aktif berorganisasi di HMTF-ITS (2016-2018), LDJ FUSI Ulul Albaab (2016-2018), JMMI-ITS (2016-2017), UKM Rebana ITS (2016-2018), Asisten Laboratorium Fisika Rekayasa (2016-sekarang) dan Pergerakan Mahasiswa Islam Indonesia (PMII) Komisariat Sepuluh Nopember.

Pada bulan Juli 2019, penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**Ekstraksi Daya Maksimum Pada *Photovoltaic* Dan Turbin Angin Menggunakan Algoritma *Maximum Power Point Tracking* (Mppt) Dengan Metode *Perturb And Observe* (P&O) Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida**”. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini dapat menghubungi melalui husnaasmaa@gmail.com.