TUGAS AKHIR – TF141581

RANCANG BANGUN KONTROL PID BERBASIS PSO PADA DC-DC BUCK BOOST CONVERTER GENERATOR TURBIN ANGIN

M. FAIZ AFIF
NRP 02311645000005

DOSEN PEMBIMBING
Dr. ALI MUSYAFA', M.Sc

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

FINAL PROJECT – TF

DESIGN OF CONTROL PID BASED PSO ON DC-DC BUCK BOOST CONVERTER WIND TURBINE GENERATOR

M. FAIZ AFIF
NRP 02311645000005

ADVISOR LECTURE
ALI MUSYAFA', Dr. Ir, M.Sc.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institut of Technology
Surabaya 2018

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

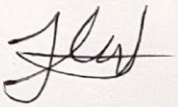
Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama	: M. Faiz Afif
NRP	: 02311645000005
Departemen/Prodi	: Teknik Fisika/S1 Teknik Fisika
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **"Rancang Bangun Sistem Kontrol PID Berbasis PSO Pada DC-DC *Buck-Boost Converter* Generator Turbin Angin"** adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 5 Juni 2018
Yang membuat pernyataan,



M. Faiz Afif
NRP.02311645000005

RANCANG BANGUN KONTROL PID BERBASIS PSO PADA DC-DC *BUCK BOOST CONVERTER* GENERATOR TURBIN ANGIN

TUGAS AKHIR
Oleh:
M. Faiz Afif
NRP : 02311645000005

Surabaya, 5 Juni 2018

Mengetahui/Menyetujui
Pembimbing

Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc
NIP. 19600901 198701 1 001

Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS

Agus Muhammad Hatta S.T, M.Si, Ph.D
NIP : 19780902 2003121 002

RANCANG BANGUN KONTROL PID BERBASIS PSO PADA DC-DC *BUCK BOOST CONVERTER* GENERATOR TURBIN ANGIN

TUGAS AKHIR

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

Oleh:
M. Faiz Afif
NRP. 02311645000005

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr.Ir. Ali Musyafa', M.Sc. .....(Pembimbing I)
2. Dr.Ir. Ronny Dwi Noriyati,M.Kes .....(Ketua Penguji)
3. Dr. Imam Abadi , ST, MT .....(Penguji)

SURABAYA
5 Juni, 2018

RANCANG BANGUN KONTROL PID BERBASIS PSO PADA DC-DC *BUCK BOOST CONVERTER* GENERATOR TURBIN ANGIN

Nama Mahasiswa	**: M. Faiz Afif**
NRP	**: 02311645000005**
Jurusan/Fakultas	**: Teknik Fisika-FTI-ITS**
Dosen Pembimbing	**: Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc**

Abstrak

Hal utama yang diperhatikan dari pencarian sumber energi adalah sumber yang memiliki energi tak terbatas, salah satunya yaitu pemanfaatan energi angin dengan cara pembuatan rancangan sistem pembakit listrik tenaga angin khususnya dibagian elektronik untuk menghasilkan energi listrik. Tegangan yang keluar dari generator masuk ke *buck-boost converter* yang keluarannya dapat lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan yang keluar dari generator. Tegangan tersebut juga dikontrol oleh mikrokontroler yang berupa arduino uno dengan menggunakan metode kontrol PID-PSO yang berguna untuk mengontrol tegangan yang sesuai dengan yang diinginkan. Dengan rata-rata tegangan yang diharapkan 13V, diharapkan dari penelitian ini dapat dihasilkan sebuah sistem pembangkit listrik tenaga angin. Dari hasil simulasi pada buk-boost converter didapatkan nilai terbaik untuk parameter Kp=7.60, Ki=0.66, dan Kd=0.56 pada pengendalian tegangan *buck-boost converter*. Pada *buck-boost converter* didapatkan nilai *Rise Time* (Tr) = 0.37 detik, *settling time* (Ts)= 0.39 detik, *delay time* (Td)= 0.20 detik, *Peak time* (Tp) = 0.39 detik.

Kata kunci: *Buck-boost Converter*, Generator, Kontrol PID-PSO, Arduino Uno

DESIGN OF CONTROL PID BASED PSO ON DC-DC BUCK BOOST CONVERTER WIND TURBINE GENERATOR

Name of Student	**:**	**M. Faiz Afif**
Number of Registration	**:**	**02311645000005**
Department/Faculty	**:**	**Engineering Physics – Faculty of Industrial Technology-ITS**
Advisor Lecture	**:**	**Dr Ir. Ali Musyafa', M.Sc.**

Abstract

The main thing to note from this research is the design of electrical wind power system, especially electronic parts to generate electrical energy and output system. The voltage coming out of the generator goes into the buck-boost converter whose output can be higher or lower than the voltage coming out of the generator. The voltage is also controlled by a microcontroller in the form of arduino uno by using control PID-PSO method which is useful to control the voltage as according to the desired. With an expected average voltage of 13V, it is expected that this research can produce a wind power system. From the simulation result on the boost converter the best value for parameter Kp = 7.60, *Ki* = 0.66, *and Kd* = 0.56 *in the control of buck-boost converter voltage. In the buck-boost converter we get the value of Rise Time (Tr)* = 0.37 *seconds, settling time (Ts)* = 0.39 *seconds, delay time (Td)* = 0.20 *seconds, Peak time (Tp)* = 0.39 *seconds.*

Keyword : Buck-boost Converter, Generator, Control PID-PSO, Arduino Uno

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur, penulis panjatkan kepada tuhan yang maha esa, Allah SWT, atas curahan iman, rizki, kesehatan, serta selesainya Tugas Akhir yang berjudul

RANCANG BANGUN KONTROL PID BERBASIS PSO PADA DC-DC *BUCK BOOST CONVERTER* GENERATOR TURBIN ANGIN

Dan tak lupa sholawat serta salam tetap tercurahkan kepada Baginda Rasulullah, Muhammad SAW.

Selama menyelesaikan tugas akhir ini penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Agus Muhammad Hatta S.T, M.Si, Ph,D. selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika-FTI-ITS dan Dosen Wali yang telah memberikan arahan penulis selama menjalani masa perkuliahan.
2. Bapak Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc. yang telah sabar dalam memberikan bimbingan dan tuntutan dalam menyelesaikan Tugas Akhir penulis.
3. Bapak dan Ibu tercinta, yang selalu mendoakan dan mendukung baik secara moril maupun materiil.
4. Saudara-saudaraku tercinta yang selalu memberi dukungan moral
5. Bapak Totok Ruki Biyanto, ST, MT, PhD. selaku Ketua Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol.
6. Bapak/Ibu dosen yang telah menjadi media transfer ilmu sehingga kami dapat merampungkan jenjang perkuliahan hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
7. Seluruh staf pegawai Jurusan Teknik Fisika atas semua bentuk kerjasamanya selama masa kuliah.
8. Seluruh komponen laboratorium Teknik Fisika yang telah memfasilitasi saat praktikum.

9. Teman-teman lintas jalur Teknik Fisika 2016 yang selalu saling mendukung satu sama lain.
10. Pengurus Workshop Instrumentasi yang menyediakan fasilitas untuk mendukung pengerjaan tugas akhir ini.
11. Segala pihak yang membantu atas Tugas Akhir ini, namun tidak mampu penulis sebutkan satu persatu.

Dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini tentunya masih banyak kekurangan baik menyangkut isi maupun bahasa yang digunakan sehingga tidak menutup kemungkinan bagi penulis untuk menerima kritik maupun saran yang membangun demi tersempurnakannya Laporan Tugas Akhir ini. Besar harapan kami semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, 5 Juni 2018

`

Salam

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL………………………………………… i
LEMBAR PENGESAHAN………………………………….. iii
ABSTRAK…………………………………………………… v
KATA PENGANTAR…………………………………….... vii
DAFTAR ISI………………………………………………… ix
DAFTAR GAMBAR………………………………………… xii
DAFTAR TABEL…………………………………………… xiv
DAFTAR LAMPIRAN……………………………………… xix

BAB I. PENDAHULUAN
1.1 Latar belakang... 1
1.2 Peumusan Masalah.. 2
1.3 Batasan Masalah.. 2
1.4 Tujuan Penelitian... 3
1.5 Metodologi Penelitian.. 3
1.6 Sistematika Laporan.. 3

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA
2.1 Turbin Angin…………………………….................. 5
2.1.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH)….. 6
2.1.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV)……... 6
2.1.3 Komponen Turbin Angin…………………..….. 7
2.2 *Buck-Boost Converter*...…………………...…..….... 9
2.3 *Particle Swarm Optimization* (PSO)………………. 11
2.4 Generator DC……………………………………… 13
2.5 PID *Controller*………………………………..…. 14
2.6 Pengendali PID-PSO……………………...…….. 16
2.7 Teori Ketidakpastian……………………..…….. 17

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN
3.1 Prosedur Umum Penelitian...................................... 19
3.2 Perancangan Turbin Angin...................................... 22

3.2.1 Perancangan Simulasi Turbin Angin pada Matlab..... 22
3.2.2 Pemasangan Komponen Turbin Angin..... 25
3.2.3 Kalibrasi Sensor Tegangan..... 30
3.3 Pencarian Parameter Kontroler PID menggunakan PSO..... 30
3.4 Realisasi Kontrol Tegangan Generator Turbin Angin..... 32
3.5 Proses Penalaan Kp, Ki, Kd Dengan Algoritma PSO..... 34

BAB IV.PENGUJIAN DAN ANALISA HASIL SIMULASI
4.1 Hasil Pengujian Simulasi dengan Perangkat Lunak Matlab..…… 37
4.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik *Buck-Boost converter* …… 37
4.1.2 Hasil Tanggapan Lingkar Terbuka dari Rangkaian *Buck-boost Converter* …… 38
4.1.3 Hasil Perhitungan Nilai kendali PID…… 39
4.1.4 Hasil Tanggapan Lingkar Tertutup Dengan Rangkaian *Buck-Boost Converter*…… 40
4.2 Hasil Pengujian Rancang Bangun *Buck-Boost Converter* ……..……..…… 42
4.2.1 HasilPengujian Kecepatan Putar Turbin Angin…….……..…… 42
4.2.2 Hasil Pengujian Generator Turbin Angin.…… 45
4.2.3 Hasil Pengujian *Buck-Boost Converter*……... 47
4.2.4 Hasil Pengujian Kontrol PID-PSO Pada *Buck Boost Converter*…….……. 50
4.3 Perbandingan Uji *Real Plant* dengan Simulasi…..... 52

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN
5.1 Kesimpulan..... 55
5.2 Saran..... 55

DAFTAR PUSTAKA..... 58
LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Turbin Angin Sumbu *horizontal* dan *vertikal*……	5
Gambar 2.2	Komponen penyusun Turbin Angin ……	7
Gambar 2.3	Rangkaian *Buck-Boost Converter*……..	10
Gambar 2.4	Konstruksi Generator DC…….....	13
Gambar 2.5	Struktur Kontroler PSO-PID dengan indeks performansi IAE.....	16
Gambar 3.1	Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir.....	20
Gambar 3.2	Diagram Blok Generator pada Simulink matlab.....	22
Gambar 3.3	Diagram Blok *Buck-boost Converter* pada Simulink matlab...……....	23
Gambar 3.4	Diagram Blok Kontrol PID pada Simulink matlab …….....	24
Gambar 3.5	Diagram Blok Perancangan Turbin Angin pada Simulink matlab.....	25
Gambar 3.6	*Airfoil* turbin angin ……...	26
Gambar 3.7	Arduino uno …….……...	27
Gambar 3.8	Rangkaian *rotary encoder*……..	27
Gambar 3.9	Rangkaian sensor tegangan……...	28
Gambar 3.10	LCD 2x16…….....	28
Gambar 3.11	Rangkaian *Buck Boost Converter*.....	29
Gambar 3.12	*Prototype* turbin angin.....	29
Gambar 3.13	Diagram alir optimalisasi menggunakan PSO…….....	31
Gambar 4.1	Hasil Tanggapan Lingkar Terbuka.....	39
Gambar 4.2	Hasil Tanggapan PID.....	40
Gambar 4.3	Hasil Tanggapan PID-PSO.....	41
Gambar 4.4	Hasil Pengujian Kecepatan Putar Turbin Angin Tanpa Generator.....	43
Gambar 4.5	Hasil Pengujian Kecepatan Putar Turbin Angin Menggunakan Generator.....	45

Gambar 4.6 Grafik Error Terhadap Duty Cycle Pada *buck Boost Converter*..... 51
Gambar 4.7 Hasil Tanggapan PID-PSO..... 51
Gambar 4.8 Hasil Perbandingan Daya Input Dengan Daya Output *Buck Boost Converter*..... 52
Gambar 4.9 Grafik Pengujian Buck-Boost Converter.... 53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik penguatan pengendali PID.....	16
Tabel 3.1	Parameter Dan Nilai Rancangan *Buck-Boost Converter* . ……....……...……...	24
Tabel 3.2	Nilai Gbest (Kp, Ki, Kd)..... ……...	35
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Karakteristik *Buck-Boost Converter* dengan *duty cycle* 80 %.……	38
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Karakteristik *Buck-Boost Converter* dengan *duty cycle* 20 %.....	38
Tabel 4.3	Hasil Perhitungan Nilai kendali PID ….....	39
Tabel 4.4	Analisa Performansi PID …….....	40
Tabel 4.5	Analisa Performansi PID-PSO…….....	41
Tabel 4.6	Hasil Pengujian Kecepatan Putar Turbin Angin Tanpa Generator…….....…….....	42
Tabel 4.7	Hasil Pengujian Kecepatan Putar Turbin Angin Menggunakan Generator……...……....	44
Tabel 4.8	Hasil Pengujian Generator Tanpa R (beban)	46
Tabel 4.9	Hasil Pengujian Generator dengan R= 10 Ω....	46
Tabel 4.10	Hasil Pengujian Generator dengan R= 27 Ω....	47
Tabel 4.11	Hasil pengujian *Buck boost converter* menggunakan induktor 470 µh……	48
Tabel 4.12	Hasil pengujian *Buck boost converter* menggunakan induktor 150 µh……	48
Tabel 4.13	Hasil pengujian *Buck boost converter* menggunakan resistor 27 Ω……	49
Tabel 4.14	Hasil pengujian *Buck boost converter* menggunakan resistor 10 Ω……	49
Tabel 4.15	Hasil Pengujian Kontrol PID-PSO pada *Buck Boost Converter*……	50
Tabel 4.16	Hasil Pengujian *Buck-Boost Converter*……	52

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Selama ini sumber energi utama yang dikonversi menjadi energi listrik berasal dari sumber energi fosil yang mana pada saat ini jumlahnya terus menipis dan semakin terbatas. Oleh karena itu, perlu dicari sumber energi alternatif yang dihasilkan melalui proses alamiah sehingga tidak akan habis atau cepat dipulihkan jika dikelola dengan baik. Dengan kata lain, sumber energi alternatif tersebut haruslah merupakan energi terbarukan. Beberapa sumber energi terbarukan yang kini sedang terus dikembangkan, antara lain adalah energi angin, energi surya, energi panas bumi, dan lain-lain. Diantara sumber energi terbarukan tersebut, di Indonesia energi angin merupakan sumber energi yang paling kecil tingkat pemanfaatannya, yakni hanya sebesar 3,07 MW atau sekitar 0,03% potensi yang ada [1].

Letak geografis Indonesia sebagai negara tropis yang berada di garis khatulistiwa menyebabkan karakteristik angin di Indonesia sangat berbeda dengan karakteristik angin dinegara-negara maju yang sudah banyak memanfaatkan tenaga angin sebagai pemasok energy listrik alternatifnya. Beberapa karakteristik angin di Indonesia antara lain yaitu kecepatan angin yang relatif rendah dan cenderung berfluktuatif. Perbedaan karakteristik angin tersebut menyebabkan energi listrik yang dihasilkan turbin angin dalam Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) di daerah tropis khususnya di Indonesia sangat tidak optimal dan berfluaktif. Beberapa parameter yang menimbulkan ketidak optimalnya energi listrik yang dihasilkan dari turbin angin adalah tegangan keluaran yang cenderung kecil dan berubah-ubah mengikuti angin yang terkonversi di turbin angin [1].

Pengubah daya DC-DC (DC-DC *Converter*) tipe peralihan atau dikenal juga dengan sebutan DC *Chopper* dimanfaatkan terutama untuk penyediaan tegangan keluaran DC yang bervariasi besarannya sesuai dengan permintaan pada beban. Daya masukan

dari proses DC-DC tersebut adalah berasal dari sumber daya DC yang memiliki tegangan masukan yang tetap. Pada dasarnya penghasilan tegangan keluaran DC yang ingin dicapai adalah dengan cara pengaturan lamanya waktu penghubungan antara sisi keluaran dan sisi masukan pada rangkaian yang sama. Komponen yang digunakan untuk menjalankan fungsi penghubung tersebut tidak lain adalah *switch (solid state electronic switch)* seperti *Thyristor*, *MOSFET*, IGBT, GTO [2].

Buck-boost converter adalah salah satu jenis DC *chopper* yang memiliki fungsi menstabilkan tegangan dengan menaikkan dan menurunkan tegangan [3]. Pada penelitian ini, sistem turbin angin dimodelkan secara matematis. Proses pengoptimalan daya keluaran sistem turbin angin dilakukan dengan menerapkan metode *particle swarm optimization* (PSO) pada kecepatan angin yang berubah-ubah.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang sebelumnya, maka dirumuskanlah permasalahan dalam Tugas Akhir ini yang kemudian berdasarkan metodologi yang ada harus dipecahkan. Adapun untuk rumusan permasalahannya adalah bagaimana merancang *buck boost converter* pada turbin angin dengan menggunakan metode PSO-PID.

1.3 Batasan Masalah

Untuk pemfokusan permasalahan dalam Tugas Akhir ini, beberapa batasan masalah yang diambil adalah sebagai berikut :

1. Penelitian dibatasi untuk perancangan *buck-boost converter* pada turbin angin berbasis PSO-PID.
2. Jenis generator yang digunakan adalah generator DC.
3. Sistem kontrolnya menggunakan kontrol PID dengan pencarian parameter kontroler menggunakan metode *particle swarm optimization* (PSO).

1.4 Tujuan penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk melakukan suatu perancangan untuk menghasilkan rancangan *buck-boost converter* pada turbin angin dengan menggunakan metode PSO-PID.

1.5 Metodologi penelitian

Untuk mencapai tujuan yang telah ditetapkan, maka diperlukanlah metodologi yang memuat tahapan-tahapan dalam menyelesaikan Tugas Akhir. Adapun metodologi yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
2. Perancangan SIstem Turbin Angin
3. Simulasi pemodelan menggunakan simulink Matlab sesuai dengan data yang diambil pada real plant.
   - Pemodelan DC-DC *Buck-Boost Converter*
4. Analisa dan pengujian hasil data yang telah didapatkan dari hasil pemodelan.
   - Pengujian hasil pemodelan DC-DC *Buck Boost Converter*
   - Pengujian tegangan keluaran pada *buck-boost converter* pada real plant
5. Pembahasan hasil analisa data
6. Penarikan kesimpulan dari pembasan yang telah dihasilkan
7. Penyusunan laporan tugas akhir.

1.6 Sistematika Laporan

Laporan penelitian Tugas Akhir ini akan disusun secara sistematis dibagi dalam beberapa bab, dengan perincian sebagai berikut,

BAB I Pendahuluan

Bab ini berisikan penjelasan latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika laporan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Pada bab ini membahas secara singkat teori-teori yang terkait dalam penulisan Tugas Akhir.

BAB III Metodologi Penelitian

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai detail step-step yang harus dilalui untuk mencapai tujuan dan simpulan akhir dari penelitian. Produk akhir dari tahap ini adalah perhitungan dan model yang siap untuk disimulasikan dan dianalisa.

BAB IV Pengujian dan Analisa Hasil Simulasi

Bab merupakan hasil simulasi yang didapatkan baik berupa grafik maupun tabulasi, kemudian dilakukanlah analisa-analisa serta pembahasan yang berorientasi pada tujuan penelitian yang telah ditetapkan.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi tentang kesimpulan pokok dari seluruh rangakain penelitian yang telah dilakukan dan saran yang dapat dijadikan sebagai pengembangan penelitian selanjutnya.

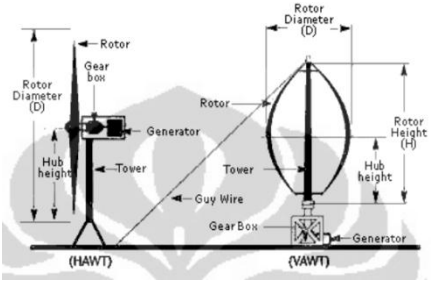
BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini, berisi pustaka tentang segala materi yang berkaitan dengan penelitian yang dikerjakan, sehingga nantinya dapat mengarahkan pola berpikir dalam menemukan solusi permasalahan yang dalam penelitian ini. Tinjauan pustaka didapatkan melalui beberapa referensi baik dalam jenis *text book*, *manual book* maupun jurnal ilmiah yang sebelumnya telah dipublikasikan.

2.1 Turbin Angin

Turbin angin merupakan satu bagian terpenting pembangkit listrik tenaga angin. Turbin angin adalah komponen mekanik yang mengkonversikan kecepatan angin menjadi daya poros. Turbin angin mempunyai sudu dengan bentuk irisan melintang khusus di mana aliran udara pada salah satu sisinya dapat bergerak lebih cepat dari aliran udara di sisi yang lain ketika angin melewatinya. Fenomena ini menimbulkan daerah tekanan rendah pada belakang sudu dan daerah tekanan tinggi di depan sudu. Perbedaan tekanan ini membentuk gaya yang menyebabkan sudut berputar [1].

Turbin angin dibagi menjadi dua kelompok utama berdasarkan arah sumbu, yaitu: vertikal dan horizontal. Perbedaan kedua kelompok ini dapat dilihat pada gambar 9.1



Gambar 2.1 Turbin angin sumbu horizontal dan vertikal [1]

2.1.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH)

Turbin angin sumbu horizontal disingkat TASH memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin (baling-baling cuaca) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang dihubungkan ke sebuah servo motor. Sebagian besar memiliki sebuah roda gigi yang mengubah putaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar. Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi pada bagian belakang maka turbin diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan. Sebagian besar TASH merupakan mesin upwind (melawan arah angin) untuk meminimalkan dampak turbulensi yang dapat menyebabkan kerusakan struktur menara dan realibilitas [3].

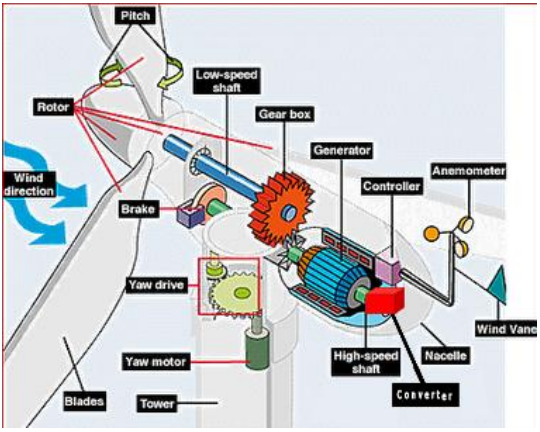
2.1.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV)

Turbin angin sumbu vertikal (TASV) memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. TASV mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah. Dengan sumbu yang vertikal, generator serta roda gigi bisa ditempatkan di dekat tanah. Sehingga, menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Disisi lain, sejumlah desain TASV menghasilkan tenaga putaran yang berdenyut. Drag (gaya yang menahan pergerakan sebuah benda padat melalui fluida (zat cair atau gas) dapat ditimbulkan saat kincir berputar. Kecepatan angin lebih pelan pada ketinggian yang rendah sehingga menghasilkan energi angin yang rendah. Aliran udara di dekat tanah dan obyek

yang lain mampu menciptakan aliran yang bergolak, yang bisa menyebabkan berbagai permasalahan yang berkaitan dengan getaran, diantaranya kebisingan dan bearing wear yang akan meningkatkan biaya pemeliharaan atau mempersingkat umur turbin angin. Jika tinggi puncak atap yang dipasangi menara turbin kira-kira 50 persen dari tinggi bangunan dan merupakan titik optimal bagi energi angin maksimal dan turbulensi angin minimal [3].

2.1.3 Komponen-komponen Turbin Angin

Pada gambar 2.2 dibawah ini akan dijelaskan mengenai bagian – bagian penyusun dari turbin angin :



Gambar 2.2 Komponen Penyusun Turbin Angin [3]

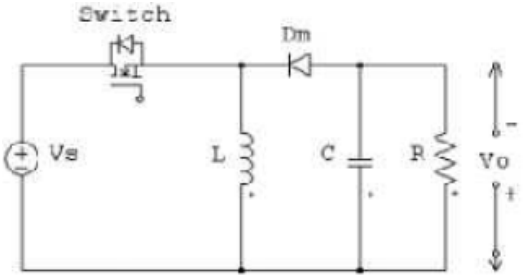
- Anemometer: Mengukur kecepatan angin dan mengirim data angin ke Alat Pengontrol.
- *Blades* (Bilah Kipas): Kebanyakan turbin angin mempunyai 2 atau 3 bilah kipas. Angin yang menghembus menyebabkan turbin tersebut berputar.

- *Brake* (Rem): Suatu rem cakram yang dapat digerakkan secara mekanis dengan bantuan tenaga listrik atau hidrolik untuk menghentikan rotor atau saat keadaan darurat.
- *Controller* (Alat Pengontrol): Alat Pengontrol ini men-start turbin pada kecepatan angin kira-kira 12-25 km/jam, dan kemudian mematikannya pada kecepatan 90 km/jam. Turbin tidak beroperasi di atas 90 km/jam. Hal ini dikarenakan tiupan angin yang terlalu kencang dapat merusakkannya.
- *Gear box* (Roda Gigi): Roda gigi menaikkan putaran dari 30-60 rpm menjadi sekitar 1000-1800 rpm. Ini merupakan tingkat putaran standar yang disyaratkan untuk memutar generator listrik.
- Generator: Generator pembangkit listrik, biasanya sekarang disebut alternator arus bolak-balik.
- *High-speed shaft* (Poros Putaran Tinggi): Berfungsi untuk menggerakkan generator.
- *Low-speed shaft* (Poros Puutaran Rendah): Poros turbin yang berputar kira-kira 30-60 rpm.
- *Nacelle* (Rumah Mesin): Rumah mesin ini terletak di atas menara . Di dalamnya berisi gearbox, poros putaran tinggi / rendah, generator, alat pengontrol, dan alat pengereman.
- *Pitch* (Sudut Bilah Kipas): Bilah kipas dapat diatur sudutnya sesuai dengan kecepatan rotor yang dikehendaki. Tergantung kondisi angin yang terlalu rendah atau terlalu kencang.
- Rotor: Bilah kipas bersama porosnya dinamakan rotor.
- *Tower* (Menara): Menara bisa dibuat dari pipa baja, beton, ataupun rangka besi. Karena kencangnya angin bertambah dengan seiring dengan bertambahnya ketinggian, maka makin tinggi menara makin besar tenaga angin yang didapat.

- *Wind direction* (Arah Angin): Adalah turbin yang menghadap angin. Desain turbin lain ada yang mendapat hembusan angin dari belakang.
- *Wind vane* (Tebeng Angin): Mengukur arah angin, berhubungan dengan penggerak arah yang memutar arah turbin disesuaikan dengan arah angin.
- *Yaw drive* (Penggerak Arah): Penggerak arah memutar turbin ke arah angin untuk desain turbin yang menghadap angin. Untuk desain turbin yang mendapat hembusan angin dari belakang tak memerlukan alat ini.
- *Yaw motor* (Motor Penggerak Arah): Motor listrik yang menggerakkan yaw drive.
- *Converter*: Alat pengubah tegangan menjadi tegangan yang lebih tinggi atau yang lebih rendah [4].

2.2 Buck-Boost Converter

Buck-boost converter sebagai salah satu *regulator mode* pensaklaran menghasilkan tegangan keluaran yang lebih kecil atau lebih besar dibanding tegangan masukannya. Selama mode 1, MOSFET di on-kan, diode Dm mendapat bias mundur arus input, yang bertambah mengalir melalui induktor L dan MOSFET. Selama mode 2, MOSFET di off-kan, arus mengalir melalui induktor L, diteruskan ke C, Dm dan ke beban. Energi yang tersimpan didalam induktor L, akan ditransfer ke beban. Arus induktor akan berkurang sampai MOSFET di on-kan lagi pada siklus gambar 2.3 berikut [5].



Gambar 2.3 Rangkaian *Buck-Boost Converter* [5]

Tegangan keluaran dari turbin angin akan disearahkan terlebih dahulu oleh rectifier tak terkontrol sebelum dihubungkan dengan *buck-boost converter*. *Buck-boost converter* berfungsi untuk mengubah level tegangan DC, baik ke level yang lebih tinggi maupun ke level yang lebih rendah. Namun *buck-boost converter* mengubah polaritas dari tegangan output terhadap tegangan input. Besar dan kecilnya tegangan output diatur berdasarkan *duty cycle* PWM pada switch dengan persamaan 2.1 berikut [11] :

$$Vo = -Vs\left(\frac{D}{1-D}\right) \quad (2.1)$$

Untuk menggunakan setiap komponen yang digunakan pada buck-boost converter maka diperlukan perhitungan dan parameter yang ditetapkan agar sistem berjalan dengan baik. Pada penelitian ini buck-boost converter bekerja pada Continous Current Mode (CCM), maka didapat nilai L_{min} dan C_{min} pada persamaan 2.2 dan 2.3 berikut :

$$L_{min} = \frac{(R_{Lmax}(1-D_{\min})^2)}{2fs} \quad (2.2)$$

$$C_{\min} = \frac{V_o D_{max}}{\Delta V_o R_{Lmtin} fs} \quad (2.3)$$

Adapun rangkaian *buck-boost* dimodelkan dalam persamaan differensial yang dapat dilihat pada persamaan 2.4 dan 2.5 berikut :

$$L\frac{diL}{dt} = Vs \times D - (1-D) \times Vo - iL \times RL \quad (2.4)$$

$$C\frac{dVc}{dt} = (1-D) \times iL - io \quad (2.5)$$

2.3 Particle Swarm Optimization (PSO)

Sejak pertama kali diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995, PSO telah mengalami kemajuan yang sangat pesat dan telah banyak diterapkan dalam berbagai masalah pencarian. Jauh lebih modern dibandingkan dengan metode *artificial intellegence* yang lain seperti metode fuzzy yang diperkenalkan pada tahun 1965. Pada umumnya peningkatan algoritma PSO bertujuan untuk meningkatkan sifat konvergen dan divergen dari algoritma tersebut [6].

Metode ini memiliki sifat *robust* yang bagus untuk memecahkan persoalan yang mempunyai karakteristik *nonlinear* dan *nondifferentiability*, *multiple optima*, dimensi besar melalui adaptasi yang diturunkan dari teori *psychology*-sosial. PSO terinspirasi dari perilaku gerakan kawanan hewan seperti ikan (*school of fish*), hewan herbivor (herd), dan burung (flock) yang kemudian tiap objek hewan disederhanakan menjadi sebuah partikel. Suatu partikel dalam ruang memiliki posisi yang dikodekan sebagai vektor koordinat. Vektor posisi ini dianggap sebagai keadaan yang sedang ditempati oleh suatu partikel di ruang pencarian. Setiap posisi dalam ruang pencarian merupakan alternatif solusi yang dapat dievaluasi menggunakan fungsi objektif. Setiap partikel bergerak dengan kecepatan v [6].

Model ini akan disimulasikan dalam ruang dengan dimensi tertentu dengan sejumlah iterasi sehingga di setiap iterasi, posisi

partikel akan semakin mengarah ke target yang dituju (minimasi atau maksimasi fungsi). Ini dilakukan hingga maksimum iterasi dicapai atau bisa juga digunakan kriteria penghentian yang lain. Secara matematis deskripsi di atas ditampilkan pada persamaan 2.6 dan 2.7 berikut :

Persamaan PSO dinyatakan dalam :

- Update kecepatan

$$v^{t+1} = w.\, v^{t} + c_1 * Rand * pbest - x^{t} + c_2 * Rand * gbest - x^{t} \quad (2.6)$$

Inertia weight (w) dapat dibuat konsta dengan harga antara 0.2 – 0.9.

- Update posisi

$$^{(t+1)} = {}^{(i)} + {}^{(t+1)} \quad (2.7)$$

Dari persamaan PSO, terbagi dalam tiga bagian utama:

- *Momentum Part* : $w.\, v^{(t)}_{i,m}$

  Kecepatan partikel tidak dapat berubah secara bebas, melainkan mengalami perubahan melalui kecepatan sekarang

- *Cognitive part* : $c_1 * Rand * \ pbest_{i,m} - x^{(t)}_{i,m}$

  Merupakan bagian pengalaman partikel, belajar dari pengalaman partikel itu sendiri.

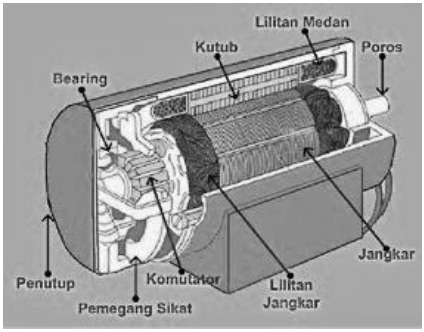
- *Social part* : $c_2 * Rand * \ gbest_m - x^{(t)}_{i,m}$

Merupakan kerja sama antar partikel, belajar dari pengalaman partikel-partikel lain.

2.4 Generator DC

Generator arus searah mempunyai komponen dasar yang umumnya hampir sama dengan komponen mesin – mesin listrik lainnya. Secara garis besar generator arus searah adalah alat konversi energi mekanis berupa putaran menjadi energi listrik arus searah, Energi mekanik digunakan untuk memutar komponen kawat penghantar di dalam medan magnet. Berdasarkan hukum faraday, maka pada kawat penghantar akan timbul ggl induksi yang besarnya sebanding dengan laju perubahan fluksi yang dilingkupi oleh kawat penghantar. Bila kumparan kawat tersebut merupakan rangkaian tertutup, maka akan timbul arus induksi. Yang membedakannya dengan generator lain yaitu terletak pada komponen penyearah yang terdapat didalamnya yang disebut dengan komutator dan sikat.

Generator arus searah memiliki konstruksi yang terdiri atas dua bagian yang berputar (*rotor*) dan bagian yang diam (*strator*). Yang termasuk *strator* adalah rangka, komponen magnet dan komponen sikat. Sedangkan yang termasuk *rotor* adalah jangkar, kumparan jangkar dan *komutator* [8]. Secara umum konstruksi generator arus searah adalah seperti gambar 2.4



Gambar 2.4 Konstruksi generator DC [8]

Dengan menggunakan hokum kirchoff maka didapatkan persamaan 2.8 berikut :

$$K_a \omega_a = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt}(t) + V_a(t) \quad (2.8)$$

2.5 PID Controller

Dalam pengendalian PID terdapat beberapa parameter yang harus diatur untuk mendapatkan respon keluaran yang lebih baik. Parameter-parameter yang dimaksud adalah parameter *proportional* (KP), *Integral* (1/s KI) dan *derivative* (SK_D, K_P, K_I, dan K_D). Beberapa parameter diatas memiliki fungsi dan kelebihan masing-masing untuk mengontrol suatu plant [12].

Parameter *proportional* (KP) berfungsi untuk mengurangi *rise time* dan *steady state error* pada suatu plant. Jika kedua pengendali diatas P dan I digabung maka akan menghasilkan pengendali PI tetapi memiliki akibat yaitu respon transient akan bertambah buruk. Untuk memperbaiki kekurangan dari pengendali PI maka ditambah pengendali *derivative* (D) yang berfungsi untuk menyempurnakan kekurangan dai pengendali PI. Gabungan dari pengendali P, I, dan D disebut pengendali PID yang mampu meningkatkan kestabilan suatu sistem mengurani *overshoot* dan *settling time* pada suatu plant [12].

Berikut ini adalah persamaan-persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai dari parameter *proportional, integral* dan *derivative.*

- Hubungan input dan output

$$u(t) = K_P \{e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}\} \quad (2.9)$$

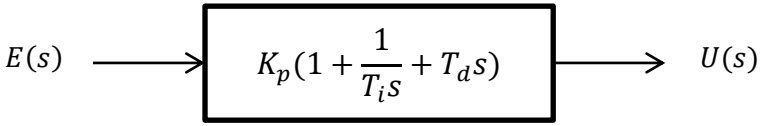
- Transformasi Laplace

$$\mathrm{U(s)} = \mathrm{K_p}\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d \mathrm{s}\right)\mathrm{E(s)} \quad (2.10)$$

- Fungsi Alih

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left\{1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right\} \quad (2.11)$$

- Model Matematika Diagram Blok



Dimana,
K_p = penguatan proportional
T_i = waktu integral
T_d = waktu differensial

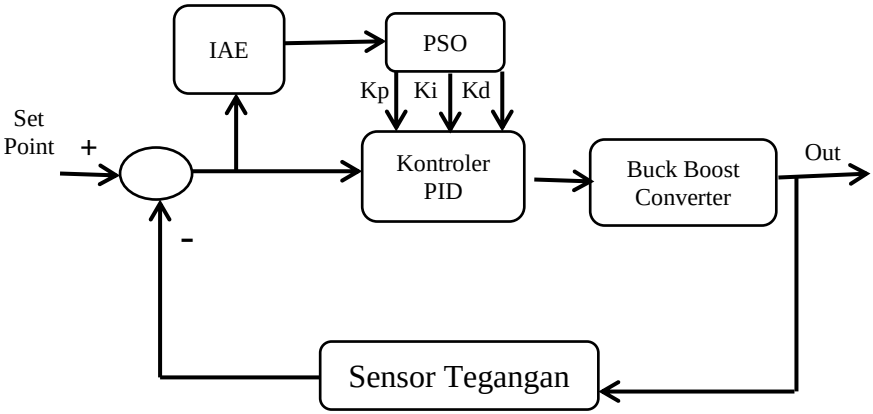
Hubungan masukan dan keluaran kontrol PID dijelaskan pada persamaan 2.9 dimana persamaan tersebut masih dalam domain t, kemudian persamaan tersebut diubah kedalam domain s menggunakan transformasi laplace menjadi persamaan 2.10. Setelah itu didapatkan fungsi alih dari hubungan keluaran dan masukan., dengan U(s) adalah keluaran dan E(s) adalah masukan yang ditunjukkan pada persamaan 2.11. Fungsi alih yang didapatkan digunakan untuk mendapatkan model matematis persamaan tersebut. Adapun karakteristik penguatan pengendali PID akan diunjukkan pada table 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Karakteristik penguatan pengendali PID

Penguatan	*Rise time*	*Overshoot*	*Settling time*	*Steady state error*
K_p	Mengurangi	Menambah	Perubahan kecil	Mengurangi
K_i	Mengurangi	Menambah	Menambah	Menghilangkan
K_d	Perubahan kecil	Mengurangi	Mengurangi	Perubahan kecil

2.6 Pengendali PID - PSO

Kontroler PID -PSO untuk *plant* ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.5 Struktur kontroler PSO-PID dengan indeks performansi IAE

Untuk mengestimasi parameter PID dapat digunakan indeks performansi (Solihin, 2011)

IAE (*integral absolute error*)

$$IAE = \int_0^\infty |e(t)|dt \quad (2.12)$$

ISE (*integral of square error*)

$$ISE = \int_0^\infty |e^2(t)|dt \quad (2.13)$$

ITAE (*integral of time weight absolute error*)

$$ITAE = \int_0^\infty t|e(t)|dt \quad (2.14)$$

ITSE (*integral of time weight square error*)

$$ITSE = \int_0^\infty t|e^2(t)|dt \quad (2.15)$$

Fungsi obyektif atau *fitness function* dalam penelitian ini menggunakan indeks performansi IAE. Ini dilakukan karena IAE dapat menghasilkan kontroler yang mampu mengurangi osilasi sehingga lebih cepat teredam. Hal inilah yang menjadi alasan indeks performansi IAE populer digunakan untuk desain sistem kontrol.

2.7 Teori Ketidakpastian

Tujuan dilakukan kalibrasi adalah untuk mencapai ketertelusuran pengukuran. Hasil dari pengukuran dapat ditelusur sampai ke standar yang lebih teliti. Manfaat kalibrasi adalah untuk mendukung sistem mutu yang diterapkan di berbagai industri pada peralatan laboratorium dan produksi yang dimiliki. kalibrasi juga dilakukan untuk mengetahui nilai ketidakpastian. Untuk mengetahui nilai atau harga ketidakpastian, yaitu dengan langkah pertama mencari nilai standar deviasi, dengan menggunakan persamaan 2.13. (Eko putro & Abadi)

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum\left(x - \bar{x}\right)^2}{n-1}} \quad (2.16)$$

Dimana :

$\left(x - \bar{x}\right)$ = Nilai data x dikurangi rata-rata x

n= Jumlah data x

Langkah kedua adalah menghitung nilai ketidakpastian pada hasil pengukuran (UA1), dengan menggunakan persamaan 2.17.

$$UA1 = \frac{\delta}{\sqrt{n}} \quad (2.17)$$

Langkah ketiga mencari regresi (Yreg), seperti pada persamaan 2.18.

$$Yreg = a + bx \quad (2.18)$$

Untuk menghitung nilai persamaan regresi (Yreg), sebelumnya mencari nilai **a** dan **b**. Tetapi untuk mencar nilai **a**, harus mencari nilai **b** dahulu. Seperti pada persamaan 2.19.

$$b = \frac{n\sum xy - \sum x \sum y}{n\sum x^2 - \left(\sum x\right)^2} \quad (2.19)$$

Selanjutnya menghitung nilai **a** dengan persamaan 2.20

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2.20)$$

Kemudian mencari nilai nilai *sum square residual* (SSR), persamaan untuk mencari SSR seperti pada persamaan 2.21.

$$SSR = \sum\left(R^2\right) \quad (2.21)$$

Kemudian menghitung nilai ketidakpastian pendekatan regresi (UA2), dengan menggunakan persamaan 2.22 berikut:

$$UA2 = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}} \quad (2.22)$$

Dimana,

SSR : *sum square residual*

UA2 : nilai ketidakpastian pendekatan regresi

Persamaan tersebut yang digunakan untuk mencari nilai ketidakpastian pendekatan regresi, yang nantinya digunakan ntuk kalibrasi, dan juga bida diketahui seberapa jauh perbedaan atau penyimpangan antara harga benar dengan harga yang ditunjukkan oleh alat ukur.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Prosedur Umum Penelitian

Pada sub bab ini, dijelaskan segala prosedur dalam penelitian yang dilakukan sehingga tujuan penelitian tercapai. Prosedur tersebut digambarkan melalui *flowchart* yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1. Berikut ini uraian dari beberapa tahapan dalam perancangan turbin angin serta kontroler PID-PSO pada *buck boost converter*.

a. Perancangan Sistem Turbin Angin

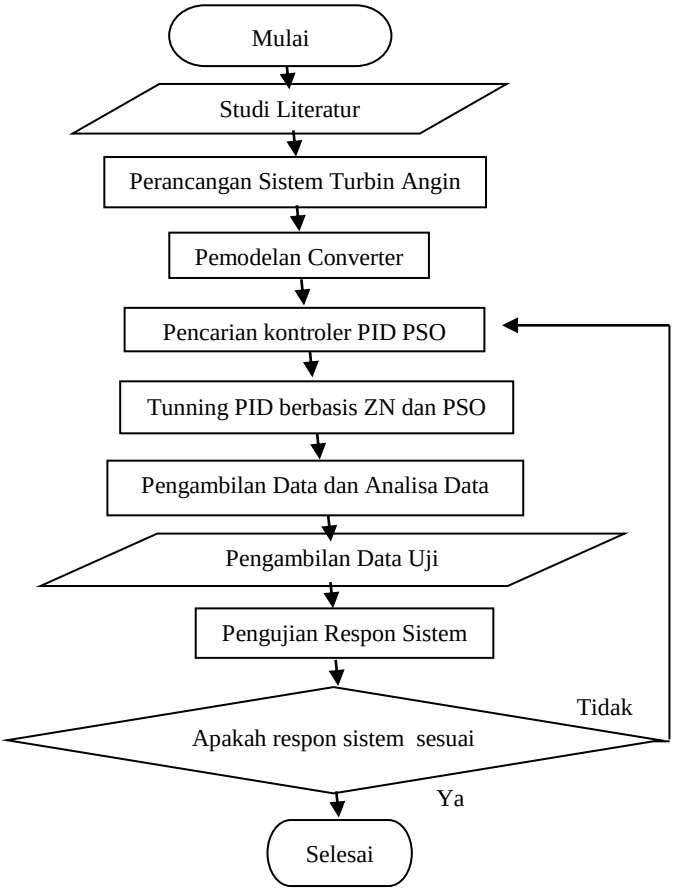
Perancangan yang dimaksud merupakan perancangan secara *software* dan *hardware*. Perancangan tersebut dengan menerapkan beberapa spesifikasi turbin angin untuk sumber angin skala kecil. Setiap komponen turbin angin juga dilakukan pengujian terlebih dahulu kemudian dirangkai dan dilakukan pengujian secara keseluruhan. Selanjutnya, dilakukan *monitoring* kinerja turbin angin.

b. Perancangan *Buck-Boost Converter*

Hasil dari pengujian dan *monitoring* alat secara *real* tersebut dicari pemodelan sistemnya kemudian dilakukan pengujian apakah pemodelan tersebut telah mewakili *plant* yang sebenarnya. Lalu dirancang pula sistem dengan kontroller PID untuk sistem turbin angin.

c. Pencarian Parameter Kontroler PID menggunakan PSO

Tahap pencarian parameter kontroler PID dilakukan menggunakan metode PSO. Dalam proses optimalisasi, dibutuhkan beberapa parameter optimasi PSO seperti penentuan jumlah individu dalam suatu populasi, penentuan nilai posisi, kecepatan, penentuan jumlah iterasi serta penentuan nilai bobot inersia. Hasil pencarian nilai parameter PID kemudian diterapkan pada *real plant* sistem turbin angin.



Gambar 3.1 *Flowchart* pengerjaan tugas akhir

d. Perancangan Sistem kontrol PID-PSO

Sistem kontrol PID-PSO dilakukan dengan cara mencari parameter PID (Kp, Ki, Kd) menggunakan algoritma PSO secara simulasi dalam MATLAB.

e. Pengujian Sistem Kontrol Buck-Boost Converter Turbin Angin

Pada pegujian ini merupakan tahap pengujian *tracking set point* untuk sistem kontrol sudut pitch turbin angin secara *real plant*. *Setpoint* diberikan secara bervariasi dengan batasan rpm maksimum yang dapat dicapai oleh turbin angin tersebut.

Adapun langkah langkah perancangan sistem kontrol PID sebagai berikut.

- Memodelkan plant atau sistem yang akan dikontrol

Dalam penelitian ini plant dimodelkan dalam bentuk fungsi transfer sebagaimana telah dibahas pada sub bab sebelumnya.

- Menentukan fungsi fitness atau fungsi tujuan

Fungsi tujuan metode desain kontroler PID yang dipilih dalam penelitian ini menggunakan kriteria performansi *integral absolute error*

$$\text{(IAE)}, IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|\, dt$$

- Menentukan fungsi batas optimasi

Fungsi batas adalah kriteria minimal yang harus dicapai oleh algoritma PSO yang dinginkan. Kriteria fungsi batas dalam penelitian ini adalah *settling time* performansi sistem dari kontroler Ziegler Nichols.

- Menyusun algoritma PSO-PID, menentukan parameter-parameter PSO
- Melakukan penalaan.

Penalaan dilakukan dengan memberikan input step pada sistem. Garis putus-putus menunjukkan proses penalaan. Setelah diperoleh nilai parameter PID, garis putus-putus sudah dipakai lagi.

- Menentukan nilai Gbest

Secara bergantian tiap partikel inisialisasi dengan ketiga nilai yang dimiliki masuk sebagai kontroler PID, menghasilkan nilai performansi sistem kontrol. Partikel yang menghasilkan nilai IAE

terkecil merupakan Gbest saat itu dan menjadi acuan bagi pergerakan posisi partikel lain pada iterasi berikutnya.

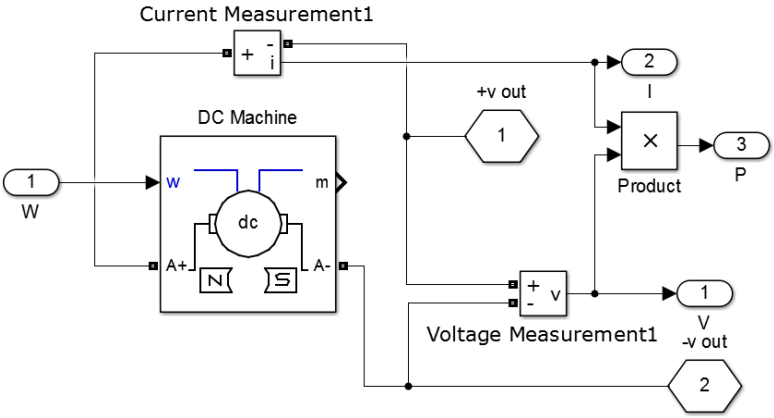
f. Pengolahan dan Analisa Data

Seluruh data hasil pengujian maupun data spesifikasi turbin angin kemudian diolah serta dilakukan analisa setiap performansinya. Hasil pengolahan data tersebut kemudian dianalisa kelebihan dan kekurangannya.

3.2 Perancangan Turbin Angin

3.2.1 Perancangan Simulasi Turbin Angin Pada Matlab

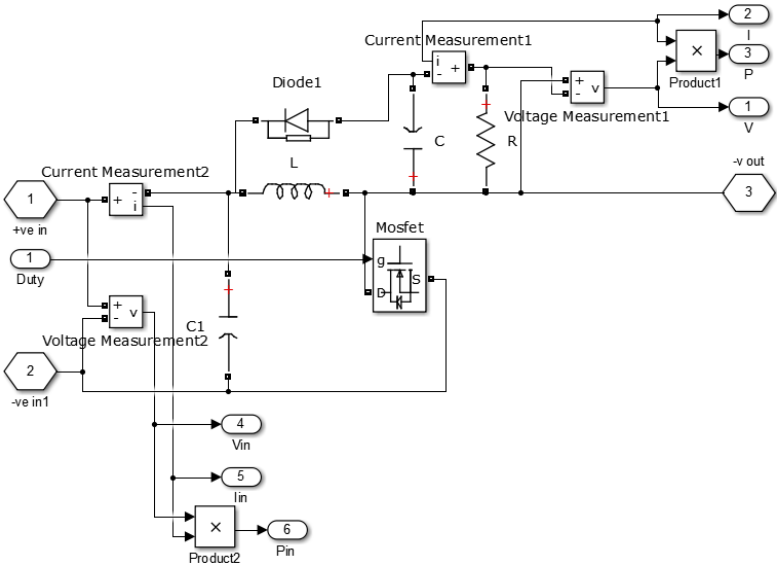
Perancangan simulasi menggunakan Matlab. Simulasi menggunakan perangkat lunak bertujuan untuk membandingkan performansi sistem terhadap hasil rancang bangun. Terdapat tiga tahap simulasi dengan perangkat lunak Matlab, yaitu simulasi generator, simulasi buck-boost converter, dan simulasi kontrol pid. Diagram blok pada masing-masing simulink Matlab ditampilkan pada Gambar 3.2, Gambar 3.3, dan Gambar 3.4.



Gambar 3.2 Diagram Blok Generator pada Simulink matlab

Gambar 3.2 merupakan Simulink generator pada matlab. Generator yang digunakan adalah generator DC. Hal tersebut

dimaksudkan untuk menghasilkan tegangan keluaran DC. Input dari generator adalah kecepatan sudut yang telah dihubungkan dengan rotor turbin angin. Variable output dari generator adalah arus dan tegangan. Adapun spesifikasi prototype generator yang digunakan yaitu untuk kecepatan putar generator 375 rpm menghasilkan tegangan 24 volt.



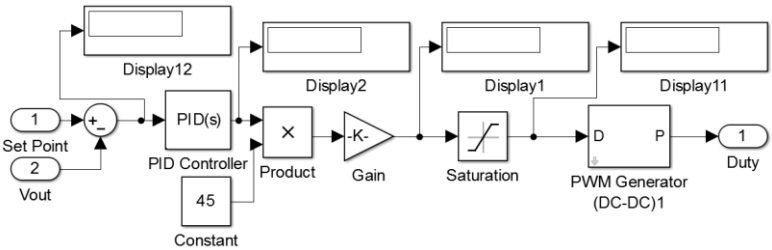
Gambar 3.3 Diagram Blok *Buck-boost Converter* pada Simulink matlab

Diagram blok dari buck boost converter dapat dilihat pada gambar 3.3. Rangkaian buck boost converter pada penelitian ini digunakan untuk menstabilkan tegangan dari generator.

Tabel 3.1 Parameter dan nilai rancangan buck-boost converter

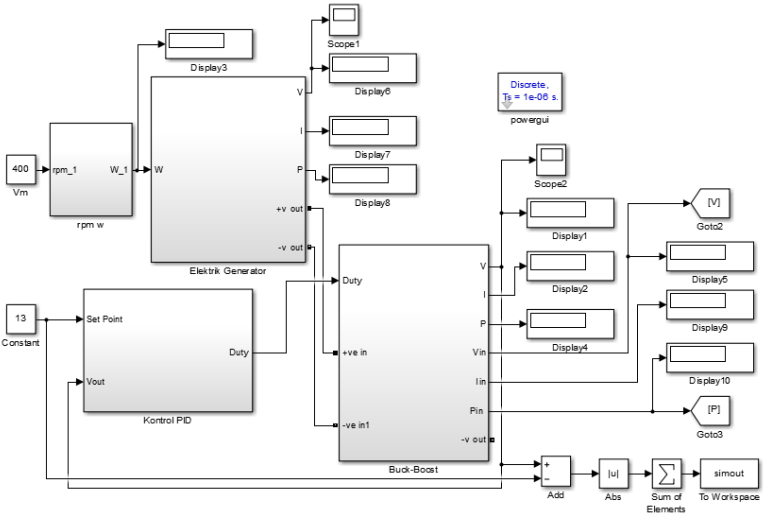
Parameter	Nilai
Tegangan masukan	2–17 V
Tegangan keluaran	13 V
Arus input	3 A
Frekuensi switching	28.000 Hz

Tabel 3.1 menunjukkan parameter yang digunakan untuk mendesain *buck boost converter*. Pada perancangan *buck-boost converter* ini menggunakan komponen-komponen elektrik seperti *inductor*, *resistor, capacitor*, dll . *Switch* yang digunakan bertipe IRFZ44N karena memiliki tingkat frekuensi *switch* yang lebih baik dari komponen elektronik *switch* lainnya. Untuk menentukan nilai komponen tersebut atau desain buck-boost diinginkan maka harus menentukan parameter-parameternya menggunakan persamaan (9.1), (9.2), dan (9.3). Perancangan buck-boost ini menggunakan tegangan masukan(Vin) sebesar 2-17 V dan nilai tegangan keluaran atau *setpoint* (Vout) sebesar 13 V.



Gambar 3.4 Diagram Blok Kontrol PID pada Simulink Matlab

Diagram blok kontrol PID dapat dilihat pada gambar 3.4. Kontrol PID ini digunakan untuk mengontrol pwm pada mosfet buck boost converter. Input dari PID adalah error, yang didapat dari tegangan keluaran dikurangi setpoint.



Gambar 3.5 Diagram Blok Perancangan Turbin Angin pada Simulink matlab

Gambar perancangan turbin angin secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 3.5. Bagian dari perancangan ini meliputi Kecepatan sudut rotor dari blade, generator DC, buck boost converter, kontrol PID, dan optimasi menggunakan PSO.

3.2.2 Pemasangan Komponen Turbin Angin

Komponen penyusun yang digunakan dalam pembuatan turbin angin antara lain *blade*, generator, penopang *blade*, tiang penyangga, *rotary encoder*, sensor tegangan, LCD, *main plate*, serta modul Arduino Uno. Berikut ini penjelasan mengenai spesifikasi komponen penyusun turbin angin.

Komponen pertama adalah *blade* turbin angin. Desain *blade* turbin angin yang digunakan menggunakan tipe S835 pada bagian bagian pangkal, tipe S833 pada bagian tengah dan tipe S834 pada bagian ujung bilah. Panjang *blade* turbin yang dibuat yakni sebesar 1,1 m. Penampang fisik *blade* turbin ditunjukkan oleh Gambar 3.2. Bahan penyusunnya menggunakan bahan jenis *fiber*

glass yang kemudian dilapisi dengan cat sehingga bahan relatif ringan.

Gambar 3.6 *Airfoil* turbin angin

Jumlah *blade* yang digunakan dalam turbin angin ini sebanyak 3 buah. Ketiga *blade* dikondisikan dengan berat yang sama yakni seberat 990 gram. Pada pangkal *blade* disambungkan dengan *bearing* untuk memperhalus pergerakan *blade* saat digerakkan dengan motor servo serta di bagian ujungnya disambung dengan sebuah *gear*.

Penopang tersebut terbuat dari bahan akrilik dengan dimensi sebesar 28 cm dengan tebal 1,5 cm. Pada penopang tersebut, di bagian tengahnya dikopel dengan sebuah besi yang dijadikan poros putaran turbin angin. Semua komponen yang dikaitkan pada penyangga PVC tersbut akan ikut berputar selama turbin angin bergerak.

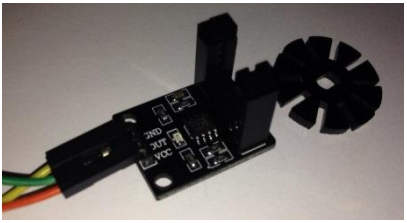
Selama poros turbin bergerak, diperlukan juga sebuah sensor pembacaan kecepatan putaran turbin angin. Dalam perancangan ini, digunakan sensor *rotary encoder* untuk mengetahui rpm (*Rotation Per Minute*) dari putaran turbin angin. Nilai rpm tersebut dianalogikan sebagai besarnya keluaran daya dari turbin angin saat diberi daya angin. Artinya, semakin besar rpm dari poros turbin, maka daya keluaran turbin angin juga besar.

Arduino UNO adalah sebuah board mikrokontroler yang didasarkan pada ATmega328. Arduino UNO mempunyai 14 pin digital input/output (6 di antaranya dapat digunakan sebagai output PWM), 6 input analog, sebuah osilator Kristal 16 MHz, sebuah koneksi USB, sebuah power jack, sebuah ICSP header, dan sebuat tombol reset. Arduino UNO memuat semua yang dibutuhkan untuk menunjang mikrokontroler, mudah

menghubungkannya ke sebuah computer dengan sebuah kabel USB atau mensuplainya dengan sebuah adaptor AC ke DC atau menggunakan baterai untuk memulainya.

Gambar 3.7 Arduino uno

Rotary encoder yang digunakan memiiki lubang sebanyak 16 lubang. Pada saat turbin angin berputar, maka piringan tersebut ikut berputar dan dilakukan pembacaan perputaran dengan mekanisme *interrupt*. Dengan mekanisme tersebut, dilakukan pengukuran besar rpm (Rotasi Per Menit) dari turbin angin. Untuk mengetahui kinerja *rotary encoder*, maka dilakukan pengujian *rotary encoder* menggunakan motor listrik dengan variasi tegangan masukan lalu nilai rpm dari *rotary encoder* diuji dengan nilai hasil pengukuran menggunakan Tachometer. Bentuk dari *Rotary Encoder* dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Rangkaian *rotary encoder*

Prosesor yang digunakan dalam perancangan ini adalah prosesor Arduino Uno. Pin yang digunakan meliputi pin Vcc, Gnd, pin 2 sebagai pin *interrupt* untuk sensor *rotary encoder.*

Prinsip kerja modul sensor tegangan yaitu didasarkan pada prinsip penekanan resistansi, dan dapat membuat tegangan input berkurang hingga 5 kali dari tegangan asli. Bentuk modul sensor tegangan seperti ditunjukkan pada gambar 3.9 berikut.

Gambar 3.9 Rangkaian sensor tegangan

LCD (*Liquid Cristal Display*) berfungsi untuk menampilkan karakter angka, huruf ataupun simbol dengan lebih baik dan dengan konsumsi arus yang rendah. LCD (*Liquid Cristal Display*) dot matrik M1632 merupakan modul LCD buatan hitachi. Modul LCD (*Liquid Cristal Display*) dot matrik M1632 terdiri dari bagian penampil karakter (LCD) yang berfungsi menampilkan karakter dan bagian sistem prosesor LCD dalam bentuk modul dengan mikrokontroler yang diletakan dibagian belakang LCD tersebut yang berfungsi untuk mengatur tampilan LCD serta mengatur komunikasi antara LCD dengan mikrokontroler yang menggunakan modul LCD tersebut.

Gambar 3.10 LCD 2x16

Buck boost converter merupakan sebuah modul yang digunakan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan yang diatur menggunakan nilai duty cycle pwm pada mosfet. Tegangan input yang diatur ini keluaran dari generator dc pada turbin angin. Rangkaian buck boost converter ditunjukkan pada gambar 3.11.

Gambar 3.11 Rangkaian buck boost converter

Main plate (Centre plate) digunakan untuk menopang poros *blade* turbin, rangkaian daya, *optpcoupler* serta Arduino. Bahan yang digunakan adalah besi dengan diameter sebesar 40 cm dan tebal 0,2 cm.

Gambar 3.12 *Prototype* turbin angin

Keseluruhan komponen turbin angin tersebut kemudian ditopang oleh tiang penyangga. Bentuk keseluruhan dari *protype* turbin angin diperlihatkan oleh gambar 3.12.

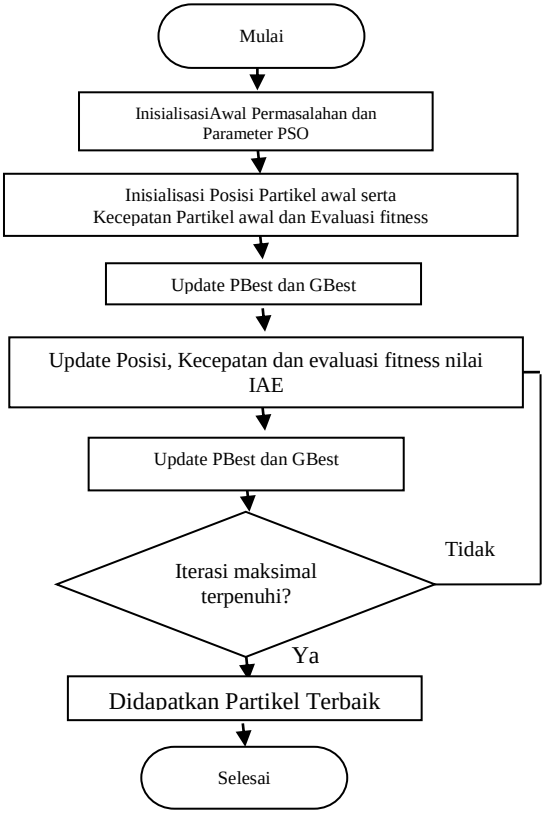
3.2.3 Kalibrasi Sensor Tegangan

Kalibrasi sensor tegangan bertujuan untuk mengetahui nilai ketidakpastian hasil pengukuran. Kalibrasi sensor tegangan dilakukan dengan prosedur sebagai berikut :

a. dilakukan pengukuran dan pencatatan dengan sensor tegangan dan multimeter terhadap tegangan keluaran *power supply* sebanyak lima kali pada nilai 12 Volt
b. dilakukan pengukuran dan pencatatan dengan sensor tegangan dan multimeter terhadap tegangan keluaran *power supply* sebanyak sepuluh kali dengan rentang 1 Volt mulai dari tegangan 11 Volt hingga 20 Volt
c. dihitung nilai U_{A1}, U_{A2}, U_{B1}, dan U_{exp}

3.3 Pencarian Parameter Kontroler PID menggunakan metode PSO

Algoritma PSO dibangun menggunakan aplikasi Matlab berupa *m file* yang diintegrasikan dengan simulink dari sistem kontrol *pitch* turbin angin. Fungsi Objektif dalam permasalahan ini adalah nilai minimum dari IAE (*Integral Absolute Error*) yang merupakan nilai luasan *error* antara *set point* dengan respon sistem. Sedangkan *variable* yang dioptimasi adalah nilai parameter kontrol PID yakni, nilai gain Kp, Ti dan Td. Diagram alir *tunning* PID-PSO ditunjukkan oleh Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Diagram alir optimalisasi menggunakan PSO

Langkah pertama yang harus dilakukan dalam melakukan *tunning* parameter kontrol PID adalah dengan penentuan jumlah individu dalam satu populasi, penentuan nilai posisi dan kecepatan, penentuan jumlah iterasi dan penentuan nilai bobot inersia. Setelah itu, dilakukan evaluasi nilai *fitness* untuk setiap nilai *particle* awal yang didapat. Evaluasi nilai *fitness* dalam hal ini merupakan pencarian nilai luasan *error* antara *set point* dengan sinyal yang terbentuk, jadi evaluasi nilai *fitness* tersebut dilakukan menggunakan simulasi pada Simulink. Inilah gunanya

integrasi antara *m file* algoritma PSO dengan simulasi simulink dari sistem *close loop* yang dibuat.

Nilai PBest (*Personal Best*) pada inisialisasi awal ini merupakan nilai posisi serta *fitness* masing-masing *particle*. Sedangkan nilai Gbest (*Global Best*) pada inisaialisasi awal merupakan nilai posisi terbaik dari Pbest yang didapat sebelumnya.

Kemudian dilakukan *update* nilai kecepatan baru dan posisi baru setiap partikel dengan menggunakan persamaan (2.10) dan (2.11). Hal ini dilakukan hingga iterasi maksimum terpenuhi. Dalam setiap iterasi, dilakukan pula *update Personal Best* serta *Global Best*.

Hasil *update* nilai *Global Best* pada iterasi terakhir merupakan nilai posisi terbaik yang menghasilkan nilai fitnes paling optimal dari *tunning* parameter kontrol PID menggunakan algoritma PSO tersebut. Sehingga, nilai tersebut yang nantinya digunakan sebagai nilai parameter kontrol PID.

3.4 Realisasi Kontrol Tegangan Generator Turbin Angin

Pada tahap ini, dilakukan integrasi antara *hardware* dengan *software*. *Hardware* dalam hal ini terdiri dari *plant* turbin angin, dengan output tegangan optocoupler untuk pembacaan nilai rpm, modul arduino, serta sebuah *personal computer* sebagai media monitoring. Program yang diimplementasikan pada modul Arduino berupa program pembacaan nilai rpm, program pengendali PID serta program untuk menampilkan nilai rpm serta waktu yang berlangsung.

Hasil tuning parameter kontrol PID menggunakan PSO kemudian diimplementasikan ke dalam prosesor Arduino Uno. Implementasi tersebut dengan menggunakan bahasa pemrograman yang dapat diterjemahkan oleh prosesor yakni bahasa pemrograman C.

Setpoint pada tahap ini dimasukkan besaran nilai tegangan berapa yang diinginkan untuk dijaga tetap oleh sistem turbin angin. Kemudian dibandingkan dengan tegangan yang sedang

dihasilkan yang kemudian dicari nilai selisihnya, atau dalam hal ini disebut nilai *error*. Nilai *error* tersebut kemudian dimasukkan ke dalam Kontrol PID untuk diubah sinyalnya menjadi nilai masukan bagi buck-boost converter.

Dalam tahap ini, logika kontroler PID terlebih dahulu diubah menjadi bahasa C. Sehingga, diperlukan terlebih dahulu persamaan kontroler PID dalam domain waktu diskrit. Berikut ini persamaannya (Sunarto, 2011):

$$U(k) = Kp\ e(k) + Ki\ Tc\ [e(0) + \ldots + e(k-1) + e(k)] + Kd\ [e(k) - e(k-1)] / Tc \quad (3.5)$$

Dimana,

U(k) : Sinyal diskrit
Kp : *Gain* kontrol proporsional
Ki : *Gain* kontrol integral
Kd : *Gain* kontrol *derivative*
e(k) : *error* iterasi saat ini
e(k-1) : *error* iterasi sebelumnya

Persamaan tersebut kemudian diubah kedalam bahasa pemrograman C untuk selanjutnya dijadikan *input* aktuator dalam hal ini adalah nilai posisi buck-boost converter.

Kemudian, dilakukan pengujian sistem kontrol tegangan converter secara *hardware* dan *software*. Pengujian yang dilakukan dengan memberikan nilai target atau *set point* pada program arduino, kemudian dilakukan *monitoring* nilai rpm dari sistem setiap detik. Hasil monitoring nilai rpm tersebut selanjutnya digambarkan dalam bentuk diagram.

Hasil pengujian dianalisa kriteria performansinya yang seperti *time settling*, *maximum overshoot*, serta nilai *rise time*-nya. kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian saat sebelum diberikan kontrol pada simulasi dan real plant.

3.5 Proses Penalaan Kp, Ki. Kd Dengan Algoritma PSO

Pada bagian ini dibahas proses penalaan parameter PID dengan algoritma PSO dan respon motor DC dengan kontroler PSO-PID yang dihasilkan. Berikut ini adalah Gambaran dan penjelasan proses penalaan parameter PID dengan algoritma PSO.

- Inisialisasi

Seluruh partikel swarm diinisialisasi, dimana tiap partikel memiliki 3 nilai (Kp, Ti, dan Td) dan itu adalah posisi awal. Posisi awal merupakan Pbest bagi tiap partikel hingga iterasi berikutnya.

- Menentukan nilai Gbest

Secara bergantian tiap partikel inisialisasi dengan ketiga nilai yang dimiliki masuk sebagai kontroler PID, menghasilkan nilai performansi sistem kontrol. Partikel yang menghasilkan nilai IAE terkecil merupakan Gbest saat itu dan menjadi acuan bagi pergerakan posisi partikel lain pada iterasi berikutnya.

- Iterasi dan update posisi

Dengan diketahui nilai Pbest untuk tiap partikel dan nilai Gbest sebagai acuan pergerakan, pada iterasi berikutnya tiap partikel berubah posisi (Kp, Ti, Td). Posisi ini digunakan mencari nilai IAE minimal. Demikian seterusnya sampai mecapai kriteria.

Adapun parameter-parameter PSO yang digunakan adalah sebagai berikut.

Dimensi ; 3 (mewakili Kp, Ki, Kd)
Maksimal iterasi : 10
Batas atas Kp, Ki, Kd : 8, 0.7, 0.6
Batas bawah Kp, Ki, Kd : 0,0,0

- Melakukan penalaan.

Penalaan dilakukan dengan memberikan input step pada sistem.

Tabel 3.2 Nilai Gbest (Kp, Ki, Kd)

Iterasi	Gbest		
	Kp	Ki	Kd
1	7,30	0,44	0,06
2	7,23	0,38	0,57
3	7,72	0,11	0,58
4	7,66	0,34	0,48
5	6,52	0,63	0,08
6	6,24	0,70	0,08
7	8,00	0,40	0,30
8	5,91	0,70	0,33
9	6,52	0,63	0,08
10	7,02	0,50	0,08

Pencarian nilai parameter PID (Kp, Ki, Kd) yang direpresentasikan Gbest dicapai dengan berhentinya iterasi pada iterasi ke-10, setelah mencapai performansi ts < 0,03 dan tp < 0.37 dan nilainya sudah konvergen.

BAB IV
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab IV menampilkan hasil analisa yang telah dimodelkan pada bab III. Bab ini terdiri dari beberapa bagian antara lain pengujian hasil simulasi untuk model simulink DC-DC *buck-boost converter*, simulink PID. Penelitian ini terdapat dua pengujian untuk simulasi yaitu: pengujian respon *dc-dc buck-boost converter* pada *open loop* dan pengujian respon *dc-dc buck-boost converter* pada *close loop*. Terdapat tiga pengujian yang dilakukan pada *hardware dc-dc buck-boost converter* yaitu : pengujian karakteristik *dc-dc buck-boost converter* secara *open loop* dengan menggunakan tegangan masukan berasal dari motor, pengujian karakteristik *dc-dc buck-boost converter* secara *open loop* dengan variasi tegangan masukan yang berasal dari motor dan variasi *duty cycle*.

4.1 Hasil Pengujian Simulasi dengan Perangkat Lunak Matlab

4.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik *Buck-Boost converter*

Simulasi rangkaian *buck-boost converter* dengan perangkat lunak Matlab bertujuan untuk mengetahui pengaruh parameter-parameter atau rangkaian elektrik dari *buck-boost converter* terhadap tanggapan yang dihasilkan. Parameter yang berpengaruh terhadap tanggapan rangkaian *buck-boost converter* adalah tegangan masukan (Vin) dan nilai *duty cycle*. Simulasi ini dilakukan secara *open loop* dengan variasi tegangan masukan.

Dari hasil pemodelan pada bab III didapatkan nilai parameter pada buck-boost converter dengan *frequency switching* 28000, resistor 18 Ω, dan induktor 470 μh.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Karakteristik *Buck-Boost Converter* dengan *duty cycle* 80 %

RPM	Duty cycle	Masukan			Keluaran		
		Tegangan	Arus	Daya	Tegangan	Arus	Daya
200	80	1,81	1,56	2,83.	6,52	0,36	2,36
250	80	2,22	1,96	4,36	8,17	0,45	3,71
300	80	2,64	2,36	6,22	9,83	0,55	5,37
350	80	3,06	2,75	8,40	11,48	0,64	7,32
400	80	3,47	3,15	10,92	13,14	0,73	9,59

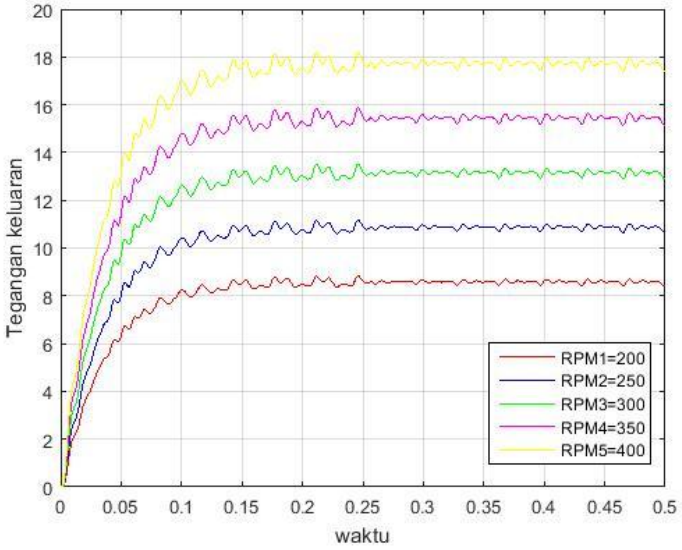
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Karakteristik *Buck-Boost Converter* dengan *duty cycle* 20 %

RPM	Duty cycle	Masukan			Keluaran		
		Tegangan	Arus	Daya	Tegangan	Arus	Daya
650	20	40,29	0,17	6,94	10,08	0,56	5,64
700	20	43,32	0,19	8,07	10,89	0,60	6,59
750	20	46,41	0,20	9,29	11,71	0,66	7,62
800	20	49,50	0,21	10,58	12,53	0,70	8,73
850	20	52,59	0,23	11,97	13,35	0,74	9,91

Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 menunjukan hasil karakteristik buck-boost converter dengan duty cycle 80% dan 20%. Tujuan dari pengujian ini yaitu untuk mengetahui batas rpm dengan duty cycle 20% sampai 80%. Rpm yang dapat diterima oleh sistem ini untuk mencapai setpoint 13v yaitu pada nilai mínimum rpm 400 dan maksimum rpm 850.

4.1.2 Hasil Tanggapan Lingkar Terbuka dari Rangkaian *Buck-boost Converter*

Dari simulasi yang telah dibuat dengan dutycycle 50%, didapatkan hasil *respon open loop buck-boost converter* yang ditunjukkan pada gambar 4.1 berikut :



Gambar 4.1 Hasil Tanggapan Lingkar Terbuka

Gambar 4.1 menunjukkan hasil tanggapan lingkar terbuka dengan variasi rpm dari generator pada simulasi matlab.

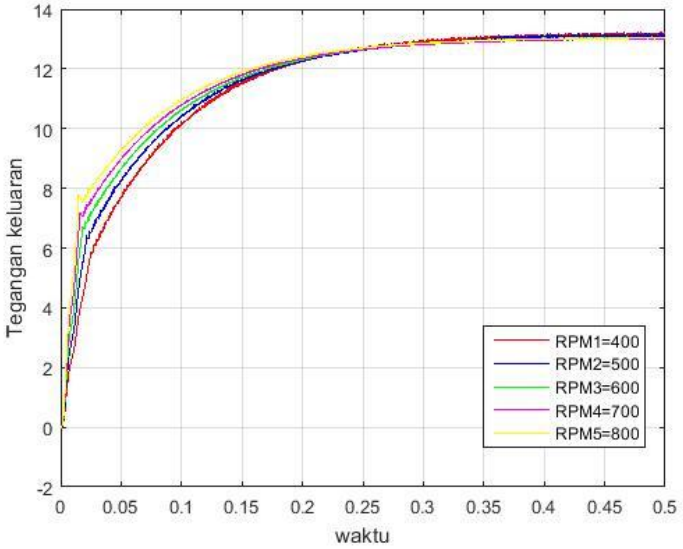
4.1.3 Hasil Perhitungan Nilai kendali PID

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Nilai PID

	Kp	**Ti**	**Td**	**Ki**	**Kd**
P	6,60	∞	0,00	0,00	0,00
PI	5,94	8,30	0,00	0.72	0,00
PID	8,00	13,30	0,08	0,70	0,60

Tabel 4.2 menunjukkan hasil perhitungan nilai kendali PID yang didapat dari simulasi matlab dengan nilai Kp=8.00, Ki=0.70, dan Kd=0.60.

4.1.4 Hasil Tanggapan Lingkar Tertutup Dengan Rangkaian *Buck-Boost Converter*

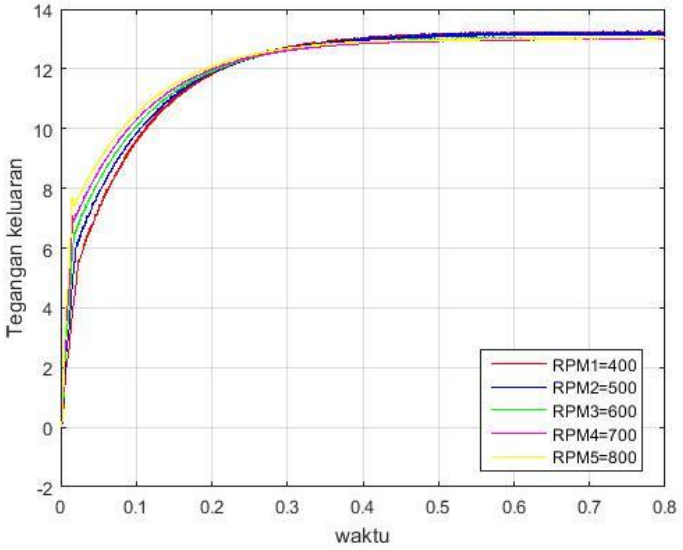


Gambar 4.2 Hasil Tanggapan PID

Gambar 4.2 menunjukkan hasil tanggapan lingkar terbuka dengan variasi rpm dari generator pada simulasi matlab.

Tabel 4.4 Analisa Performansi PID

RPM	Tegangan output	Delay time (s)	Rise time (s)	Peak time (s)	Maximum overshoot (%)	Settling time (s)	ESS
400	13,20	0,25	0,34	0,38	0,00	0,38	0,00
500	13,10	0,24	0,34	0,38	0,00	0,38	0,00
600	13,06	0,24	0,35	0,39	0,00	0,39	0,00
700	13,01	0,25	0,36	0,39	0,00	0,39	0,00
800	13,04	0,24	0,37	0,40	0,00	0,40	0,01



Gambar 4.3 Hasil Tanggapan PID-PSO

Gambar 4.2 dan gambar 4.3 menunjukkan hasil tanggapan PID dan hasil tanggapan PID-PSO. Kedua tanggapan didapat dari variasi rpm yang sama tetapi menghasilkan tegangan keluaran yang berbeda. Dari hasil kedua tanggapan tersebut dapat dianalisa bahwa tanggapan PID-PSO lebih mendekati setpoint.

Tabel 4.5 Analisa Performansi PID-PSO

RPM	Tegangan output	Delay time (s)	Rise time (s)	Peak time (s)	Maximum overshoot (%)	Settling time (s)	ESS
400	13,20	0,19	0,33	0,37	0,00	0,37	0,00
500	13,22	0,19	0,35	0,38	0,00	0,38	0,00
600	13,00	0,20	0,36	0,38	0,00	0,38	0,00
700	13,00	0,20	0,37	0,38	0,00	0,38	0,00
800	13,05	0,20	0,37	0,39	0,00	0,39	0,00

4.2 Hasil Pengujian Rancang Bangun *Buck-Boost Converter*

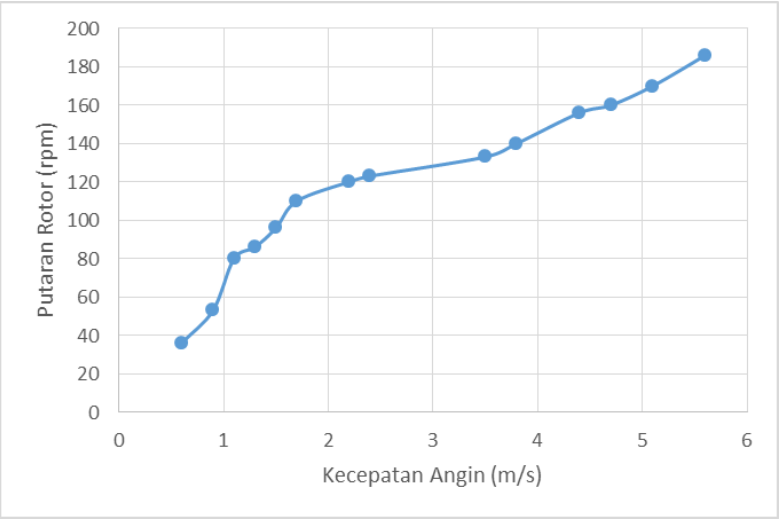
4.2.1 Hasil Pengujian Kecepatan Putar Turbin Angin

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kecepatan putar rotor turbin angin terhadap kecepatan angin yang bervariasi.Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.6 berikut

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kecepatan Putar Turbin Angin Tanpa Generator

kecepatan angin (m/s)	Putaran rotor (rpm)
0,6	36
0,9	53
1,1	80
1,3	86
1,5	96
1,7	110
2,2	120
2,4	123
3,5	133
3,8	140
4,4	156
4,7	160
5,1	170
5,6	186

Tabel 4.6 menunjukkan bahwa putaran rotor turbina kan berubah mengikuti perubahan kecepatan turbin angin. Kecepatan yang diukur bearada pada rentang 0,6 m/s sampai 5,6 m/s menghasilkan kecepatan turbin angin pada rentang 36 rpm sampai 186 rpm.



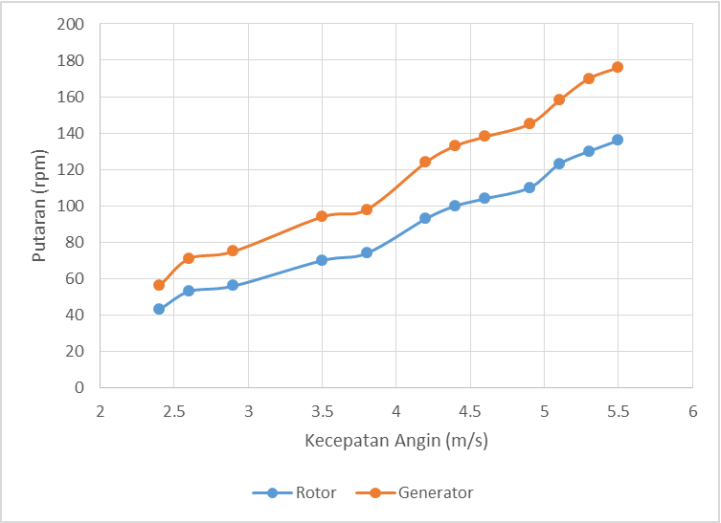
Gambar 4.4 Hasil Pengujian Kecepatan Putar Turbin Angin Tanpa Generator

Gambar 4.4 menunjukkan hasil pengujian kecepatan putar turbin angin tanpa generator. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteirstik kecepatan putar rotor pada turbin angin terhadapa kecepatan angin. kecepatan angin rata-rata pada negara Indonesia sebesar 2 m/s - 6 m/s. Pada table 4.6 kecepatan angin 2,2 m/s dapat menghasilkan kecepatan putar rotor sebesar 120 rpm, dan pada saat kecepatan angin 5,6 m/s dapat menghasilkan kecepatan putar rotor sebesar 186 rpm.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Kecepatan Putar Turbin Angin Menggunakan Generator

kecepatan angin (m/s)	Putaran rotor (rpm)	Putaran Generator (rpm)
2.4	43	56
2.6	53	71
2.9	56	75
3.5	70	94
3.8	74	98
4.2	93	124
4.4	100	133
4.6	104	138
4.9	110	145
5.1	123	158
5.3	130	170
5.5	136	176

Tabel 4.7 menunjukkan hasil pengujian kecepatan putar turbin angin saat menggunakan generator. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kecepatan putar generator terhadap kecepatan angin dengan diameter pully rotor dan diameter pully generator yang berbeda. Perbedaan ukuran diameter pully pada rotor dan generator bertujuan untuk mengurangi torsi pada turbin angin, sehingga kecepatan putar generator lebih maksimal.



Gambar 4.5 Hasil Pengujian Kecepatan Putar Turbin Angin Menggunakan Generator

Gambar 4.5 menunjukkan grafik perbandingan kecepetan putar rotor turbin angin dengan kecepatan putar generator. Perbedaan kecepatan initerjadi karena adanya perbedaan kuran diameter pada pully rotor dan pully generator. Dari tabel 4.5 juga dapat dihitung ketidakpastian regresi sebesar 4.92, perhitungan ketidakpastian regresi di tampilkan pada lampiran c.

4.2.2 Hasil Pengujian Generator Turbin Angin

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan generator dengan motor. Kecepatan motor diatur menggunakan *dimmer*. Pada setiap kecepatan motor yang diberikan menghasilkan variasi kecepatan sudut generator turbin angin. Pengujian dilakukan dengan tanpa beban (R), R= 27 Ω 15 watt, dan R= 20 Ω 5 watt.

Tujuan dari penggunaan variasi beban adalah mengetahui karakterisasi dari generator turbin angin. Sehingga kinerja turbin angin menjadi lebih optimal.

Tabel 4.8 Hasil Pengujian Generator Tanpa R (beban)

RPM	Tegangan
77	4,17
134	7,88
187	10,85
212	12,26
256	14,64
311	18,32
355	20,65
396	24,89
450	27,72
498	30,87

Tujuan dari pengujian generator tanpa beban ini untuk mengetahui karakteristik generator. Semakin tinggi rpm maka tegangan keluaran dari generator juga semakin besar.

Tabel 4.9 Hasil Pengujian Generator dengan R= 10 Ω

Rpm	Arus	Tegangan	Daya
52	0,26	2,40	0,62
101	0,26	2,60	0,67
104	0,27	2,90	0,78
109	0,28	3,30	0,92
133	0,37	3,80	1,40
135	0,39	4,00	1,56
138	0,41	4,10	1,68
140	0,45	4,40	1,98

Tabel 4.10 Hasil Pengujian Generator dengan R= 27 Ω

Rpm	Arus	Tegangan	Daya
70	0,17	4,50	0,77
133	0,17	4,70	0,80
135	0,17	4,90	0,83
143	0,17	5,00	0,85
161	0,29	7,70	2,23
164	0,32	8,50	2,72
172	0,34	8,80	2,99
177	0,35	9,10	3,19

Tabel 4.9 dan Tabel 4.10 menunjukkan bahwa ketika terjadi peningkatan rpm pada generator maka arus dan tegangan meningkat. Perbandingan arus dan tegangan saat diberi beban 10 Ω dan 27 Ω terlihat bahwa arus saat diberi beban 10 Ω lebih besar dari pada beban 27 Ω, tetapi tegangannya lebih kecil.

4.2.3 Hasil Pengujian *Buck-Boost Converter*

Pengujian ini dilakukan 2 perbandingan pengambilan data Efisiensi *buck-boost converter* dengan torsi generator konstan. Pertama pengambilan data dengan resistor sama dan induktor berbeda, yang kedua dengan induktor sama dan resistor \berbeda. Pengambilan data dengan frequency switching 28000 dan Resistor = 47 Ω dengan variasi duty pada real plant ditnjukkan pada tabel 4.6 dan tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.11 Hasil pengujian *Buck boost converter* menggunakan induktor 470 µh

RPM	Duty	Vin	Iin	Pin	Vout	Iout	Pout	Efisiensi
151.00	20 %	9,10	0,01	0,09	2,43	0,02	0,05	53 %
149.00	25 %	8,70	0,02	0,17	2,50	0,03	0,08	43 %
149.00	30 %	8,60	0,02	0,17	2,88	0,05	0,14	84 %
147.00	35 %	8,40	0,04	0,34	3,35	0,05	0,17	50 %
140.00	40 %	7,93	0,06	0,48	4,40	0,07	0,31	65 %
136.00	45 %	7,30	0,08	0,58	4,44	0,07	0,31	53 %
126.00	50 %	6,55	0,11	0,72	5,10	0,09	0,46	64 %
126.00	55 %	6,10	0,14	0,85	5,33	0,10	0,53	62 %
125.00	60 %	5,30	0,19	1,01	5,62	0,10	0,56	56 %
115.00	65 %	4,60	0,22	1,01	5,72	0,10	0,57	57 %
103.00	70 %	3,76	0,26	0,98	5,84	0,09	0,53	54 %

Tabel 4.12 Hasil pengujian *Buck boost converter* menggunakan induktor 150 µh

RPM	Duty	Vin	Iin	Pin	Vout	Iout	Pout	Efisiensi
136.00	20 %	7,52	0,03	0,23	3,05	0,06	0,18	81 %
135.00	25 %	7,36	0,04	0,29	3,49	0,07	0,24	83 %
134.00	30 %	7,19	0,06	0,43	3,90	0,08	0,31	72 %
133.00	35 %	6,51	0,08	0,52	4,13	0,09	0,37	71 %
127.00	40 %	6,12	0,10	0,61	4,92	0,10	0,49	80 %
125.00	45 %	5,97	0,12	0,72	5,07	0,10	0,51	71 %
123.00	50 %	5,71	0,14	0,80	5,40	0,11	0,59	74 %
115.00	55 %	5,20	0,16	0,83	5,57	0,11	0,61	74 %
109.00	60 %	4,78	0,18	0,86	5,44	0,11	0,60	70 %
103.00	65 %	3,98	0,22	0,88	5,68	0,12	0,68	78 %
90.00	70 %	3,03	0,27	0,82	5,70	0,11	0,63	77 %

Hasil perbandingan efisiensi daya dari Tabel 4.11 dan Tabel 4.12 didapatkan efisiensi daya terbesar pada induktor 150 µh, dengan tegangan keluaran besar tetapi arus keluarannya kecil.

Pengambilan data dengan *frequency switching* 28000 dan Induktor 150 µh dengan variasi *duty* pada real plant ditunjukkan pada tabel 4.13 dan tabel 4.14 berikut.

Tabel 4.13 Hasil pengujian Buck boost converter menggunakan resistor 27 Ω

RPM	Duty	Vin	Iin	Pin	Vout	Iout	Pout	Efisiensi
140.00	20 %	7,96	0,03	0,24	2,30	0,06	0,14	58 %
135.00	25 %	7,93	0,05	0,40	2,75	0,08	0,22	55 %
131.00	30 %	7,20	0,06	0,43	2,93	0,10	0,29	68 %
127.00	35 %	6,53	0,08	0,52	3,49	0,12	0,42	80 %
125.00	40 %	6,50	0,10	0,65	3,78	0,12	0,45	70 %
120.00	45 %	5,93	0,13	0,77	3,98	0,13	0,52	67 %
119.00	50 %	5,72	0,15	0,86	4,11	0,13	0,53	62 %
106.00	55 %	4,70	0,19	0,89	4,19	0,14	0,59	66 %
100.00	60 %	3,70	0,24	0,89	4,48	0,14	0,63	71 %
89.00	65 %	3,14	0,25	0,79	4,72	0,14	0,66	84 %
82.00	70 %	2,42	0,31	0,75	4,82	0,12	0,58	77 %

Tabel 4.14 Hasil pengujian Buck boost converter menggunakan resistor 10 Ω

RPM	Duty	Vin	Iin	Pin	Vout	Iout	Pout	Efisiensi
135.00	20 %	7,71	0,03	0,23	1,21	0,14	0,17	73 %
131.00	25 %	7,20	0,05	0,36	1,44	0,13	0,19	52 %
124.00	30 %	6,70	0,07	0,47	1,54	0,16	0,25	53 %
123.00	35 %	6,50	0,10	0,65	1,96	0,18	0,35	54 %
112.00	40 %	5,76	0,14	0,81	2,04	0,18	0,37	46 %
101.00	45 %	4,71	0,17	0,80	2,22	0,19	0,42	53 %
95.00	50 %	3,76	0,21	0,79	2,28	0,22	0,50	64 %
92.00	55 %	3,96	0,25	0,99	2,25	0,21	0,47	48 %
83.00	60 %	2,40	0,30	0,72	1,97	0,27	0,53	74 %
75.00	65 %	1,87	0,33	0,62	1,77	0,27	0,48	77 %
72.00	70 %	1,42	0,34	0,48	1,52	0,27	0,41	85 %

Hasil perbandingan efisiensi dari Tabel 4.13 dan Tabel 4.14 didapatkan efisiensi daya terbesar pada resistor 10 Ω, dengan arus keluaran yang besar tetapi tegangan keluarannya kecil.

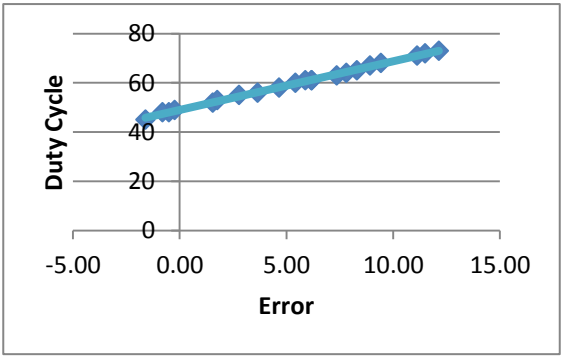
4.2.4 Hasil Pengujian Kontrol PID-PSO pada Buck Boost Converter

Pengujian inii dilakukan dengan mengontrol buck boost converter menggunakan kontrol PID-PSO dengan constrain Kp_{min} = 0, Ki_{min} = 0, Kd_{min}= 0, dan nilai Kp_{max} = 8, Ki_{max} = 0.7, dan Kd_{max} = 0.6.

Tabel 4.15 Hasil pengujian kontrol pid-pso pada *buck-boost converter*

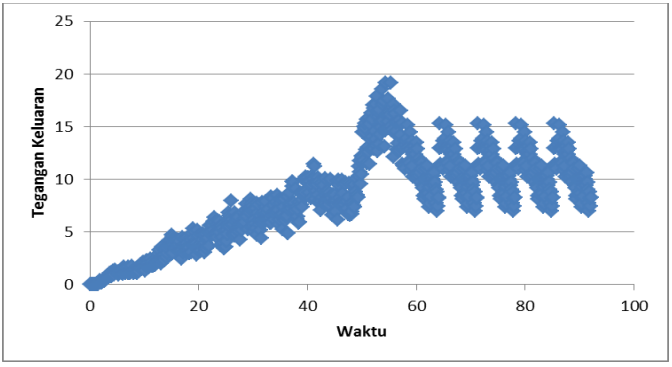
RPM	Duty cycle	Masukan			Keluaran			Error
		Tegangan	Arus	Daya	Tegangan	Arus	Daya	
30	73	0,78	0,07	0,05	0,86	0,03	0,03	12,14
44	72	1,13	0,14	0,16	1,50	0,02	0,03	11,50
46	71	1,38	0,19	0,26	1,87	0,02	0,04	11,13
68	68	2,38	0,07	0,17	3,58	0,03	0,11	9,42
76	65	3,55	0,08	0,28	4,70	0,06	0,28	8,30
99	67	3,68	0,12	0,44	4,09	0,09	0,37	8,91
110	64	3,89	0,14	0,54	5,19	0,08	0,42	7,81
115	63	4,04	0,13	0,53	5,64	0,08	0,45	7,36
126	61	5,21	0,18	0,94	6,82	0,11	0,75	6,18
129	61	5,72	0,21	1,20	6,83	0,11	0,75	6,17
154	61	6,42	0,21	1,35	7,12	0,09	0,64	5,88
162	60	6,68	0,21	1,40	7,58	0,10	0,76	5,42
163	58	6,74	0,22	1,48	8,35	0,09	0,75	4,65
173	56	8,25	0,23	1,90	9,35	0,15	1,40	3,65
185	55	9,87	0,22	2,17	10,22	0,14	1,43	2,78
206	52	11,16	0,24	2,68	11,46	0,16	1,83	1,54
235	53	10,74	0,24	2,58	11,25	0,17	1,91	1,75
275	48	14,78	0,26	3,84	13,51	0,22	2,97	-0,51
326	49	15,76	0,25	3,94	13,24	0,18	2,38	-0,24
360	48	19,93	0,26	5,18	13,81	0,18	2,49	-0,81
435	45	25,64	0,24	6,15	14,61	0,13	1,90	-1,61

Tabel 4.15 hasil pengujian *buck-boost converter* menggunakan kontrol pid-pso. Pengujian ini dilakukan dengan memberi variasi kecepatan angin untuk memutar blade turbin angin sehingga didapatkan daya dari hasil pengukuran tegangan dan arus pada *buck-boost converter.*



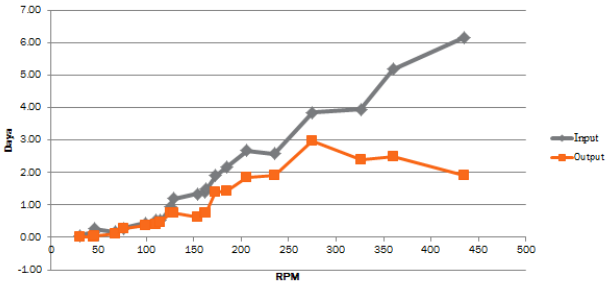
Gambar 4.6 Grafik Error Terhadap *Duty Cycle* Pada *buck Boost Converter*

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa jika error bernilai negatif (-) maka *duty cycle* turun sehingga tegangan output turun, dan jika error benilai positif (+) maka *duty cycle* naik sehingga tegangan output naik. Jadi hal ini sudah sesuai dengan prinsip *buck boost converter*.



Gambar 4.7 Hasil Tanggapan PID-PSO

Hasil tanggapan PID-PSO ditunjukkan pada gambar 4.7. Saat rpm geerator rendah, maka *duty cycle* akan naik. Kenaikan *duty cycle* meningkatkan tegangan keluaran.



Gambar 4.8 Hasil Perbandingan Daya Input Dengan Daya Output *Buck Boost Converter*

Gambar 4.8 menunjukkan hasil perbandingan daya input dengan daya output *pada buck boost converter*. Semakin tinggi rpm maka efisiensi daya pada *buck boost converter* semakin rendah.

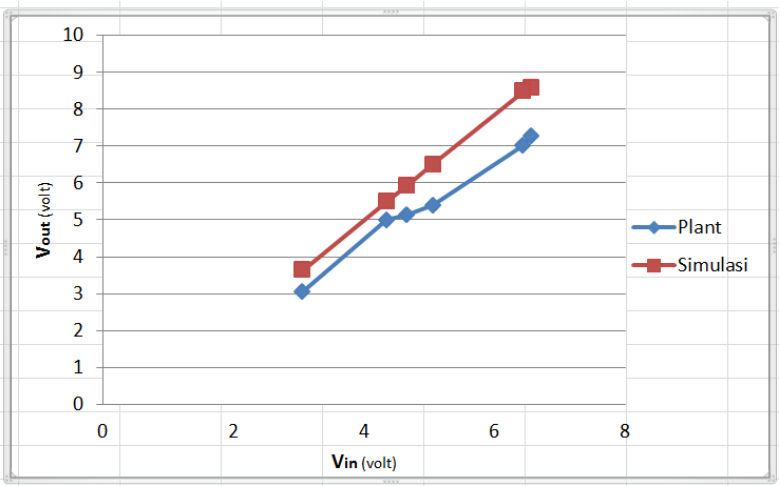
4.3 Hasil Perbandingan Uji Real Plant dengan Simulasi Pada *Buck-Boost Converter*

Dari data simulasi dan real plant yang telah diperoleh, dapat dianalisa dengan membandingkan hasil tegangan keluaran plant dan simulasi dari V_{in} dan *duty cycle* yang sama yang dapat dilihat pada tabel 4.16 berikut

Tabel 4.16 Hasil Pengujian *Buck-Boost Converter*

RPM	Duty cycle	Vin	Vout plant	Vout simulasi
133	55	6,55	7,27	8,58
129	55	6,43	7,02	8,48
109	55	5,05	5,39	6,50
105	55	4,65	5,14	5,93
85	55	4,34	4,99	5,48
68	55	3,05	3,05	3,64

Tabel 4.16 menunjukkan bahwa tegangan keluaran dari buck-boost converter dipengaruhi oleh tegangan input yang dari keluaran generator dan duty cycle.



Gambar 4.9 Grafik Pengujian Buck-Boost Converter

Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan nilai pengukuran tegangan pada real plant dan simulasi. Nilai tegangan keluaran pada simulasi lebih tinggi dari real plant. Hal ini dikarenakan simulasi sifatnya ideal, kalau real plant terjadi rugi tegangan (drop voltage) yang disebabkan karena adanya tahanan jenis pada setiap komponen, seperti elemen semikonduktor pada mosfet. Ketika mosfet saat kondisi konduksi atau pada saat terdapat aliran arus maka akan menyebabkan terjadinya rugi-rugi tegangan keluaran dari rangkaian *buck-boost converter.*

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dalam tugas akhir ini antara lain, adalah :

- Nilai *duty cycle* berpengaruh terhadap nilai tegangan keluaran dari rangkaian *buck-boost converter*. Saat rpm 400 diberi duty cycle 20% tegangan outputnya 5.98 volt, saat duty cycle 70 % tegangan outputnya 18,09 volt.
- Parameter PID hasil penalaan dengan algoritma PSO adalah Kp=7,60, Ki=0,66, Kd = 0,56

5.2 Saran

Adapun saran yang diberikan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- pemilihan komponen untuk rangkaian *buck-boost converter* sebaiknya dengan kualitas yang baik

DAFTAR PUSTAKA

[1] Jha, A. K., Fernandes, B.G., Kishore, A., "A Single Phase Single Stage AC / DC Converter with High Input Power Factor and Tight Output Voltage Regulation," Progress in Electromagnetics Research Symposium Cambridge – USA, 2006.

[2] Ejury, J., "Buck Converter Design", Infineon Technologies North America, 2013.

[3] Marcelo, D. P. Nascimento, C. B. Angelo, M. T. Mauricio, S.,"Performance comparison between nonlinear and linear controllers with weighted adaptive kontrol applied to a Buck converter using poles placement design. Industrial Electronics (ISIE)," IEEE International Symposium. Pages: 1 - 6, DOI: 10.1109/ISIE, 2013.

[4] Guo, L. Hung, J. Y. and Nelms, R. M., "Evaluation of DSP-based PID and Based fuzzy controllers for DC-DC converters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 6, pp. 22370–2248, 2009.

[5] El Beid, S. Doubabi, S., "DSP-Based Implementation Of Fuzzy Output Tracking Kontrol For A Boost Converter," IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 61, NO. 1, 2014.

[6] Kusumadewi, S. Purnomo, H., "Aplikasi Logika Fuzzy untuk pendukung keputusan," Jakarta: Graha Ilmu, 2004.

[7] Sutrisna, Fendi. "Sekilas Mengenai DC-DC converter". 2 September 2011. https://indone5ia.wordpress.com/2011/09/02/sekilas-mengenai-konverter-dc-dc

[8] Rasyid, M., "Power Electronic 3rd edition," Oxford: Elsevier Inc, 2011.

[9] Gowda, M., "Modelling of Buck DC-DC Converter Using Simulink," International Journal of Innovative Research in Science, Mandya, Karnataka, India, 2014.
[10] Product family data sheet Cree® XLamp® XM-L LEDs, Cree. Inc, 2015.
[11] Ding, B., Luo, X., Wei, S., "A survey on stability research of discretetime Takagi-Sugeno fuzzy kontrol systems," 8th IEEE International Conference on Kontrol and Automation, 2010.
[12] Gunterus, F., "Pengenalan Metode Ziegler-Nichols pada Perancangan Controller pada PID," Jakarta : PT. Elex Media Komputindo, 1994.
[13] El Beid, S. Doubabi, S., "Self-scheduled fuzzy kontrol of PWM DC-DC converters," in Proc. IEEE 18th Mediterranean Conf Control Autom, 2010.
[14] Monhaziz, Hade L. 2009. "Rancang Bangun Buck Converter Pada Turbin Angin **B**erbasis Mikrokontroler AVR ATMega8535
[15] Kurniawan, Deva R. 2009. "Rancang Bangun DC to AC Pada Daya Tersimpan Dalam Sebuah Aki Menggunakan Sistem Dual Flip-flop".

LAMPIRAN A
Coding PSO Di Matlab

Berikut adalah coding pso yang digunakan untuk mencari nilai Kp, Ki, Kd terbaik pada Simulink matlab.

```
clc;
clear;
close all;

%% PROBLEM DEFINITION
% CostFunction = @(x) ObjFunction(x);
nVar = 3;
VarSize = [1 nVar];
% VarMin = 0;
% VarMax = 0.0143585552019731;
kp_max = 8;
kp_min = 0;
ki_max = 0.7;
ki_min = 0;
kd_max = 0.6;
kd_min = 0;

%% PARAMETER
maxIt =10;
nPop = 5;
w = 0.7;
wdamp = 0.99;
C1 = 2;
C2 = 2;

%% INITIALIZATION
empty_particle.Position = [];
empty_particle.Velocity = [];
empty_particle.Cost = [];
```

```
empty_particle.Best.Position = [];
empty_particle.Best.Cost = [];

GlobalBest.Cost = inf;

 %Create Population Array
 particle = repmat(empty_particle, nPop, 1);

 %Initialize Population Members

 for i=1:nPop
    %Generate Random Solution
    particle(i).Position(1) = unifrnd(kp_min, kp_max);
    particle(i).Position(2) = unifrnd(ki_min, ki_max);
    particle(i).Position(3) = unifrnd(kd_min, kd_max);
    %Initialize Velocity
    particle(i).Velocity = zeros(VarSize);

    %Evaluation
    %particle(i).Cost = CostFunction(particle(i).Position);
   kp_pso = (particle(i).Position(1));
   ki_pso = (particle(i).Position(2));
   kd_pso = (particle(i).Position(3));
   sim('faiz')
   r=simout.Data;
   IAE = r(end);
   particle(i).Cost=IAE;

    %Update The Personal Best
    particle(i).Best.Position = particle(i).Position;
    particle(i).Best.Cost = particle(i).Cost;

    %Update The Global Best
    if particle(i).Best.Cost < GlobalBest.Cost
       GlobalBest = particle(i).Best;
```

```
    end
end
%Array to Hold the Best Value on Each Iteration
BestCosts = zeros(maxIt,1);

%% Main Loop of PSO
for it=1:maxIt
    for i=1:nPop
        particle(i).Velocity = w*particle(i).Velocity...
            +                C1*rand(VarSize).*(particle(i).Best.Position-
        particle(i).Position)...
            +                    C2*rand(VarSize).*(GlobalBest.Position-
        particle(i).Position);
        if particle(i).Position(1) > 50
            particle(i).Velocity = [0 0 0];
        end
        particle(i).Position = particle(i).Position + particle(i).Velocity;
        %particle(i).Cost = CostFunction(particle(i).Position);
        if (particle(i).Position(1)) > kp_max
            particle(i).Position(1) = kp_max;
        else
            if(particle(i).Position(1)) < kp_min
            particle(i).Position(1) = kp_min;
            end
        end
        kp_pso = particle(i).Position(1);

        if (particle(i).Position(2)) > ki_max
            particle(i).Position(2) = ki_max;
        else
            if(particle(i).Position(2)) < ki_min
            particle(i).Position(2) = ki_min;
            end
        end
```

```
        ki_pso = particle(i).Position(2);

        if (particle(i).Position(3)) > kd_max
            particle(i).Position(3) = kd_max;
        else
            if(particle(i).Position(3)) < kd_min
            particle(i).Position(3) = kd_min;
            end
        end
        kd_pso = particle(i).Position(3);

        sim('faiz')
        r=simout.Data;
        IAE = r(end);
        particle(i).Cost=IAE;
        if particle(i).Cost < particle(i).Best.Cost
            particle(i).Best.Position = particle(i).Position;
            particle(i).Best.Cost = particle(i).Cost;

            if particle(i).Best.Cost < GlobalBest.Cost
                GlobalBest = particle(i).Best;
            end

        end

    end
    BestCost(it) = GlobalBest.Cost;
    %disp(['Iteration ' num2str(it) ' : Best Cost = '
      num2str(BestCost(it))]);
    w = w * wdamp;
end
```

LAMPIRAN B
Coding Keseluruhan Sistem Turbin Angin Di Arduino

Berikut adalah coding plant turbin angin secara keseluruhan pada arduino.

```
#include <PWM.h>

int jumlah1,jumlah2,jumlah3,jumlah4;
float rata1,rata2,rata3,rata4;
float i_in,i_out;
float v_in;
float v_out;
float p_in;
float p_out;
int baca_inV[50],baca_inI[50],baca_outV[50],baca_outI[50],a;
float P=0;
float I=0;
float D=0;
double pid;
float error;
float Kp=8;
float Ki=0.7;
float Kd=0.6;
float lastTegangan;
float lastProses;
float deltaTime=(millis()-lastProses)/1000;
unsigned long lastTime;
unsigned long now =millis();
int32_t frequency = 28000;
int duty;
int Rpwm;
int Setpoint;

//////////////////RPM////////////////////////////
```

```
float sper = 0;
float sper1 = 0;
int hitung = 0;
int hitung1 = 0;
int rpm_tur = 0;
int rpm_genr = 0;
unsigned long lastmillis = 0;

void bacaSensor(){
 ////////////////input//////////////////
 jumlah1=0;
 for(a=0;a<50;a++){
 baca_inV[a]=analogRead(A0);
 jumlah1=jumlah1+baca_inV[a];
 }
 rata1=((float)jumlah1)/50;
 v_in=abs(rata1*0.0009775)*50;

 jumlah2=0;
 for(a=0;a<50;a++){
 baca_inI[a]=analogRead(A3);
 jumlah2=jumlah2+baca_inI[a];
 }
 rata2=((float)jumlah2)/50;
 i_in=abs(rata2/1023);

  //p_in=v_in*i_in;
 ////////////////////output///////////////
 jumlah3=0;
 for(a=0;a<50;a++){
 baca_outV[a]=analogRead(A4);
 jumlah3=jumlah3+baca_outV[a];
 }
 rata3=((float)jumlah3)/50;
 v_out=abs((rata3/1024)*(100));
```

```
  jumlah4=0;
  for(a=0;a<50;a++){
  baca_outI[a]=analogRead(A5);
  jumlah4=jumlah4+baca_outI[a];
   }
  rata4=((float)jumlah4)/50;
  i_out=abs(((rata4*0.004887)-2.498)/0.185);

  p_in=v_in+i_in;
  p_out=v_out+i_out;
}

void rpm_turbin(){
  hitung++;
 }

 void rpm_gen(){
  hitung1++;
 }

void bacaE(){
Setpoint=13;
error= Setpoint-v_out;
}

void put_rpm(){
  if (millis() - lastmillis >= 3000){
    detachInterrupt(0);
    detachInterrupt(1);
    sper=(hitung/3);
    sper1=(hitung1/3);
    rpm_tur = (sper*60)/72;
    rpm_genr = (sper1*60)/72;
```

```
   hitung = 0;
   hitung1 = 0;
   lastmillis = millis();
   attachInterrupt(0, rpm_turbin, FALLING);
   attachInterrupt(1, rpm_gen, FALLING);
  }
}

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  InitTimersSafe();
  bool success = SetPinFrequencySafe(11, frequency);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
put_rpm();
bacaSensor();
bacaE();
P=Kp*error;
I=(error*Ki)*(deltaTime/1000);
D=(lastTegangan-v_out)*Kd*deltaTime;
pid=P+I+D;
if(pid>=0){duty=map(pid, 0, 104, 50, 75);}else
if(pid<0){duty=map(pid, -1, -104.25, 49, 10);}
Rpwm=(duty*0.01)*255;

pwmWrite(11,Rpwm);

Serial.print("RPMgen=\t");
 Serial.print(rpm_genr);
 Serial.print("\t V_in=\t");
 Serial.print(v_in);
 Serial.print("\t I_in=\t");
```

```
 Serial.print(i_in);

 Serial.print("\t P_in=\t");
 Serial.print(p_in);
 Serial.print("\t V_out=\t");
 Serial.print(v_out);
 Serial.print("\t I_out=\t");
 Serial.print(i_out);
 Serial.print("\t P_out=\t");
 Serial.print(p_out);
 Serial.print("\t duty=\t");
 Serial.print(duty);
 Serial.print("\t pid=\t");
 Serial.print(pid);
 Serial.print("\t error=\t");
 Serial.println(error);

}
```

LAMPIRAN C
PERHITUNGAN KETIDAKPASTIAN REGRESI

range ukur	x	X linier	y	x*y	x^2	y reg	R=y-yreg	R^2
2.4	56.0	55.7	-0.3	-14.1	3136.0	0.9	-1.1	1.3
2.6	71.0	63.3	-7.7	-547.6	5041.0	0.7	-8.4	70.3
2.9	75.0	74.6	-0.4	-30.3	5625.0	0.6	-1.0	1.0
3.5	94.0	97.2	3.2	302.2	8836.0	0.4	2.9	8.2
3.8	98.0	108.5	10.5	1031.3	9604.0	0.3	10.2	104.5
4.2	124.0	123.6	-0.4	-49.3	15376.0	-0.1	-0.3	0.1
4.4	133.0	131.1	-1.9	-247.1	17689.0	-0.2	-1.7	2.8
4.6	138.0	138.7	0.7	94.0	19044.0	-0.3	0.9	0.9
4.9	145.0	150.0	5.0	723.6	21025.0	-0.3	5.3	28.5
5.1	158.0	157.5	-0.5	-74.3	24964.0	-0.5	0.1	0.0
5.3	170.0	165.1	-4.9	-838.3	28900.0	-0.7	-4.2	18.0
5.5	176.0	172.6	-3.4	-596.9	30976.0	-0.8	-2.6	6.9
jumlah	1438.0	1438.0	0.0	-246.8	190216.0			
Rata	119.8	119.8	0.0	-20.6	15851.3			
a	-0.014							
b	1.646							
Ua2	4.924							

Dimana : X=RPM terukur
Y =Error

Persamaan selisih
$y_i = \omega_i - x_i$

Persamaan regresi linier (y_{reg}):

$y_{reg} = a + b(x_i)$

dengan :

$$b = \frac{n\sum(x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{n\sum(x^2) - \left(\sum x\right)^2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

$y_{reg} = 1{,}646 - 0{,}014x_i$

Persamaan residu

$R = y_i - y_{reg}$

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A2}) :

$$U_{A2} = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}}$$

U_{A2} = 4,924 RPM