Tesis – TF142510

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PENGENDALI KECEPATAN PUTAR ROTOR BERBASIS LOGIKA FUZZY-PI UNTUK MENCEGAH KEGAGALAN SISTEM GENERATOR PADA TURBIN ANGIN SKALA KECIL

ALEX TAUFIQURROHMAN ZAIN
NRP. 02311650010002

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA INSTRUMENTASI INDUSTRI
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Alex Taufiqurrohman Zain
NRP. 02311650010002

Tanggal Ujian : 16 Juli 2018

Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh:

1. **Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.**
   NIP. 19600901 198701 1 001 **(Pembimbing)**

2. **Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.**
   NIP. 19660116 198903 2 001 **(Penguji)**

3. **Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.**
   NIP. 19761006 199903 1 002 **(Penguji)**

Dekan Fakultas Teknologi Industri,

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

NIP. 19690507 199512 1 001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PENGENDALI KECEPATAN PUTAR ROTOR BERBASIS LOGIKA FUZZY-PI UNTUK MENCEGAH KEGAGALAN SISTEM GENERATOR PADA TURBIN ANGIN SKALA KECIL

Nama Mahasiswa : Alex Taufiqurrohman Zain
NRP : 02311650010002
Pembimbing : Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.

ABSTRAK

Konsumsi energi menggunakan sumber energi terbarukan sudah berkembang, salah satunya tenaga angin. *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) merupakan jenis turbin angin yang dapat digunakan pada daerah dengan kecepatan angin rendah maupun tinggi. HAWT dengan dua atau tiga buah bilah sering digunakan karena memiliki putaran rotor tinggi. Sistem pengendali merupakan faktor penting dalam meningkatkan konversi energi angin menjadi energi listrik. Sistem pengereman rotor diperlukan agar putaran turbin angin tetap pada kecepatan nominalnya untuk mencegah kegagalan sistem generator. Penelitian ini bertujuan untuk: (a) mengetahui pengaruh variasi jumlah masukan kendali logika *fuzzy* terhadap tanggapan sistem pengendali putaran rotor turbin angin, (b) mengetahui perbandingan antara sinyal respon dari sistem pengendali PI terhadap sinyal respon dari sistem pengendali PI dengan *tuning* Logika Fuzzy. Mekanisme pengereman yang dikembangkan adalah menggunakan sistem pengereman mekanik menggunakan putaran motor stepper yang telah dihubungkan dengan kaliper. Hasil percobaan menunjukkan bahwa sistem pengendali Fuzzy-PI memberikan respon yang lebih baik dibandingkan sistem pengendali PI. Parameter pengendali PI yang didapatkan dari hasil perhitungan adalah Kp = - 0,02 dan Ki = - 0,005803. Logika Fuzzy dengan dua input memberikan sinyal tanggapan yang lebih baik dibandingkan dengan Logika Fuzzy dengan satu input. Respon sistem pengendali pada keadaan tunak telah mampu mencapai nilai set point dengan nilai *error steady state* di bawah 5%. Pencapaian tersebut menunjukkan bahwa sistem pengendali kecepatan putar rotor dapat diimplementasikan turbin angin untuk mencegah kegagalan sistem generator.

Kata Kunci: *horizontal axis wind turbine*, pengendali Fuzzy-PI, motor stepper.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ROTATION SPEED CONTROLLER OF ROTOR USING FUZZY LOGIC-PI TO PREVENT THE GENERATOR SYSTEM FAILURE ON SMALL-SCALE WIND TURBINE

Student's Name : Alex Taufiqurrohman Zain
Student's Number : 02311650010002
Supervisor : Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.

ABSTRACT

Energy consumption using renewable energy sources has developed, one of it is wind power. Horizontal Axis Wind Turbine (was HAWT) is a type of wind turbine that can be used in areas with low or high wind speeds. HAWT with two or three blades is often used because it has a high rotation of the rotor. Control system is an important factor in improving the conversion of wind energy into electrical energy. The rotor braking system required for the rotation of wind turbine to meet the set point to prevent generator system failure. This research aims to know: (a) the effect of input variation amount on fuzzy logic control system against the response of rotation speed controller in wind turbine rotor, (b) the comparation between the signal response of PI controller system against signal response of PI controller system using Fuzzy Logic tuning. Desired braking mechanism is mechanical braking system using a stepper motor rotation which is coupled with the caliper. The experiment results show that the Fuzzy-PI control system provides a better response than the PI control system. PI controller parameters which is obtained from the calculation result is Kp =-0.02 and Ki =-0.005803. Fuzzy logic input with two signal has better response than Fuzzy logic with a single input. Response control system at steady state has been able to achieve the set point value with the value error steady state below 5%. The result indicates that rotational speed control system of rotor can be implemented to prevent failure of the wind turbine generator system.

Keywords: horizontal axis wind turbine, Fuzzy-PI controller, stepper motor.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Energi baru terbarukan (EBT) merupakan salah satu bidang yang mengalami perkembangan yang sangat pesat. Pemerintah melalui PP No. 79 tahun 2014 telah mengatur perkembangan energi baru dan terbarukan. PP tersebut juga berisi target capaian energi terbarukan jangka panjang. Target tersebut ditujukan berkaitan dengan semakin berkurangnya cadangan energi fosil terutama minyak dan gas bumi serta polutan-polutan yang semakin mencemari lingkungan. Peresmian 'Kebun Angin' di Kabupaten Sidrap, Sulawesi Selatan merupakan salah satu komitmen pemerintah dalam mengembangkan teknologi EBT.

Turbin angin merupakan salah satu bentuk mesin konversi energi. Turbin angin mampu mengkonversi energi angin menjadi energi listrik. Meskipun mengalami perkembangan yang pesat, teknologi pada turbin angin masih memiliki kendala. Salah satu kendala pada turbin angin adalah kecepatan putar rotor yang bervariasi akibat dari kecepatan angin yang fluktuatif. Kecepatan angin yang rendah tidak akan memberikan gangguan pada turbin angin. Namun, beberapa masalah akan timbul ketika kecepatan putar rotor berlebih sebagai akibat dari kecepatan angin yang tinggi. Kerusakan mekanik pada rotor, *drive train* serta kegagalan sistem generator merupakan beberapa akibat dari berlebihnya kecepatan putar rotor tersebut. Tesis ini bertujuan untuk memperkecil kemungkinan adanya kerusakan tersebut melalui pembatasan kecepatan putar rotor. Dua buah mode kendali digunakan yang selanjutnya akan dibandingkan untuk mengetahui mode kendali yang paling baik digunakan.

Surabaya, 16 Juli 2018
Alex Taufiqurrohman Zain

Halaman ini sengaja dikosongkan

UCAPAN TERIMAKASIH

Puji dan syukur ke hadirat Allah SWT atas kasih karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul "Perancangan dan Implementasi Pengendali Kecepatan Putar Rotor Berbasis Logika Fuzzy-PI untuk Mencegah Kegagalan Sistem Generator pada Turbin Angin Skala Kecil". Tesis tersebut dimaksudkan untuk memenuhi salah satu syarat guna meraih gelar magister teknik (S2).

Tesis ini merupakan hasil penelitian yang telah penulis selesaikan selama menempuh studi pada program Magister di Depertemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Terselesaikannya tulisan ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu baik dalam proses penelitian maupun selama penulisan. Ucapan terima kasih ini disampaikan kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc., selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, koreksi dan motivasi selama penyusunan tesis ini serta atas ilmu yang diberikan selama masa studi. Teriring rasa hormat serta apresiasi dan do'a, semoga Allah SWT yang akan memberikan ganjaran.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T., Bapak Dr. Imam Abadi, S.T., M.T., , selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktu untuk memberikan evaluasi, koreksi dan masukan yang sangat bermanfaat pada proses penyempurnaan tesis ini. Semoga Allah SWT jua yang akan memberikan ganjaran.
3. Bapak/ Ibu dosen Program Studi Pascasarjana Teknik Fisika (PSMTF) yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas ilmu yang telah disampaikan selama masa studi magister.
4. Kedua orang tua (Hj. Zaimatus Sholihah, S.Pd. dan H. Mustain, S.Pd.I.), Adik-adik (Arini Fitria Zain dan Amalia Azizah Zain), dan seluruh keluarga di Jombang serta khusus untuk Nenek tercinta, Mbah Cholifah (Alm.) atas

kepercayaan, kesabaran, dukungan moril dan materi serta semangat yang tak pernah berhenti sehingga menjadi kekuatanku selama menyelesaikan studi magister dan tesis ini.

5. Mela Yunita, S.E., M.Si., yang telah sabar dan setia dalam menemani, memberikan semangat dan motivasi untuk penulis.
6. Teman-teman satu perjuangan PSMTF untuk keceriaan dan kenangan serta telah menjadi bagian dalam perjalanan studi ini.
7. Rekan-rekan satu penelitian turbin angin Khamim, Haris, Aris dan Faiz atas bantuan dan kerjasamanya.
8. Teman-teman ruang kaca, Mas Wildan, Brian, Nyoman, Mas Iwan, Mas Wafi dan Mas Kholid, atas banyaknya forum dan diskusi yang telah dilaksanakan.
9. Staf akademik dan administrasi PSMTF, atas bantuannya dalam mengurus keperluan akademik dan administrasi selama penulis melaksanakan studi.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Ibarat tiada gading yang tak retak, penulis menyadari bahwa dalam tesis ini masih terdapat banyak kekurangan. Dengan segala kerendahan hati, masukan berupa kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata, penulis berharap semoga tesis ini menjadi sumbangan pemikiran dan memberikan manfaat bagi pembaca serta perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang Teknik Fisika. Aamiin...

Surabaya, 16 Juli 2018

Alex Taufiqurrohman Zain

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN ..... **i**
ABSTRAK ..... **iii**
ABSTRACT ..... **v**
KATA PENGANTAR ..... **vii**
UCAPAN TERIMAKASIH ..... **ix**
DAFTAR ISI ..... **xi**
DAFTAR GAMBAR ..... **xiii**
DAFTAR TABEL ..... **xv**
BAB 1 PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Manfaat Penelitian 3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI **5**
2.1 Turbin Angin 5
2.2 *Drive Train* 9
2.3 Alternator Listrik 11
2.4 Mikrokontroler Arduino Mega 13
2.5 Rotary Encoder 15
2.6 Motor Stepper 16
2.7 Sistem Pengendali 17
2.7.1 Logika Fuzzy 18
2.7.2 Proporsional-Integral 19
2.8 *Review* Sistem Pengendali 22
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN **25**
3.1 Diagram Alir Penelitian 25
3.2 *Prototype* Turbin Angin 26
3.3 Mekanisme Pengereman 27

3.4 Pengambilan Data Kecepatan Angin 30
3.5 Perancangan Sistem Pengendali 32
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 43
4.1 Hasil Uji Sensor Optocoupler 43
4.2 Hasil Uji Sensor Anemometer 47
4.3 Hasil Pengujian Karakteristik Motor Stepper 49
4.3.1 Continous Run 50
4.3.2 Pulse Count Run 51
4.3.3 Brake 51
4.3.4 Stop 51
4.4 Hasil Perhitungan *Coefficient Power* (Cp) 51
4.5 Simulasi Sistem Pengendali PI dan Fuzzy-PI 53
4.5.1 Sistem *Open Loop* 53
4.5.2 Perbandingan Variasi Masukan Logika Fuzzy pada Sistem Pengendali Fuzzy-PI 55
4.5.3 Perbandingan Sistem Pengendali PI dan Fuzzy-PI 56
4.6 Penerapan Sistem Pengendali Putaran Rotor pada Turbin Angin 58
4.6.1 Pengukuran Kecepatan Angin dan Kecepatan Putar Rotor 58
4.6.2 Penerapan Sistem Pengendali PI dan Fuzzy-PI pada Turbin Angin 59
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN 67
5.1 Kesimpulan 67
5.2 Saran 68
DAFTAR PUSTAKA 69
LAMPIRAN
BIOGRAFI

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Aliran Angin pada Turbin Angin 6
Gambar 2.2 *Drive Train* pada Turbin Angin 9
Gambar 2.3 Skema *Drive Train* untuk Pemodelan Turbin Angin 10
Gambar 2.4 Karakteristrik Arus terhadap Kecepatan Putar Alternator 12
Gambar 2.5 Rangkaian Komponen pada Alternator 12
Gambar 2.6 Sistem Rotary Encoder 15
Gambar 2.7 Ilustrasi Prinsip Kerja Motor Stepper 16
Gambar 2.8 Pengendali Motor Stepper dengan *H-Bridge* 17
Gambar 2.9 Bagian Fungsi Keanggotaan 19
Gambar 2.10 Blok Diagram Sistem Pengendali PI 20
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian 25
Gambar 3.2 (a) Motor Stepper Unipolar (b) Rangkaian Wiring Motor Stepper... 27
Gambar 3.3 (a) Modul Driver Motor Stepper (b) Tata Letak Komponen 28
Gambar 3.4 Skema Sumber Angin terhadap Turbin Angin..... 31
Gambar 3.5 Diagram Blok Sistem Pengendali Fuzzy-PI dengan Dua Variabel *Input* pada Logika Fuzzy 32
Gambar 3.6 Diagram Blok Sistem Pengendali Fuzzy-PI dengan Satu Variabel *Input* pada Logika Fuzzy 33
Gambar 3.7 Fungsi Keanggotaan Variabel Error..... 34
Gambar 3.8 Fungsi Keanggotaan Variabel Deltaerror..... 34
Gambar 3.9 Fungsi Keanggotaan Variabel Kp 35
Gambar 3.10 Fungsi Keanggotaan Variabel Ki 36
Gambar 3.11 Grafik Perbandingan Hasil Tanggapan Sistem Pengendali Fuzzy-PI dengan Variasi *Rule Base*. 37
Gambar 3.12 Diagram Blok *Open Loop System* pada Simulasi..... 39
Gambar 3.13 Diagram Blok Sistem Pengendali PI pada Simulasi 40
Gambar 3.14 Diagram Blok Sistem Pengendali Fuzzy-PI pada Simulasi 41
Gambar 4.1 Grafik Hasil Uji Linieritas Sensor Optocoupler..... 45
Gambar 4.2 Grafik Hasil Uji Linieritas Sensor Anemometer..... 48

Gambar 4.3 Grafik Hubungan antara Pulsa terhadap Perubahan Step dari Motor Stepper 49
Gambar 4.4 Grafik Hubungan antara Pulsa terhadap Kecepatan Step dari Motor Stepper 50
Gambar 4.5 Tanggapan Sistem Open Loop 54
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Hasil Tanggapan Sistem *Close Loop* Fuzzy-PI dengan Variasi *Input* ketika (a) *set point* 100 RPM dan (b) *set point* 75 RPM 55
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Hasil Tanggapan *Sistem Close* Loop PI dan Fuzzy-PI ketika (a) *set point* 100 RPM dan (b) *set point* 75 RPM .. 57
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Hasil Tanggapan Fuzzy-PI dan PI pada *set point* 100 RPM (a) ketika keadaan transien (b) ketika keadaan tunak. 60
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Hasil Tanggapan Fuzzy-PI dan PI pada *set point* 75 RPM (a) ketika keadaan transien (b) ketika keadaan tunak. 61

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Arduino Mega 14
Tabel 2.2 Review Sistem Pengendali Putaran Kecepatan Rotor..... 22
Tabel 3.1 Spesifikasi Turbin Angin 26
Tabel 3.2 Spesifikasi Motor Stepper 28
Tabel 3.3 Spesifikasi Modul Driver 29
Tabel 3.4 Pengaturan Sambungan *Port Interface* (J2) 29
Tabel 3.5 Pengaturan Sambungan *Port* Motor Stepper (J3) 30
Tabel 3.6 Pengujian Pengaruh Kecepatan Angin terhadap Kecepatan Putar Rotor 31
Tabel 3.7 Daftar *Rule Base* untuk Parameter *Kp* 36
Tabel 3.8 Daftar *Rule Base* untuk Parameter *Ki* 37
Tabel 3.9 Karakteristik Kinerja dari Sistem Pengendalian 38
Tabel 3.10 Daftar *Rule Base* untuk Parameter *Kp* 38
Tabel 3.11 Daftar *Rule Base* untuk Parameter Ki 38
Tabel 4.1 Hasil Uji Sensor Optocoupler 43
Tabel 4.2 Hasil Uji Sensor Anemometer 47
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan *Coefficient Power* (*Cp*)..... 52
Tabel 4.4 Karakteristik Kinerja Sistem Pengendali Fuzzy-PI dengan Variasi *Input* Logika 56
Tabel 4.5 Karakteristik Kinerja Sistem Pengendali PI dan Fuzzy-PI pada Simulasi 57
Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Kecepatan Angin dan Kecepatan Putar Rotor 58
Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Kecepatan Angin pada *Blower* 59
Tabel 4.8 Karakteristik Kinerja Sistem Pengendali pada *Plant* Turbin Angin ketika *set point* 100 RPM 60
Tabel 4.9 Karakteristik Kinerja Sistem Pengendali pada *Plant* Turbin Angin ketika *set point* 75 RPM 62
Tabel 4.10 Sinyal Tanggapan pada Keadaan Tunak ketika *set point* 100 RPM ... 63
Tabel 4.11 Sinyal Tanggapan pada Keadaan Tunak ketika *set point* 75 RPM 64

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi merupakan sumber daya alam yang memiliki peranan penting dalam mendukung kegiatan perekonomian yang keberlanjutan. Mengingat polusi yang dihasilkan oleh sumber energi konvensional semakin mengancam keberlanjutan ekosistem di Bumi, penelitian untuk mengembangkan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan mulai dikembangkan (Kushartanto, 2015). Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial dikembangkan di Indonesia adalah energi angin namun demikian, penerapan teknologi tersebut masih rendah. Total pembangkit listrik energi angin yang terpasang di Indonesia sekitar 1,6 MW pada skala non-komersial. Proyek penelitian dan pengembangan mengenai sistem energi angin biasanya diterapkan di daerah atau pulau-pulau terpencil (Martosaputro & Murti, 2014).

Indonesia merupakan salah satu negara beriklim tropis dengan kecepatan angin khususnya di Jawa Timur termasuk dalam kategori menengah dengan rata-rata per tahun sekitar 2-5 m/s. Informasi mengenai kecepatan angin tersebut merupakan hal penting karena akan mempengaruhi teknologi baik desain maupun sistem pengendali untuk menghasilkan listrik yang optimal (Martosaputro & Murti, 2014). Turbin angin tipe HAWT merupakan turbin angin yang dapat digunakan pada daerah dengan kecepatan angin rendah maupun tinggi. Turbin angin dengan dua atau tiga buah bilah sering digunakan untuk pembangkit tenaga listrik. Pemilihan jumlah bilah tersebut adalah untuk mendapatkan ekstraksi energi angin yang optimal. Turbin angin tersebut memiliki putaran rotor tinggi meskipun mempunyai torsi yang relatif kecil. Turbin angin sumbu horizontal modern untuk skala kecil terdiri dari dua atau tiga buah bilah dengan diameter antara 1 m – 3 m.

Strategi pengendali memainkan peran utama pada sistem konversi energi angin. Sistem pengendali turbin angin akan mengoptimalkan ekstraksi energi angin

yang digunakan untuk menggerakkan rotor, serta konversi dari energi listrik yang dihasilkan (Bianchi *et. al.*, 2006). Optimisasi tersebut dapat dilakukan dengan menghindari adanya transien pada komponen turbin terutama pada *drive train*. Putaran rotor juga akan mengalami peningkatan jika kecepatan angin berlebih. Ketika kecepatan turbin mulai melebihi batas maksimum yang sudah diatur maka pengendali *braking system* mulai aktif. Sistem pengendali digunakan untuk menjaga kecepatan turbin angin pada kondisi yang sudah ditentukan agar tidak terjadi kerusakan pada mekanisme *drivetrain* pada generator serta tidak menghasilkan daya yang berlebih. Berdasarkan hal tersebut maka pengendali putaran rotor perlu dilakukan agar *supply* daya listrik stabil (Rajendran & Jena, 2014).

Simulasi yang dilakukan oleh Wang dan Stelson (2013) memberikan hasil yang kurang memuaskan ketika algoritma MPC digunakan untuk pengendali kecepatan putar rotor. Algoritma MPC memberikan respons yang cepat, namun *overshoot*-nya besar pada perubahan kecepatan angin kecil. Ketika perubahan kecepatan angin lebih besar algoritma MPC kehilangan kendali. Hasil simulasi yang dilakukan oleh Vidal *et. al.* (2012) serta Feng dan Sheng (2012) menunjukkan bahwa sistem pengendali PI mampu meningkatkan atau menurunkan produksi daya turbin angin tanpa membebani rotor dan bilah.

Penelitian yang dilakukan oleh Salomao *et. al.* (2012) menunjukkan bahwa kombinasi pengendali Logika Fuzzy-PI menghasilkan transisi pengendali yang *smooth* ketika terdapat variasi kecepatan angin. Logika Fuzzy dirancang untuk mendapatkan daya ekstraksi maksimal pada kecepatan angin rendah dan untuk membatasi ekstraksi daya pada *set point*-nya. Hasil penelitian menunjukkan algoritma kontrol Fuzzy-PI mampu mengatasi tingkat *noise* sedangkan algoritma FLC tidak menunjukkan respon yang memadai untuk *noise*. Perlu diketahui bahwa penelitian tersebut dilakukan secara simulasi menggunakan generator tipe *squirrel cage induction generator*.

Turbin angin pada kenyataannya menghasilkan daya listrik yang harus disimpan ke dalam baterai agar bisa digunakan pada saat tidak ada angin.

Berdasarkan hal tersebut maka diperlukan sistem pengendali *real plant* mengenai kecepatan putar rotor dengan menggunakan algoritma Logika Fuzzy-PI. *Road map* mengenai penelitian terdahulu dapat dilihat pada Bab 2.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan pada latar belakang, maka rumusan masalah yang akan diangkat pada penelitian ini adalah:

a. Bagaimana pengaruh variasi jumlah masukan kendali logika *fuzzy* terhadap tanggapan sistem pengendali putaran rotor turbin angin?
b. Bagaimana perbandingan antara sinyal respon dari sistem pengendali PI terhadap sinyal respon dari sistem pengendali PI dengan *tuning* Logika Fuzzy?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan yang ini dicapai dari penelitian ini adalah:

a. Memperoleh hasil pengaruh variasi jumlah masukan kendali logika *fuzzy* terhadap tanggapan sistem pengendali putaran rotor turbin angin.
b. Memperoleh hasil perbandingan antara sinyal respon dari sistem pengendali PI terhadap sinyal respon dari sistem pengendali PI dengan *tuning* Logika Fuzzy.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak terkait, sehingga memberikan nilai lebih pada penelitian yang dilakukan.

1. Manfaat Teoritis

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menambah referensi dan memperkaya khasanah ilmu pengetahuan di bidang teknik fisika khususnya pada bidang sistem pengendali.

2. Manfaat Praktis

Manfaat yang didapatkan dari penelitian ini adalah memberikan sumbangsih terhadap perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi berupa sistem pengendali

kecapatan putar rotor turbin angin. Sistem pengendali pada penelitian ini digunakan untuk memperbaiki kekurangan dari beberapa penelitian yang sebelumnya sudah dibuat. Sistem pengendali ini juga diharapkan mampu menambah referensi mengenai sistem pengendali *real plant*.

BAB 2
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab 2 akan menjelaskan pustaka serta teori tentang materi yang berkaitan dengan penelitian. Pembahasan tersebut diharapkan mampu mengarahkan pola berpikir dalam menemukan solusi permasalahan yang ada pada penelitian ini. Kajian pustaka dan dasar teori didapatkan dari beberapa referensi. Referensi yang digunakan tersebut berasal dari *text book*, *manual book* serta jurnal penelitian ilmiah yang telah sudah dipublikasikan.

2.1 Turbin Angin

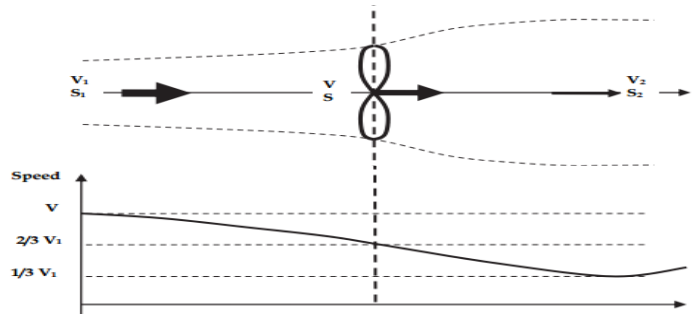
Tenaga angin dan air merupakan sumber energi yang paling dimanfaatkan pada abad ketujuh belas dan delapan belas. Percobaan pertama pada kincir angin untuk menghasilkan energi listrik telah dilakukan pada akhir abad kesembilan belas. Penelitian tentang penggunaan kincir angin untuk menghasilkan energi listrik tidak mengalami perkembangan yan signifkan pada abad tersebut. Penelitian mengenai pemanfaatan sumber daya terbarukan dalam skala besar dilakukan akibat adanya krisis minyak internasional pada tahun 1972 (Petru, 2003).

Konsumsi energi menggunakan energi terbarukan sudah mulai berkembang pada saat ini. Tenaga angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berkembang dengan pesat (Martinez, 2007). Hal tersebut disebabkan oleh peningkatan permintaan energi di seluruh dunia dan masalah lingkungan. Pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan gas (seperti karbon dioksida) ke atmosfer bumi yang menyebabkan pemanasan global. Pembangkit listrik tenaga angin tidak bergantung pada bahan bakar fosil sehingga menghasilkan energi yang bersih. Tenaga angin menggambarkan proses penggunaan angin untuk menghasilkan energi mekanik yang selanjutnya membangkitkan energi listrik (Manyonge *et. al.*, 2012).

Turbin angin dapat dibedakan menjadi *vertical axis wind turbin*e (VAWT) dan *horizontal axis wind turbine* (HAWT) berdasarkan putaran arah rotornya. Tipe turbin angin HAWT dapat digunakan pada daerah yang memiliki kecepatan angin

rendah maupun tinggi. Turbin angin dengan dua atau tiga buah bilah sering digunakan untuk pembangkit tenaga listrik. Turbin angin tersebut memiliki putaran rotor tinggi meskipun mempunyai torsi yang relatif kecil. Turbin angin sumbu horizontal modern terdiri dari dua atau tiga buah bilah tipis dan memiliki desain soliditas yang rendah (Manyonge *et. al.*, 2012). Konfigurasi tersebut menghasilkan frekuensi optimal yang dibutuhkan generator, meminimalkan ukuran, dan berat *gearbox* atau transmisi lainnya, serta meningkatkan efisiensi (Ragheb & Adam, 2011).

Albert Betz (1919) mengemukakan bahwa tidak akan ada turbin angin yang dapat mengkonversi energi kinetik angin ke dalam bentuk energi yang menggerakkan rotor (kinetik) lebih dari 59,3%. Turbin angin mengubah energi dengan memperlambat angin, sehingga turbin angin yang memiliki efisiensi 100% haruslah memperlambat angin 100% pula (menghentikan angin). Bentuk baling-baling harus berupa lingkaran penuh untuk menghentikan angin. Namun, hal tersebut akan mengakibatkan tidak adanya energi kinetik yang dihasilkan. Pada kasus lainnya, jika turbin angin hanya memiliki satu bilah, angin hanya akan lewat sehingga akan mengurangi energi kinetik yang dihasilkan. Selain itu, *losses* pada turbin angin disebabkan oleh viskositas dan *pressure drag* pada bilah, serta *power losses* pada transmisi dan sistem kelistrikan (Ragheb & Adam, 2011).



Gambar 2.1 Aliran Angin pada Turbin Angin (Ragheb & Adam, 2011)

Adapun gaya angin yang mengenai bilah turbin angin adalah (Ragheb & Adam, 2011):

$$F = ma = m\frac{dV}{dt} = \dot{m}\Delta V \qquad (2.1)$$

Berdasarkan hukum konservasi massa $\dot{m} = \rho S_1 V_1 = \rho S V = \rho S_2 V_2$, serta $V_2 < V_1$ dan $S_2 > S_1$, maka:

$$F = \rho S V (V - V_2) \tag{2.2}$$

Daya yang dihasilkan adalah:

$$P = \frac{1}{2}\rho S V \left(V_1^{\,2} - V_2^{\,2}\right) = \frac{1}{2}\rho S V^2 \left(V_1 - V_2\right)$$

atau dapat dituliskan:

$$P_{ideal} = P_{\max} = \frac{16}{27}\frac{\rho}{2}\frac{\pi D^2}{4}V_1^{\,3} \tag{2.3}$$

dimana:

F	= Gaya angin (N)	Indeks	
P	= Daya turbin angin (Watt)	*1*	= Sebelum melewati bilah
$\dot{m}$	= *Mass flow rate* (kg/s)	*2*	= Setelah melewati bilah
ρ	= densitas angin (kg/m^3)		
S	= Luas sapuan angin ketika mengenai bilah (m^2)		
V	= Kecepatan angin ketika mengenai bilah (m/s)		

$^{16}/_{27}$ adalah bilangan Betz Limit. Pada turbin angin *real*, bilangan Betz Limit digantikan dengan koefisien daya ($Cp < 0{,}59$). Semakin besar nilai Cp maka akan semakin besar *power* yang dapat ditangkap oleh turbin angin.

Ada dua parameter yang diperlukan untuk menentukan efisiensi turbin angin. Parameter pertama adalah koefisien daya (Cp) yang merupakan perbandingan antara daya output turbin (Pm) dengan daya input turbin (P_{wt}). Secara matematis Cp dapat dituliskan sesuai persamaan 2.2 berikut.

$$C_p = c_1\left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4\right)e^{\frac{-c5}{\lambda i}} + c_6\lambda \tag{2.4}$$

Dimana:

Cp = Koefisien daya

β = Sudut baling-baling

c_1 s/d c_6 = Koefisien turbin

Koefisien c_1 hingga c_6 merepresentasikan diameter rotor, konstanta bahan turbin, besar sumbu rotor, rasio gardan kecepatan rendah, rasio gardan kecepatan tinggi dan tingkat kelenturan bahan, secara berurutan. Koefisien ini berbeda-beda besarannya untuk jenis turbin yang berlainan. (Ragheb & Adam, 2011).

Pada persamaan 2.4 terdapat nilai λ yang merupakan rasio kecepatan ujung (*Tip Speed Ratio*). Rasio ini merupakan perbandingan antara kecepatan putar poros turbin terhadap kecepatan angin. Secara matematis, nilai λ dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_m} \tag{2.5}$$

Dimana:

λ = *Tip speed ratio*

ω_r = Kecepatan poros rotor (rad/s)

V_m = Kecepatan angin (m/s)

Daya output mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin dapat dihitung menggunakan persamaan 2.6 berikut :

$$P_m = \frac{1}{2}\pi R^2 \rho C_p V_m^3 \tag{2.6}$$

selain daya, torsi mekanik dari turbin angin juga dapat dihitung menggunakan persamaan 2.7 (Irasari, 2011).

$$T_m = \frac{P_m}{\omega r} \tag{2.7}$$

Pada sistem operasi kecepatan tetap maka kecepatan turbin ω_r dijaga tetap. Sehingga, akibat dari kecepatan angin berubah – ubah, maka perbandingan kecepatan ujung dan koefisien dayanya pun akan ikut berubah. Karena karakteristik *Cp* yang hanya memiliki satu nilai maksimum pada nilai tertentu maka koefisien daya ini hanya akan bernilai maksimum pada satu nilai kecepatan angin (Ragheb & Adam, 2011).

2.2 *Drive Train*

Drive train adalah sistem mekanik yang menghubungkan turbin angin dengan generator. *Drive train* dipengaruhi oleh desain tiga subsistem yang terdiri dari rotor, *gearbox*, dan generator. Ketiga subsistem tersebut secara fisik terhubung menjadi sistem *drive train*. Hal ini menimbulkan *constrain* pada nilai masukan dan keluaran dari besaran-besaran subsistem. Berikut ini merupakan *constrain* dari subsistem tersebut (Sheng & Veers, 2011):

$$\Omega_{rotor} = \omega_{in.gearbox} \tag{2.8}$$

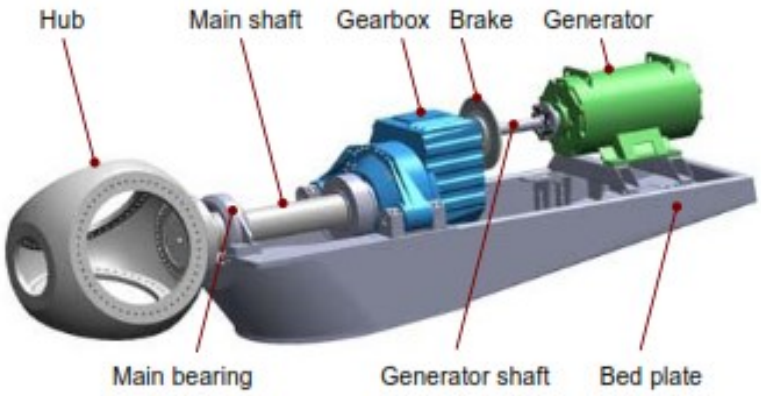
$$T_{rotor} = T_{in.gearbox} \tag{2.9}$$

$$\omega_{out.gearbox} = \omega_{in.generator} \tag{2.10}$$

$$T_{out.gearbox} = T_{in.generator} \tag{2.11}$$

Dimana:

T = Torsi
Ω = Kecepatan rotasi dari rotor
ω = Kecepatan rotasi dari gearbox dan generator



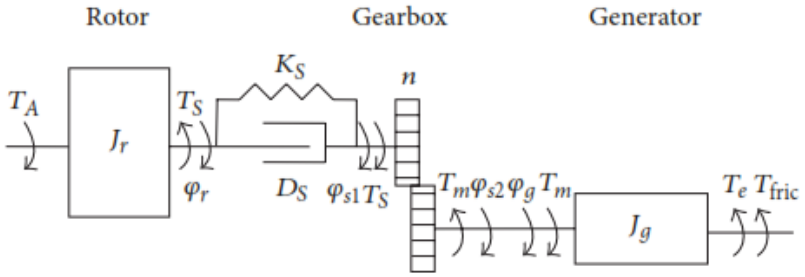
Gambar 2.2 *Drive Train* pada Turbin Angin (Sheng & Veers, 2011)

Turbin angin skala kecil telah dikembangkan untuk menghasilkan daya keluaran paling optimal pada kecepatan angin sekitar 10 m/s, 15m/s atau 20m/s. Pada umumnya sistem turbin angin terdiri dari empat bagian, yaitu sistem bilah dan pitch, sistem generator dan konverter, sistem mekanisme *drive train* serta sistem

pengendali. Pembatasan keluaran daya dalam kondisi kecepatan angin yang tinggi harus dilakukan pada turbin angin kecil. Jika pembatasan tersebut tidak dilakukan maka akan membebani rotor, serta terjadinya kegagalan sistem mekanik pada *drive train* dan sistem elektrik pada generator listriknya (Jackson *et. al.*, 2016).

Beban mekanik dan *stress* dari *drive train* dipengaruhi oleh beban torsi dan beban non-torsi antara masukan *shaft* pada bilah dengan keluaran *shaft* pada generator. Sebagai contohnya, beban yang tidak diinginkan yang masuk menuju *shaft* dapat disebabkan oleh turbulensi, kontruksi tower yang kurang tepat, bilah yang tidak seimbang, serta perubahan arah angin. Disturbansi pada keluaran daya bisa disebabkan oleh penurunan tegangan atau frekuensi, serta ketidakseimbangan tegangan, *under-voltage* dan *over-voltage* (Singh *et. al.*, 2014).

Pada *drive train* terdapat *gearbox* dengan kecepatan putar dan tingkat torsi tertentu yang sesuai dengan kebutuhan dari generator (Soriano, Yu, & Rubio, 2013). Kecepatan rotasi dari turbin angin cukup rendah dan karena itu harus disesuaikan dengan frekuensi listrik (Petersson, 2005). Di dalam *nacelle* dari turbin angin, *gearbox* diletakkan antara hub dan generator. *Gearbox* digunakan untuk mengkonversi putaran rendah torsi tinggi pada rotor turbin angin menjadi putaran tinggi torsi rendah. Selanjutnya akan digunakan oleh generator (Sheng & Veers, 2011). Pada *gearbox* terdapat multiplier yang menentukan besar peningkatan kecepatan dan penurunan torsi. Besar perubahan kecepatan putar dari *low speed shaft* ke *high speed shaft* akan dipengaruhi oleh momen inersia yang ada pada rotor turbin dan rotor generator dan torsi rotor turbin dan generator (Keller *et. al.*, 2012).



Gambar 2.3 Skema *Drive Train* untuk Pemodelan Turbin Angin (Soriano *et. al.*, 2013)

Meskipun *gearbox* masih digunakan pada kebanyakan turbin angin jenis horizontal axis wind turbine (HAWT), pengembangan turbin saat ini adalah dengan menghubungkan *main shaft* dari turbin angin langsung menuju generator. Hal tersebut untuk meningkatkan keandalan dan mengurangi biaya akibat kegagalan pada sistem *gearbox.* Meskipun begitu, prinsip mekanik pada gearbox masih digunakan pada perkembangan teknologi turbin angin saat ini, yaitu prinsip perbandingan jumlah gerigi atau diameter hub (Soriano *et. al.*, 2013). Perubahan kecepatan angular ω_r disebabkan oleh adanya selisih antara torsi aerodinamik T_A dan torsi *shaft* T_s pada kecepatan rendah:

$$T_A - T_S = J_r \dot{\omega}_r \tag{2.12}$$

$$\dot{\omega}_r = \ddot{\varphi}_r \tag{2.13}$$

Torsi mekanik T_m dan torsi *shaft* T_S dihubungkan oleh rasio *gear*:

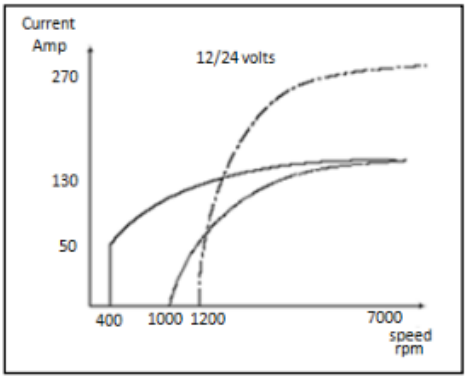
$$T_m = \frac{T_S}{n} \tag{2.14}$$

2.3 Alternator Listrik

Sistem konversi energi angin pada umumnya terhubung dengan jaringan tenaga listrik dan memasok kebutuhan tenaga lisitrik. Hal tersebut dilakukan untuk membatasi penggunaan pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil. Penggunaan generator telah banyak digunakan pada sistem tenaga angin. Meningkatnya pemanfaatan energi angin memberikan dampak pada pengembangan sistem generator listrik yang handal dan menguntungkan (Bindu & Mandadi, 2014).

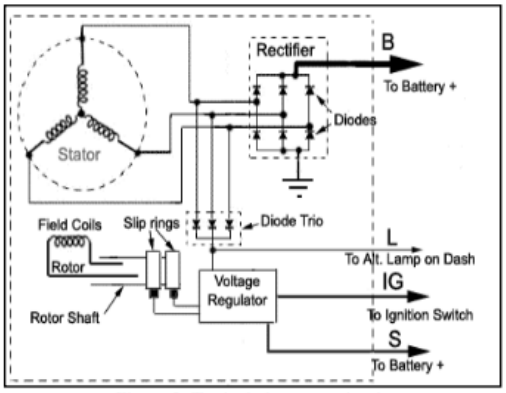
Alternator merupakan salah satu jenis generator sinkron tiga fasa yang digunakan pada kendaraan bermotor untuk mensuplai daya listrik (Ajayi, 2012). Alternator biasanya mulai menghasilkan daya listrik pada kecepatan putar tinggi, sekitar 1000 rpm. Hasil pengujian pada Gambar 2.4 menunjukkan bahwa alternator dalam perkembangannnya mampu menghasilkan energi listrik pada putaran rendah

yaitu 400 RPM. Hal tersebut merupakan informasi yang sangat mendukung dalam kaitannya dengan penerapan pada turbin angin (Irasari, 2011).



Gambar 2.4 Karakteristrik Arus terhadap Kecepatan Putar Alternator (Irasari, 2011)

Alternator terdiri dari rotor dan stator, dioda, dan regulator. Energi mekanik turbin angin setelah melewati *gearbox* diterima oleh *pulley* yang selanjutnya akan memutar rotor dari alternator. Putaran rotor akan menghasilkan medan elektromagnetik. Pada stator terdapat lilitan kawat halus yang akan menghasilkan arus AC ketika terdapat medan elektromagnetik. Arus AC yang dihasilkan akan diubah menjadi arus DC dengan menggunakan diode. Untuk kebutuhan penyimpanan energi pada baterai biasanya digunakan sebuah regulator. Regulator digunakan untuk membatasi jumlah arus yang masuk sehingga baterai tidak akan cepat aus (Ajayi, 2012).



Gambar 2.5 Rangkaian Komponen pada Alternator (Irasari, 2011)

Rotor pada alternator terbuat dari besi tanpa laminasi, sehingga terdapat *losses* pada arus *eddy* yang disebabkan oleh kecepatan putar yang tinggi. Kecepatan putar yang lebih tinggi juga menyebabkan suhu gulungan tembaga meningkat sehingga resistansi gulungan juga meningkat. Resistansi yang meningkat mengakibatkan *losses* yang tinggi pada tembaga. Berdasarkan alasan tersebut maka pada alternator penambahan *fan* dilakukan (Ajayi, 2012).

2.4 Mikrokontroler Arduino Mega

Rangkaian mikrokontroler adalah sistem komputer yang ringkas karena dapat menggantikan fungsi komputer dalam pengendali kerja dengan desain yang jauh lebih ringkas. Mikrokontroler hanya bisa digunakan untuk suatu aplikasi tertentu saja karena program kontrol disimpan pada ROM yang ukurannya relatif besar. Sedangkan RAM hanya digunakan untuk tempat penyimpanan sementara, termasuk *register* yang digunakan pada mikrokontroler.

Arduino adalah sebuah *platform* komputasi fisik yang bersifat *open source* dengan *board* masukan dan keluaran yang sederhana (0/1). Arduino memiliki lingkup pengembangan bahasa pengolahan yang dapat dihubungkan dengan *software* dan *hardware* lainnya sehingga dapat mendeteksi dan merespon situasi dan kondisi lingkungan dan menampilkannya pada PC. Arduino tersusun dari dua bagian utama yaitu Arduino *board* dan Arduino IDE (*Integrated Development Environment*). Arduino *board* berupa *hardware* yang digunakan ketika menyusun rangkaian. Arduino IDE merupakan *software* yang digunakan untuk pengolahan pada PC. IDE digunakan untuk membuat gambaran program komputer yang di*upload* ke Arduino *board*. Gambaran program digunakan untuk menentukan pekerjaan yang harus dilakukan oleh Arduino *board* (Banzi, 2011).

Penelitian ini menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai *mikrokontroler*. Kelebihan *board* Arduino Mega adalah memuat semua yang dibutuhkan untuk menunjang mikrokontroler, mudah menghubungkannya ke sebuah komputer dengan sebuah kabel USB atau memberikan *supply* dengan sebuah adaptor AC ke DC atau menggunakan baterai untuk memulainya. Arduino Mega juga bisa digabungkan bersama modul dengan protokol yang berbeda-beda, sedangkan

Arduino IDE merupakan salah satu *software* khusus yang dapat digunakan untuk *memprogram* mikrokontroler. *Software* ini memungkinkan pengguna untuk menambah dan megurangi *library* yang ada.

Artanto (2012) menjelaskan bahwa kelebihan Arduino dibandingkan dengan *platform* lainnya adalah:

1. Arduino IDE merupakan *multiplatform*;
2. Arduino IDE dibuat berdasarkan pada IDE *processing* yang sederhana;
3. Pemrograman Arduino menggunakan kabel yang terhubung dengan *port* USB sehingga dapat dioperasikan pada semua PC;
4. Arduino IDE adalah *software* yang bersifat *open source*;
5. Proyek Arduino dikembangkan dalam lingkungan pendidikan sehingga bagi pemula akan lebih cepat dan mudah mempelajarinya;

Berikut ini merupakan spesifikasi *board* Arduino Mega berupa:

Tabel 2.1 Karakteristik Arduino Mega

KOMPONEN	**SPESIFIKASI**
Chip mikrokontroller	ATmega2560
Tegangan operasi	5 V
Tegangan masukan (yang direkomendasikan, melalui jack DC)	7 – 12 V
Tegangan masukan (limit, via jack dc)	6 – 20 V
Digital I/O pin	54 pin, 6 diantaranya keluaran pwm
Masukan Analog	16 pin
Arus DC per pin i/o	20 mA
Arus DC pin 3.3v	50 mA
Memori flash	256 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 Hz
Dimensi	101.5 mm x 53.4 mm

Sumber : (Nagakumararaj, 2017)

Hardware mikrokontroler Arduino Mega diprogram dengan menggunakan bahasa pemrograman *wiring-based* yang berbasiskan *syntax* dan *library*. Pemrograman *wiring-based* ini tidak berbeda dengan C/C++, tetapi dengan

beberapa penyederhanaan dan modifikasi. Untuk memudahkan dalam pengembangan aplikasinya, modul Arduino menggunakan IDE Arduino berbasis *processing* (Margolis, 2011).

2.5 Rotary Encoder

Informasi mengenai kecepatan dari sebuah benda diperlukan untuk mengendalikan pergerakannya. Perangkat sensor dan *feedback* yang mampu memberikan informasi tersebut adalah "*encoder*". Sebuah *encoder* akan memberikan sinyal yang didasarkan pada hasil pengukuran kecepatan dari sebuah benda yang bergerak (Das, *et. al.*, 2016). Optocupler merupakan salah satu jenis *encoder* yang digunakan untuk mengukur putaran benda pada suatu poros dan mengubah sinyal posisi putar atau sudut menjadi sinyal elektronik. Optocoupler memiliki sebuah *disk* dengan pola tertentu yang dipasang pada rotor. Sinyal keluaran dari *rotary encoder* dapat dikorelasikan dengan gerakan rotasi dari rotor (Byrd, 2014).

Informasi mengenai kecepatan putar rotor diperlukan pada sistem turbin angin. Hal tersebut berkaitan dengan sistem pengendali yang akan dikembangkan. *Disk* pada *Rotary encoder* dihubungkan dengan rotor dan diletakkan diantara *infrared* dan *phototransistor* untuk mengukur kecepatan putar rotor turbin angin.

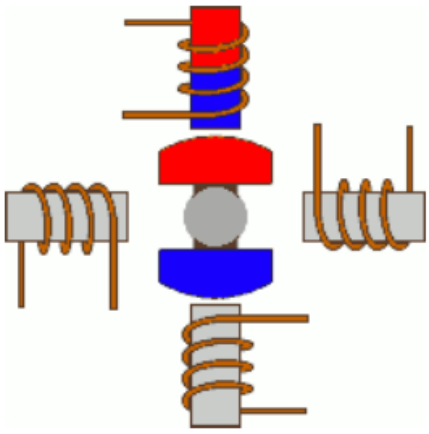
Gambar 2.6 Sistem *Rotary Encoder*

Disk pada *Rotary encoder* yang digunakan pada penelitian ini memiliki 18 lubang, dengan *infrared* dan *phototransistor* sebagai sumber sinyal optik dan

photoreceiver-nya. *Disk* pada *Rotary encoder* berfungsi agar tidak ada sinar *infrared* yang mengenai *phototransistor*. Namun ketika melewati lubang *disk*, sinar *infrared* akan mengenai *phototransistor,* sehingga untuk mendapatkan satu putaran rotor, diperlukan 18 kali *phototransistor* mendeteksi *infrared*.

2.6 Motor Stepper

Motor stepper adalah perangkat elektromekanik yang bekerja dengan mengubah pulsa elektronik menjadi gerakan mekanik diskrit. Motor stepper bergerak berdasarkan urutan pulsa yang diberikan ke motor. Sehingga untuk menggerakkan motor stepper diperlukan pengendali motor stepper yang membangkitkan pulsa-pulsa periodik. Salah satu keunggulan motor stepper adalah memiliki tingkat presisi pergeseran putaran rotor yang tinggi (Kelemen *et. al.*, 2015)

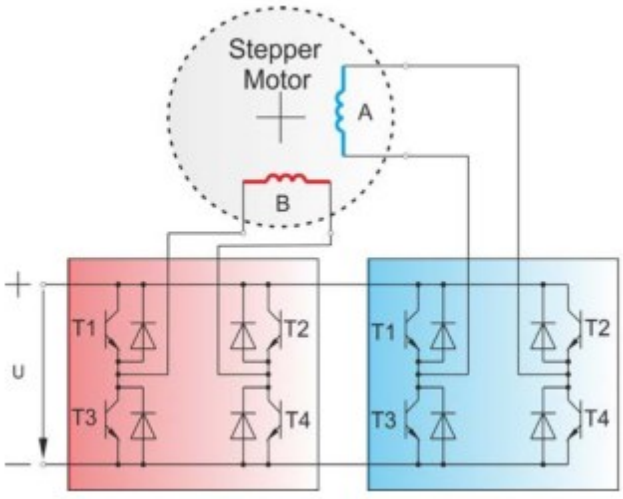


Gambar 2.7 Ilustrasi Prinsip Kerja Motor Stepper (Kelemen *et. al.*, 2015)

Motor stepper sangat sesuai digunakan dimana tingkat presisi menjadi faktor utama dalam suatu sistem (Kelemen *et. al.*, 2015). Satu "step" kecil pada umumnya digunakan pada beberapa bidang industri, seperti pada sistem biomedis, lengan robot, peralatan mekanik. Selain memiliki tingkat presisi pergeseran putaran rotor yang tinggi, motor stepper memiliki desain dan struktur yang handal, serta memiliki daya tahan yang tinggi (Barhoumi & Ben, 2011).

Sistem pengendali dari putaran motor stepper dapat dilakukan oleh modul pengendali tertentu yang biasa disebut sebagai *driver*. Modul *driver* akan

memberikan pulsa-pulsa listrik periodik yang akan mengendalikan arah dan kecepatan putar motor stepper. Pada umumnya modul *driver* menggunakan skema rangkaian H-bridge. Arus listrik yang mengalir melalui kumparan akan membangkitkan medan magnet. Medan magnet tersebut akan menarik rotor hingga bergerak "selangkah" yaitu satu putaran sudut kecil (Dababneh, *et. al*, 2013).



Gambar 2.8 Pengendali Motor Stepper dengan *H*-Bridge (Dababneh, *et. al*, 2013)

2.7 Sistem Pengendali

Pengendali PI konvensional adalah pengendali yang memiliki karakteristik sebagai pengendali *fixed-gain feedback*. Oleh karena itu pengendali PI tidak dapat mengkompensasi variasi parameter pada proses dan tidak dapat menyesuaikan perubahan lingkungan. Sistem yang dikendalikan oleh pengendali PI kurang responsif terhadap perubahan yang relatif cepat dan *real,* sehingga sistem membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai *set point*. Oleh karena itu, pengendali dengan algoritma Fuzzy digunakan untuk mengatasi kendala tersebut. Algoritma Fuzzy mampu meningkatkan kinerja *tracking* dibandingkan dengan metode klasik baik untuk *linier load* maupun *nonlinier load*. Selain itu, logika fuzzy sangat sesuai untuk pengendali nonlinier (Vanitha & Shravani, 2013).

2.7.1 Logika Fuzzy

Penggunaan algoritma logika Fuzzy dimulai pada tahun 1965 oleh Lotfi A. Zadeh, profesor ilmu komputer di *University of California* di Berkeley, USA. Logika Fuzzy adalah logika multi-nilai yang memungkinkan nilai didefinisikan di antara evaluasi konvensional seperti *true* / *false* dan ya / tidak. Gagasan seperti agak lambat atau sangat cepat dapat dirumuskan secara matematis dan diolah melalui komputer (Valdez, 2013).

a. *Fuzzy* (*Rule-Based*) *Systems*

Rule-based pada sistem fuzzy diperlukan untuk memodelkan beberapa sistem kompleks. *Rule-based* tersebut menggunakan variabel linguistik sebagai acuan dan konsekuensinya. Variabel linguistik ini dapat diwakili *fuzzy set* dan operator himpunan pada *fuzzy set* (Ross, 2004). *Rule-based* pada sistem fuzzy menggunakan sistem *rule-based* IF-THEN (Sivanandam, *et. al*., 2007).

IF premis (antecedent), THEN kesimpulan (consequent)

b. Himpunan Fuzzy

Himpunan pada sistem fuzzy adalah himpunan dimana terdapat tingkat keanggotaan antara 1 dan 0. Hal tersebut memungkinkan keanggotaan parsial. Himpunan fuzzy dapat lebih mencerminkan cara berpikir manusia. Misalnya, manusia dapat mengklasifikasikan suhu tidak hanya panas dan dingin saja, namun ada rentang antara panas dan dingin (Ibrahim, 2004).

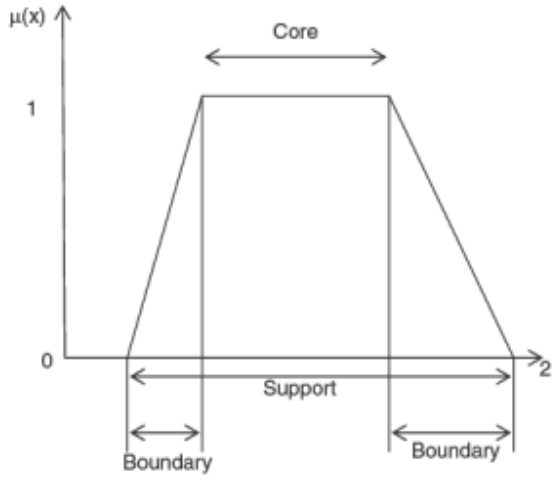
1. *Variabel Fuzzy*

Sistem fuzzy mengandung dua variabel yaitu variabel lingusitik dan variabel numerik. Kedua variabel tersebut terhubung untuk membangun keanggotaan dari sistem fuzzy. Variabel linguistik berfungsi untuk menyediakan sarana perkiraan mengenai suatu karakter atau fenomena agar sesuai dengan deskripsi secara kuantitatif atau numerik (Ross, 2004).

2. *Keanggotaan Fuzzy*

Fungsi keanggotaan dari sistem fuzzy memiliki tiga bagian utama, yaitu: *core*, *support* dan *boundary*. Bagian yang memiliki fungsi keanggotaan 1, disebut sebagai bagian *core* dimana $\mu_A(x)=1$. Bagian yang memiliki fungsi keanggotaan

antara 0 sampai dengan 1 disebut sebagai bagian *boundary* dimana $0 < \mu_A(x) < 10$. *Support* merupakan keseluruhan bagian yang memiliki fungsi keanggotaan lebih dari 0 dimana $\mu_A(x) > 0$ (Sivanandam *et. al.*, 2007).



Gambar 2.9 Bagian Fungsi Keanggotaan (Sivanandam et. al., 2007)

3. *Operasi Himpunan Fuzzy*

Dimisalkan terdapat tiga buah himpunan fuzzy *A*, *B*, dan *C* dari semesta *X*. Fungsi himpunan tersebut dapat dioperasikan menjadi 3 bentuk yaitu (Sivanandam *et. al.*, 2007):

- Gabungan

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \tag{2.15}$$

- Irisan

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \tag{2.16}$$

- Komplemen

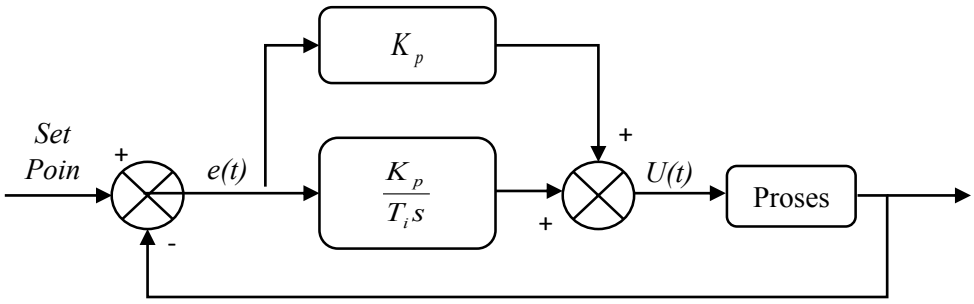
$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{2.17}$$

2.7.2 Proporsional-Integral

Teknik pengendali Proporsional-Integral (PI) adalah teknik pengendali gabungan antara teknik kendali proporsional (P) dengan teknik kendali integral (I). Suatu pengendali proporsional (P) akan mengubah sinyal keluaran pengendali sebanding dengan sinyal *error* (*e*). Hal tersebut akan mengakibatkan efek pada

pengurangan *rise time* dan menimbulkan *steady state error* (*offset*). *Offset* dapat dikurangi dengan memberikan teknik pengendali integral (I) (Yu, 2006).

Sinyal keluaran pada sistem pengendali PI terdiri dari sinyal *proportional error* yang ditambah dengan integral sinyal *error*. Pengendali proporsional memberikan respons pada perubahan variabel proses sebanding dengan nilai *error* saat ini yang akan meningkatkan respons dinamis. Pengendali integral akan mengakibatkan sinyal keluaran sebanding dengan jumlah dan durasi sinyal kesalahan sehingga meningkatkan respon *steady state*. Algoritma PI menghitung akumulasi *offset* proporsional dari waktu ke waktu yang seharusnya sudah diperbaiki sebelumnya (menemukan *integral offset*). Hal tersebut akan mempengaruhi pengendali untuk mendekati *set point* lebih cepat dari pada pengendali Proporsional saja dan menghilangkan kesalahan *steady state* (Mitra & Ojha, 2015). Diagram blok untuk sistem pengendali *Proportional-Integral* adalah sebagi berikut:



Gambar 2.10 Blok Diagram Sistem Pengendali PI

Persamaan hubungan antara sinyal keluaran sistem pengendali terhadap sinyal *error* pada aksi kendali PI adalah (Yu, 2006):

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) \tag{2.18}$$

dapat diketahui bahwa hubungan antara *Kp* terhadap *Ki* adalah

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \tag{2.19}$$

Sinyal keluaran dari pengendali PI adalah:

$$U(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) \qquad (2.20)$$

Keterangan:

U(t) = Sinyal keluaran

e(t) = Kecepatan rotasi dari rotot

Kp = Konstanta proporsional

Ki = Konstanta integral

Ti = *Time integral*

2.8 *Review* Sistem Pengendali

Tabel 2.2 *Review* Sistem Pengendali Putaran Kecepatan Rotor

Tahun	Peneliti	Aplikasi	Algoritma Pengendali	Jenis Penerapan	Hasil	Generator	Keterangan
2012	Vidal, Yolanda; Leonardo Acho; Ningsu Luo; Mauricio Zapateiro; and Francesc Pozo	Pada kecepatan angin yang tinggi	Proporsional Integral	Pengendali torsi generator dan *pitch* menggunakan Proporsional Integral (PI) dan validasi menggunakan simulator turbin angin dari NREL yaitu FAST (*Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence*)	Sistem pengendali mampu meningkatkan atau menurunkan produksi daya WT sebagai respons terhadap konsumsi daya oleh sistem	-	Simulasi
2012	Feng, Ju; and Wen Zhong Shen	Pada kecepatan angin yang tinggi	Proporsional Integral	Mengkombinasikan teknik *feedforward* dan *feedback* untuk sistem pengendali RPM rotor pada kecepatan tinggi	Penerapan strategi pengendali pada kondisi kecepatan angin yang tinggi akan memperlancar daya keluaran, menghilangkan putaran yang muncul tiba-tiba, tanpa membebani beban rotor dan bilah.	-	Simulasi

Tabel 2.2 (lanjutan)

Tahun	Peneliti	Aplikasi	Algoritma Pengendali	Jenis Penerapan	Hasil	Generator	Keterangan
2012	Salomao, L. A. Torres; Hugo Gámez Cuatzin; Juan Anzurez Marín; and Isidro I. L. Castillo	Pada kecepatan angin yang tinggi dan rendah	Fuzzy-PI, FLC, PI	Pengendali Logika Fuzzy-PI menghasilkan transisi pengendali yang *smooth* ketika terdapat variasi kecepatan angin. FLC dirancang untuk mendapatkan daya ekstraksi maksimal pada kecepatan angin rendah dan membatasi ekstraksi daya pada set point 1.5 MW.	Uji ketahanan dilakukan dengan menambahkan sinyal *noise* ke algoritma FLC dan Fuzzy-PI. Hasil menunjukkan algoritma kontrol Fuzzy-PI mampu mengatasi tingkat noise. Algoritma FLC tidak menunjukkan respon yang memadai untuk *noise*.	Squirrel Cage Induction Generator	Simulasi
2013	Rao, T.C. Srinivasa; Ravi Ponnala; T.C. Subramanyam; and N. Srinivas	Pada perubahan beban operasi power sistem yang kontinyu dan acak	Proporsional Integral dan Fuzzy Logic	Logika fuzzy digunakan untuk tuning Ki dari AVR pada power system. Nilai kritis Kc pada PI dianggap sebagai nilai dasar dalam desain skema kontrol logika fuzzy yang digunakan.	Logika fuzzy memberikan aksi kendali yang baik pada *error* frekuensi, *undershoot* dan *overshoot*, serta *settling time* yang lebih rendah dibandingkan dengan PI. Logika fuzzy memberikan sinyal keluaran berupa tegangan keluaran yang dapat dikendalikan dengan cepat dan akurat.	Generator using AVR	Simulasi

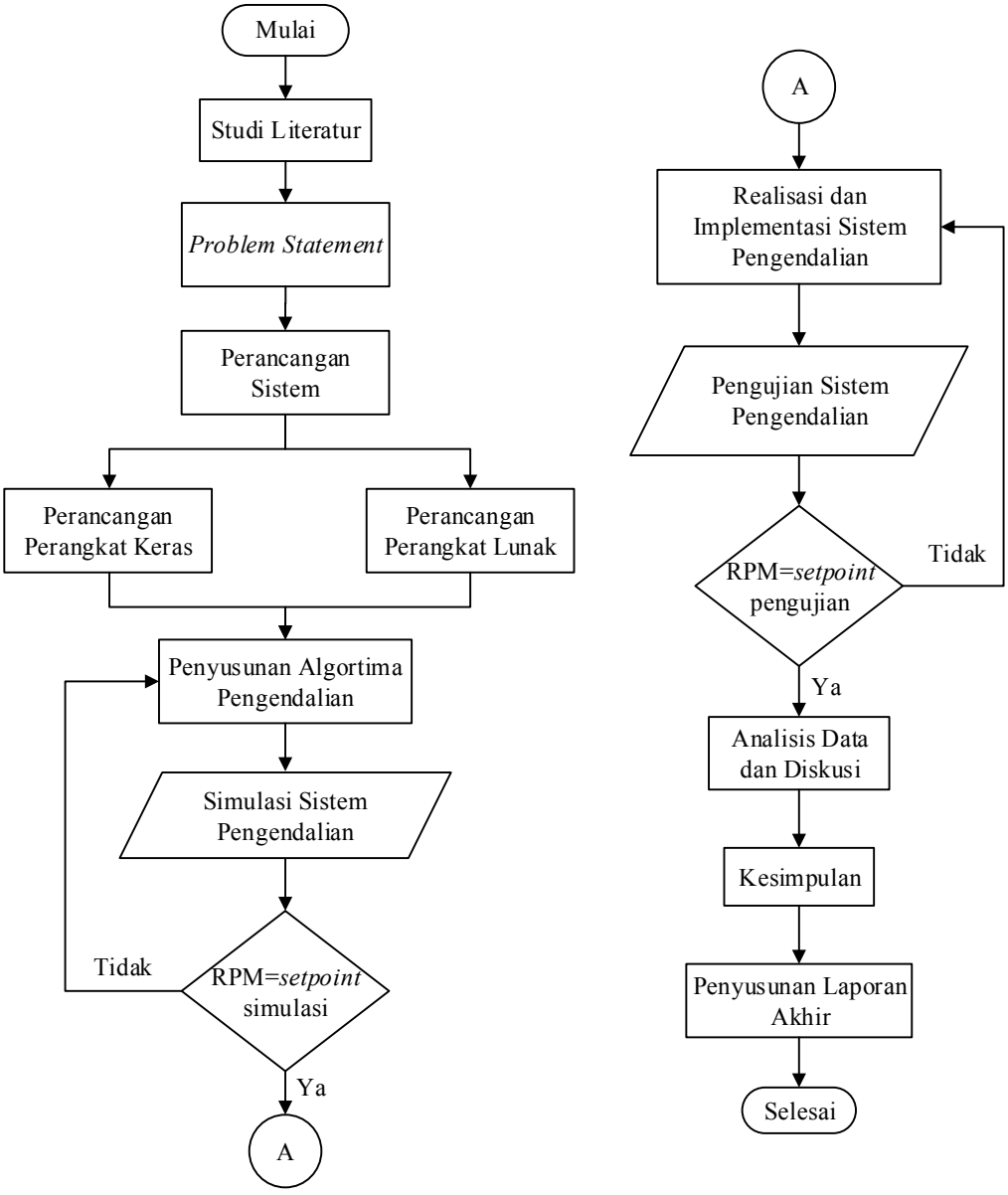
Tabel 2.2 *Review* Sistem Pengendali Putaran Kecepatan Rotor (lanjutan)

Tahun	Peneliti	Aplikasi	Algoritma Pengendali	Jenis Penerapan	Hasil	Generator	Keterangan
2013	Wang, Feng; and Kim A. Stelson	Pada perubahan kecepatan angin yang kecil dan besar	Model Predictive Control	MPC digunakan untuk melacak kecepatan rotor yang diinginkan dengan menggunakan prediksi kecepatan angin yang akan datang. MPC diaplikasikan pada turbin angin HST 50 kW. Perubahan kecepatan angin digunakan sebagai uji dasar respons transien.	Hasil menunjukkan bahwa pengendali MPC pada perubahan kecepatan angin yang kecil memberikan respons yang cepat, namun terdapat *overshoot* yang besar. Pada perubahan kecepatan angin lebih besar pengendali MPC kehilangan kendali ketika kecepatan angin turun. Hal ini mengindikasikan pengendali MPC dalam penelitian ini memiliki rentang operasi terbatas.	Generator sinkron	Simulasi

BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Sub bab 3.1 menjelaskan terkait prosedur penelitian tesis yang dilakukan guna mencapai tujuan penelitian. Diagram alir penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 *Prototype* Turbin Angin

Turbin angin yang digunakan merupakan turbin angin tipe HAWT *(Horizontal Axis Wind Turbine)* dengan tiga buah bilah. Bilah yang dibuat menggunakan standar NREL S835 (bagian pangkal 25 cm), S833 (bagian tengah 35 cm), dan S834 (bagian ujung 40 cm). Panjang tiap bilah yang diguanakan adalah 100 cm. Spesifikasi turbin angin yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1 Spesifikasi Turbin Angin

Bagian	Parameter	Spesifikasi
Bilah	Jumlah	3 buah
	Panjang	100 cm
	Berat	990 g
	Bahan	*Fiberglass*
Rotor shaft	Bahan	*Stainless Steel*
	Dimensi	diameter = 1,5 cm, panjang = 1.3 m
Penopang bilah	Bahan	Akrilik
	Dimensi	diameter = 28 cm, tebal = 10 mm
Main Plate	Bahan	Plat besi
	Dimensi	diamater = 40 cm, ketebalan = 0,2 cm
Tiang Penyangga	Bahan	Plat besi
	Dimensi	diameter = 8 cm, tinggi = 2 m

Turbin angin yang digunakan memiliki tiga buah bilah dan terbuat dari bahan *fiberglass*. Konfigurasi dan bahan bilah tersebut bertujuan agar turbin angin beroperasi secara efisien dengan kecepatan angin yang bervariasi (Manyonge *et. al.*, 2012). Konfigurasi tersebut juga mampu menghasilkan frekuensi optimal yang dibutuhkan generator, meminimalkan ukuran, dan berat *gearbox* atau transmisi lainnya, serta meningkatkan efisiensi (Ragheb & Adam, 2011). *Airfoil* seri S83n (S833, S834, dan S835) merupakan *airfoil* yang cocok digunakan untuk turbin angin dengan variabel keceptan angin yang rendah, *variabel pitch* dengan tipe *airfoil* dan *noise* rendah, serta koefisien *lift* yang tinggi (Musyafa', 2012).

3.3 Mekanisme Pengereman

Sistem *mechanical braking* merupakan salah satu sistem pengereman yang mampu menstabilkan keluaran dari turbin angin. sistem tersebut akan mencegah keluaran yang berlebihan dengan mengendalikan kecepatan putar rotor kecepatan angin tinggi. Sistem *mechanical braking* memiliki kemampuan untuk mengandalikan putaran rotor turbin angin skala kecil. Pengunnaan *electrical braking system*, maupun *magnetic braking system* adalah untuk turbin angin skala besar (Jackson *et. al.*, 2016).

Sistem pengereman mekanik yang ingin dikembangkan yaitu menggunakan putaran motor stepper. Motor stepper dihubungkan dengan tuas yang berfungsi seperti sebuah kaliper dan kampas rem. Ketika putaran berlebih maka kaliper akan lebih lama menekan cakram yang telah terpasang pada rotor turbin angin. Sistem pengendali dilakukan oleh unit pengendali otomatik yang selalu mengoreksi kecepatan angin untuk menjaga agar berada pada kondisi *set point*-nya. Kampas rem yang digunakan pada penelitian ini terbuat dari karet dengan ukuran 3 cm × 1 cm dengan ketebalan 0.5 cm.

Pergerakan kaliper dikendalikan oleh mekanisme putaran motor stepper. Motor stepper merupakan motor yang mengubah pulsa listrik yang diberikan (memanfaatkan PWM) menjadi gerakan rotor secara diskrit (*step*). Besarnya step bergantung pada spesifikasi derajat putaran dari motor stepper. Sebagai contoh jika suatu motor bergerak 1.8 derajat per langkah (*step*) maka motor tersebut memerlukan 200 pulsa untuk bergerak sebanyak satu putaran.

(a) (b)

Gambar 3.2 (a) Motor Stepper Unipolar (b) Rangkaian *Wiring* Motor Stepper

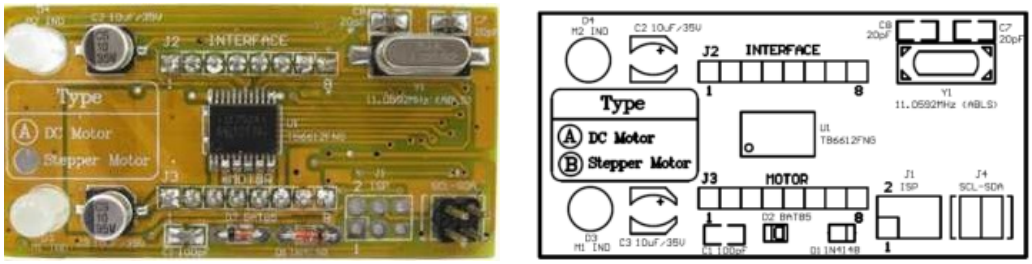
Ukuran kerja dari stepper biasanya diberikan dalam jumlah langkah setiap putaran per detik. Berdasarkan hal tersebut, motor stepper adalah salah satu jenis aktuator elektrik dengan tingkat presisi yang sangat baik karena tingkat resolusi yang kecil.

Motor stepper yang pada penelitian ini adalah motor stepper jenis unipolar. Rangkain motor stepper yang digunakan memiliki dua buah rangkain lilitan dan masing-masing lilitan memiliki sebuah *center tap.* Rangkaian tersebut menjadikan motor stepper memiliki 6 buah rangkaian kabel. Penelitian ini menggunakan motor stepper *Soyo 12V 0.4A 36oz-in Unipolar Stepper Motor (double shaft)* dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3.2 Spesifikasi Motor Stepper

Parameter	**Spesifikasi**
Perubahan sudut	1.8°
Akurasi perubahan sudut	± 5% (tanpa beban)
Suhu ambien	-20°C s/d 50°C
Gaya radial maksimum	28 N
Gaya axial maksimum	10 N
Arah putaran	Searah puataran jarum jam

Motor stepper memerlukan modul *driver* agar dapat dikendalikan. Modul *driver* digunakan untuk menentukan arah putaran motor stepper dan jumlah step yang tidak dapat dilakukan langsung oleh modul pengendali mikrokontroler konvensional.



(a) (b)

Gambar 3.3 (a) Modul *Driver* Motor Stepper (b) Tata Letak Komponen

Setiap modul *driver* memiliki spesfikasi tertentu agar dapat digunakan pada pengendali motor stepper. Modul *driver* yang digunakan pada penelitian ini adalah *Smart Peripheral Controller Neo Stepper Motor 1.2 A* dengan spesifikasi:

Tabel 3.3 Spesifikasi Modul *Driver*

Item	**Spesifikasi**
Tegangan catu daya modul	4,8 V s/d 5.4 V
Tegangan catu daya motor	2,5 V s/d 13.5 V
Tipe IC	TB6612FNG
Arus yang dihasilkan	1.2 A
Aplikasi motor stepper	Unipolar dan Bipolar

Modul *driver* yang digunakan memiliki dua bagian *port* utama. Kedua bagian tersebut adalah *Port interface* (J2) dan *port* motor stepper (J3). Berikut merupakan pengaturan sambungan modul *driver* dari *Smart Peripheral Controller Neo Stepper Motor 1.2 A:*

a. *Port interface* (J2)

Port pertama (J2) adalah untuk *serial interface* dengan mikrokontroler serta catu daya.

Tabel 3.4 Pengaturan Sambungan *Port Interface* (J2)

Pin	Nama	Fungsi
1 dan 2	Vin	Terhubung dengan catu daya (4,8 V – 5,4 V)
3	SCL	I2C *bus clock input*
4	SDA	I2C *bus data input/ output*
5	RX TTL	Masukan serial level TTL ke modul SPC
6	TX TTL	Keluaran serial level TTL dari modul SPC
7 dan 8	PGND	Terhubung dengan catu daya (4,8 V – 5,4 V)

Modul *driver* ini menggunakan *interface* UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) dengan TTL (*Transistor-Transistor Logic*). Komunikasi data secara serial dengan UART membutuhkan RX (*receive*), TX (*transmit*) dan *ground*. RX dan TX bekerja secara berpasangan, pin RX dari perangkat A dihubungkan dengan pin TX dari perangkat B, dan sebaliknya. *Ground* dari kedua perangkat juga harus saling dihubungkan.

b. *Port* motor stepper (J3)

Port kedua (J3) digunakan untuk pengendali motor stepper menggunakan PWM serta dihubungkan dengan catu daya.

Tabel 3.5 Pengaturan Sambungan *Port* Motor Stepper (J3)

Pin	Nama	Fungsi
1 dan 2	Vm	Terhubung dengan catu daya (2,5 V – 13,5 V)
3	M11	Keluaran ke-1 dari pasangan H-Bridge **M1**
4	M12	Keluaran ke-2 dari pasangan H-Bridge **M1**
5	M21	Keluaran ke-1 dari pasangan H-Bridge **M2**
6	M22	Keluaran ke-2 dari pasangan H-Bridge **M2**
7 dan 8	MGND	Terhubung dengan catu daya (2,5 V – 13,45V)

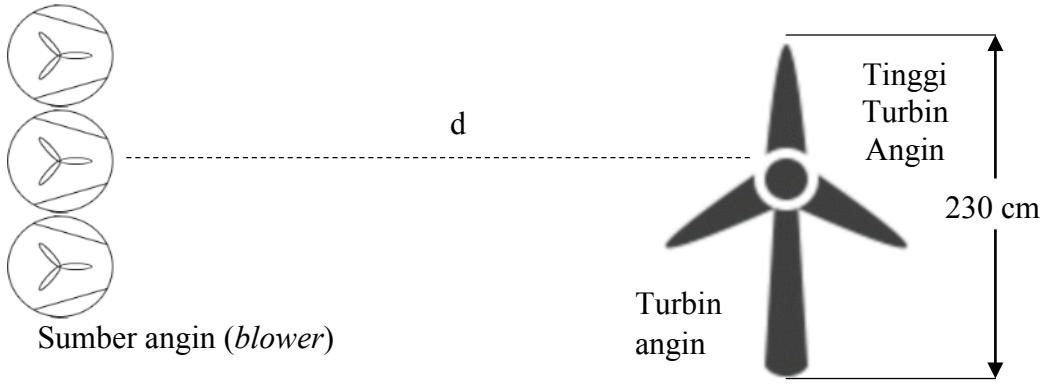
Berdasarkan Gambar 3.3 (b) diketahui bahwa ground adalah kabel yang berwarna kuning dan putih, sehingga diberikan ketentuan bahwa:

a. Kabel berwarna hitam adalah Keluaran ke-1 (+) dari pasangan H-Bridge **M1**
b. Kabel berwarna hijau adalah Keluaran ke-2 (-) dari pasangan H-Bridge **M1**
c. Kabel berwarna merah adalah Keluaran ke-1 (+) dari pasangan H-Bridge **M2**
d. Kabel berwarna biru adalah Keluaran ke-1 (-) dari pasangan H-Bridge **M2**

3.4 Pengambilan Data Kecepatan Angin

Pengambilan data dilakukan dengan cara memberikan kecepatan angin yang bervariasi ke turbin angin. Tiga buah *blower* digunakan sebagai sumber kecepatan angin yang akan diberikan pada turbin angin dan ketinggian dari bagian tengah masing blower diatur sedemikian rupa hingga sejajar dengan bagian rotor turbin angin. Selain ketinggian, arah angin yang dihasilkan oleh *blower* diatur untuk mengenai bagian *blade* dan rotot turbin secara merata. Setiap *blower* diatur untuk kecepatan yang sama untuk tahap awal pada pengambilan data ini. *Blower* tersebut mempunyai tiga buah variasi kecepatan putar yaitu pelan, sedang, dan cepat yang selanjutnya diimplementasikan secara bergantian. Pengambilan data dilakukan di Laboratorium Pengukuran Fisis dan Laboratorium Fisika Rekayasa Teknik Fisika ITS. Data-data yang diambil berupa kecepatan angin dari *blower* serta kecepatan putar turbin angin. Anemometer yang digunakan adalah *Constant AN15 Anemometer*. Pada tahap pengambilan data kecepatan angin, anemometer diletakkan secara acak sesuai dengan arah angin dari *blower* namun harus tetap

menempel pada bagian turbin angin (baik bagian *nose* maupun ketiga bilah). Data kecepatan angin yang diambil adalah sebanyak 3 kali pengambilan data (selanjutnya ditentukan nilai rata-ratanya) untuk setiap pemberian variasi jarak *blower* terhadap turbin angin (d).



Gambar 3.4 Skema Sumber Angin terhadap Turbin Angin

Variasi jarak *blower* terhadap turbin angin (*d*) yang diberikan adalah 300 m, 250 m, 180 m, 130 m, 100 m. Pengambilan data kecepatan putar rotor turbin angin dilakukan menggunakan tachometer kontak, *Dekko DT 2234 BL*. Berikut ini merupakan data pengujian awal pengaruh kecepatan angin (m/s) terhadap kecepatan putar rotor (RPM).

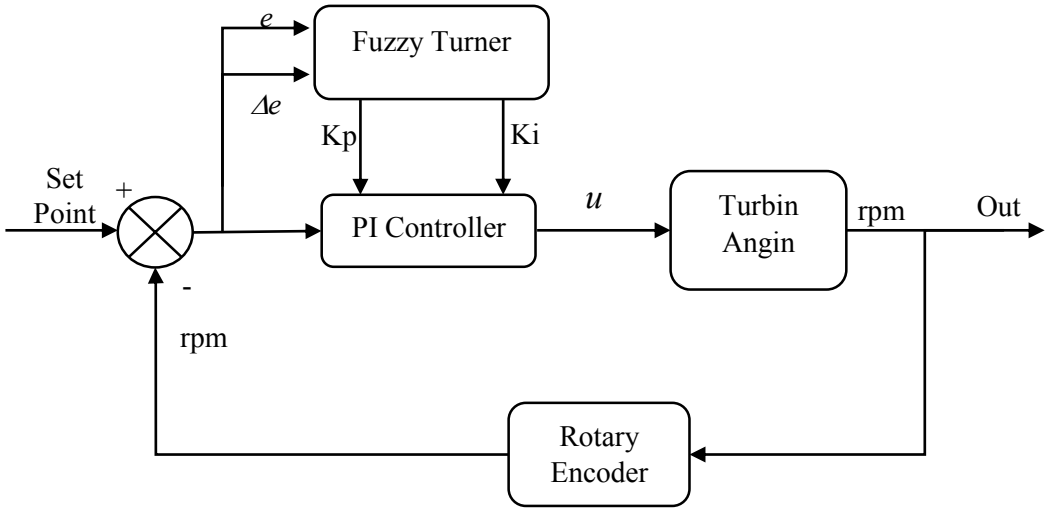
Tabel 3.6 Pengujian Pengaruh Kecepatan Angin terhadap Kecepatan Putar Rotor

Kecepatan Angin (m/s)	Putaran rotor (RPM)	Jarak (m)
2	97	300
3,5	32	250
3,9	18	180
4,5	30	130
5	27	100

Data tersebut diambil dari nilai rata-rata saat mencapai kondisi *steady* maksimalnya. Berdasarkan Tabel 3.6, diketahui bahwa jarak untuk mendapatkan kecepatan yang paling optimal adalah sebesar 300 m. Hal tersebut terjadi karena pada jarak tersebut angin akan mengenai permukaan turbin lebih merata termasuk pada ujung bilah sehingga putaran rotor akan lebih besar.

3.5 Perancangan Sistem Pengendali

Sistem pengendali menggunakan Logika Fuzzy-PI merupakan *close loop control system*. Nilai masukan dari sistem pengendali adalah nilai kecepatan putar rotor (RPM). Kinerja dari sistem pengendali logika fuzzy dapat ditingkatkan dengan memberikan 2 variabel masukan. Adapun nilai masukan yang kedua dari sistem pengendali logika fuzzy adalah *deltaerror*. Variabel *deltaerror* didapat dari nilai *error* saat ini dengan nilai *error* sebelumnya. Prinsip kerja blok sistem ditunjukkan pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6:

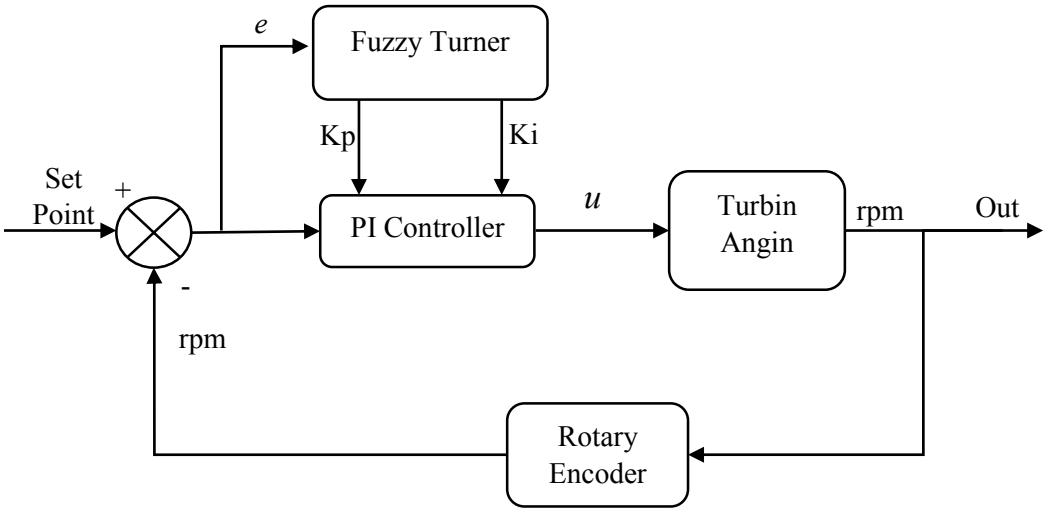


Gambar 3.5 Diagram Blok Sistem Pengendali Fuzzy-PI dengan Dua Variabel *Input* pada Logika Fuzzy

Sistem pengendali menggunakan logika fuzzy untuk menentukan nilai Kp dan Ki sebagai *tuning* PI. Logika fuzzy yang digunakan adalah tipe mamdani. Penggunaan metode ini diawali dengan proses *clusterring* nilai-nilai masukan maupun keluaran. Terdapat dua variabel masukan dari pengendali Logika fuzzy yaitu nilai *error* dan nilai *deltaerror.* Keanggotaan *error* dan *deltaerror* masing-masing berjumlah 5 anggota. Pemilihan fungsi keanggotaan tersebut didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Salomao *et. al.* (2012). Fungsi keanggotan segitiga digunakan pada pembentukan himpunan fuzzy. Hal tersebut dikarenakan

fungsi keanggotaan segitiga memiliki bentuk paling sederhana dan paling efisien untuk berbagai aplikasi (Atacak & Faruk, 2012).

Penelitian ini menggunakan metode *direct synthesis* untuk mendapatkan parameter kendali dari sistem pengendali PI. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa parameter *Kp* dan *Ki* yang didapatkan dari tuning dengan metode *direct synthesis* adalah *Kp* = - 0,02 dan *Ki* = - 0,005803. Parameter *Kp* dan *Ki* tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menyusun fungsi keanggotaan keluaran logika Fuzzy. Penelitian ini diuji awal secara simulasi menggunakan variasi jumlah variabel *input* pada logika Fuzzy. Berikut ini merupakan blok diagram sistem pengendali Fuzzy-PI dengan satu variabel input pada logika Fuzzy:

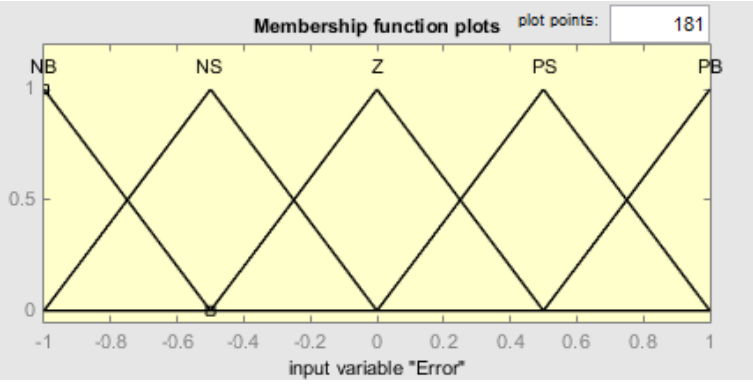


Gambar 3.6 Diagram Blok Sistem Pengendali Fuzzy-PI dengan Satu Variabel *Input* pada Logika Fuzzy

a. Masukan

Rentang fungsi dari keanggotaan *error* didasarkan pada jumlah potensi *error* yang dapat terbentuk. Penelitian ini menggunakan fungsi keanggotaan yang nilainya sudah dinormalisasi. Normalisasi dilakukan dengan membagi nilai fungsi keanggotaan dengan nilai *set point*. Normalisasi diperlukan agar tidak ada perubahan fungsi keanggotaan logika Fuzzy ketika terdapat perbedaan nilai set point yang diberikan. Penelitian ini menggunakan variasi nilai *set point* yaitu

100 RPM dan 75 RPM. Pemberian variasi *set point* tersebut dilakukan untuk mengetahui performansi sistem penegendalian yang telah dirancang.



Gambar 3.7 Fungsi Keanggotaan Variabel *Error*

Pembagian kelima *membership function error* dengan nilai seperti berikut:

Negative Big = [-1.5 -1.5 -1 -0.5]

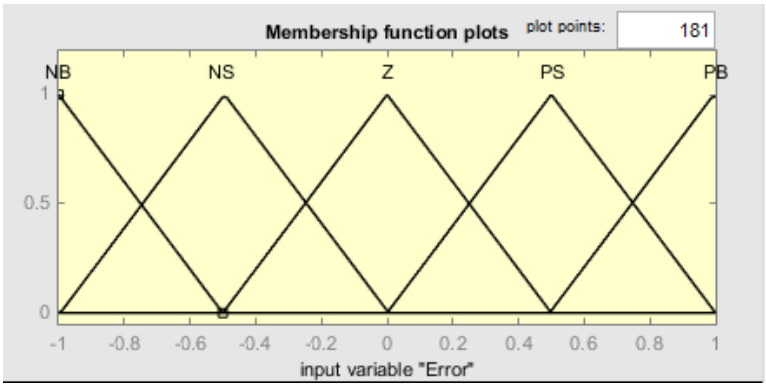
Negative Small = [-1 -0.5 0]

Zero Error = [-0.5 0 0.5]

Positive Small = [0 0.5 1]

Positive Big = [0.5 1 1 1.5]

Variabel *input* dari pengendali fuzzy yang lain adalah *deltaerror*. Berikut merupakan fungsi keanggotaannya:



Gambar 3.8 Fungsi Keanggotaan Variabel *Deltaerror*

Pembagian kelima *membership function error* dengan nilai seperti berikut:

Negative Big = [-1.5 -1.5 -1 -0.5]
Negative Small = [-1 -0.5 0]
Zero Error = [-0.5 0 0.5]
Positive Small = [0 0.5 1]
Positive Big = [0.5 1 1 1.5]

Error merupakan selisih nilai antara kecepatan putar rotor aktual terhadap *set point* kecepatan putar rotor,

$$e = \Delta\omega = \omega_{measured} - \omega_{refference}. \quad (3.1)$$

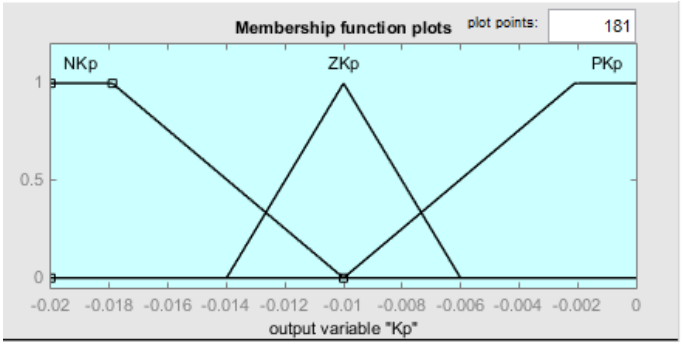
Input kedua berupa *deltaerror* yang merupakan selisih *error* saat pengukuran terhadap sebelumnya (Musyafa' & Al., 2010).

$$\Delta e = \delta(\Delta\omega) = \Delta\omega_n - \Delta\omega_{n-1}. \quad (3.2)$$

Fungsi keanggotaan dari *input* diperoleh dari percobaan secara berulang. Percobaan tersebut akan mendapatkan perkiraan nilai yang akan muncul ketika eksperimen dilakukan. Percobaan menghasilkan probabilitas nilai sebesar ± 150 RPM. Nilai tersebut yang selanjutnya digunakan sebagai batas atas dan batas bawah dari penyusunan fungsi keanggotaan.

b. Keluaran

Nilai *membership function* pada keluaran diperoleh dari nilai *Kp* dan *Ki* berdasarkan nilai masukan. Jika sudah didapat nilai *Kp* dan *Ki* dari beberapa *setpoint* maka dilakukan pemetaan awal selanjutnya tuning PI menggunakan Logika Fuzzy.



Gambar 3.9 Fungsi Keanggotaan Variabel Kp

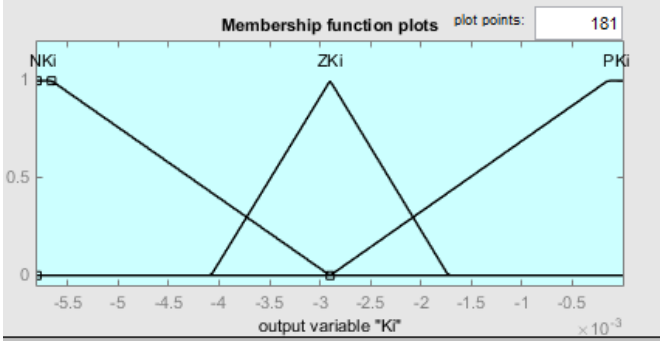
Pembagian ketiga *membership function* dari variabel Kp dengan nilai seperti berikut:

NKp = [-0.02 -0.02 -0.0179 -0.01]

ZKp = [-0.014 -0.01 -0.006]

PKp = [-0.01 -0.0021 0 0]

Membership function dari variabel Ki adalah:



Gambar 3.10 Fungsi Keanggotaan Variabel Ki

Pembagian ketiga range *membership function Ki* dengan nilai sebagai berikut:

NKi = [-0.005803 -0.005803 -0.00566 -0.0029]

ZKi = [-0.00408 -0.0029 -0.001728]

PKi = [-0.0029 -0.00015 0 0]

c. *Rule Base*

Rule base dapat disusun setelah mendapatkan *membership function*. *Rule base* digunakan untuk mendapatkan aksi kendali berdasarkan variabel masukan. Berikut ini merupakan daftar desain *rule base* untuk paramater pengendali PI pada logika Fuzzy dengan dua variabel *input* :

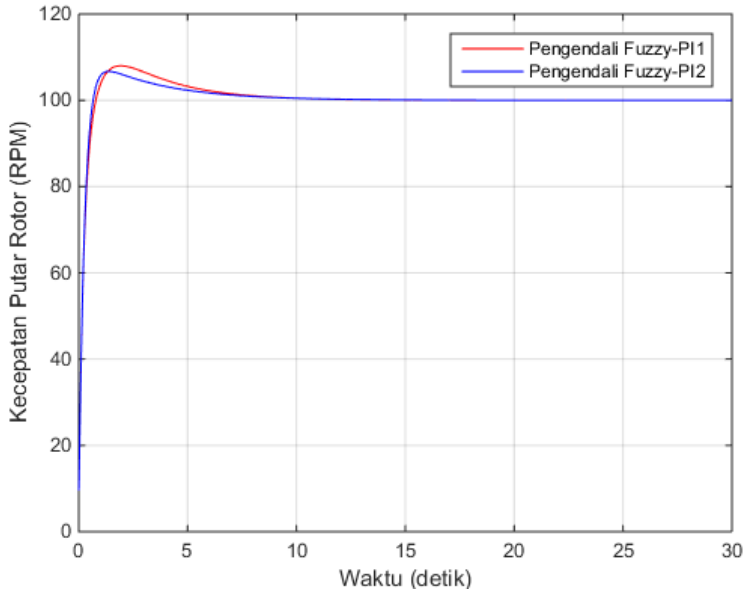
Tabel 3.7 Daftar *Rule Base* untuk Parameter *Kp*

Δe / e	NB	NS	ZE	PS	PS
NB	PKp	PKp	PKp	ZKp	NKp
NS	PKp	PKp	ZKp	NKp	NKp
ZE	NKp	NKp	NKp	NKp	NKp
PS	NKp	NKp	ZKp	PKp	PKp
PB	NKp	ZKp	PKp	PKp	PKp

Tabel 3.8 Daftar *Rule Base* untuk Parameter *Ki*

Δe / e	NB	NS	ZE	PS	PS
NB	PKi	PKi	PKi	ZKi	Nki
NS	PKi	Pki	ZKi	NKi	Nki
ZE	NKi	NKi	NKi	NKi	Nki
PS	NKi	NKi	ZKi	PKi	Pki
PB	NKi	ZKi	PKi	PKi	Pki

Rule base yang digunakan tersebut adalah *rule base* yang digunakan untuk sistem kendali Fuzzy-PI. Jika dibandingkan dengan *rule base* Fuzzy berdasarkan matriks diagonal, *rule base* yang digunakan pada Tabel 3.8 dan Tabel 3.9 dapat memberikan respon grafik yang lebih baik. Berikut merupakan pada grafik perbandingan hasil tanggapannya :



Gambar 3.11 Grafik Perbandingan Hasil Tanggapan Sistem Pengendali Fuzzy-PI dengan Variasi *Rule Base*.

Pengendali Fuzzy-PI1 (FPI1) merupakan sistem pengendali Fuzzy-PI dengan penyusunan *rule base* berdasarkan matriks diagonal. Sedangkan Fuzzy-PI2 (FPI2) merupakan sistem pengendali Fuzzy-PI dengan *rule base* sesuai dengan desain penelitian ini (Tabel 3.7 dan Tabel 3.8). Gambar 3.11 membuktikan bahwa secara simulasi, FPI2 akan memberikan hasil tanggapan sistem yang lebih baik

dibandingkan dengan FPI1. Hal tersebut dibuktikan dari karakteristik kinerja sistem sebagai berikut:

Tabel 3.9 Karakteristik Kinerja dari Sistem Pengendalian

Parameter	Fuzzy-PI	
	Fuzzy-PI 1	Fuzzy-PI 2
Waktu tunda (s)	0,38	0,33
Waktu naik (s)	0,76	0,66
Waktu puncak (s)	1,401	1,375
Waktu tunak (s)	2,602	2,593
Maximum Overshoot (%)	6,741	6,724

Berdasarkan hal tersebut maka pada penelitian ini *rule base* yang digunakan untuk simulasi serta implementasi pada *hardware* adalah sesuai dengan Tabel 3.7 dan Tabel 3.8. Adapun daftar desain *rule base* untuk paramater pengendali PI pada logika Fuzzy dengan satu variabel *input* adalah :

Tabel 3.10 Daftar *Rule Base* untuk Parameter *Kp*

e	Kp
NB	PKp
NS	PKp
ZE	ZKp
PS	NKp
PB	NKp

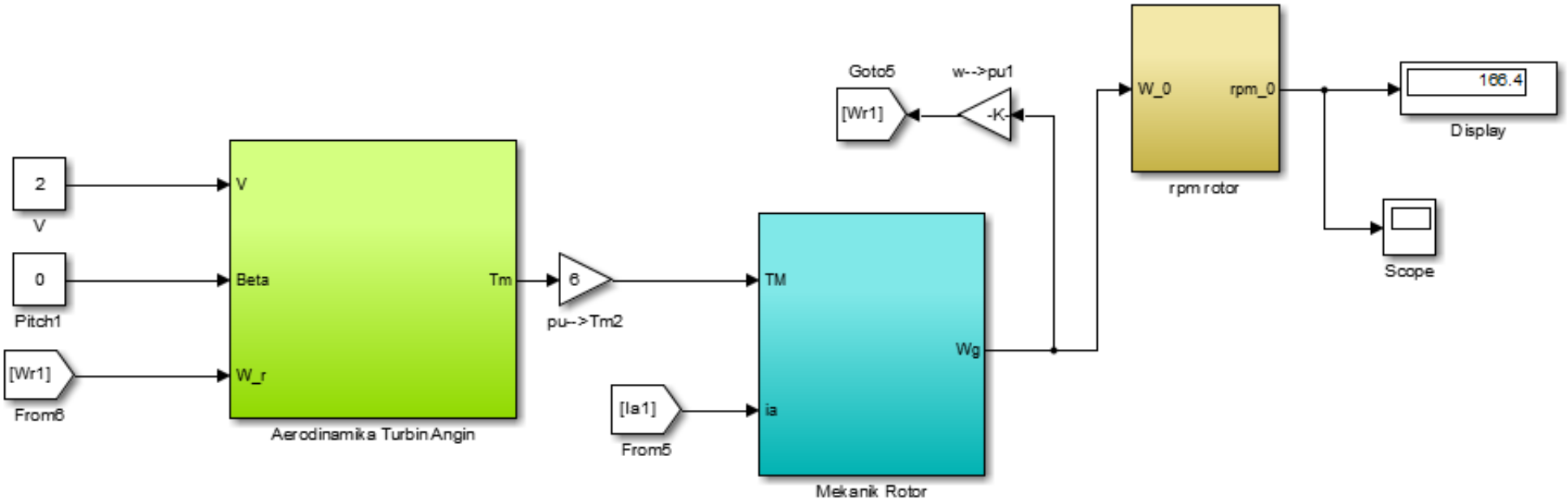
Tabel 3.11 Daftar *Rule Base* untuk Parameter *Ki*

e	Ki
NB	PKi
NS	PKi
ZE	ZKi
PS	NKi
PB	NKi

Berikut ini merupakan blok diagram simulasi dari penelitian ini :

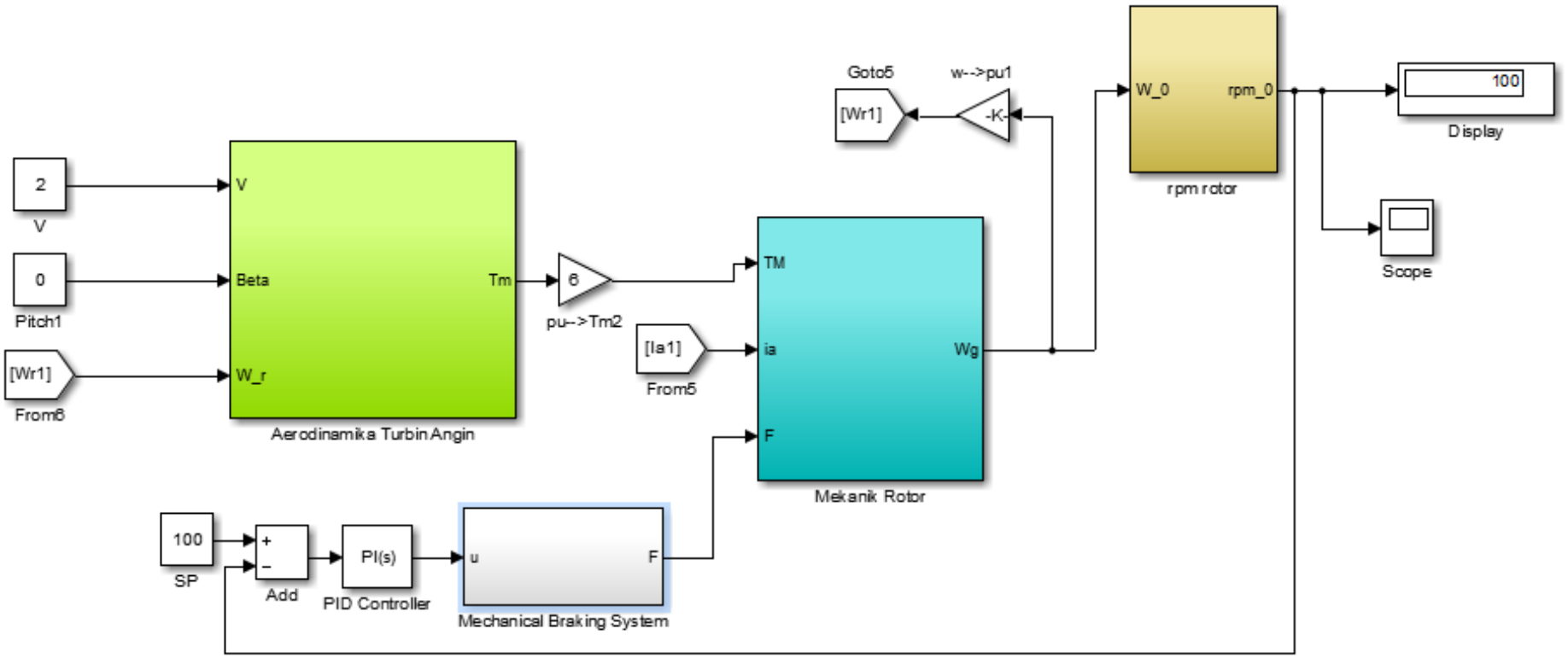
Diagaram Blok Simulasi menggunakan program MATLab 2014b

- Sistem *open loop*



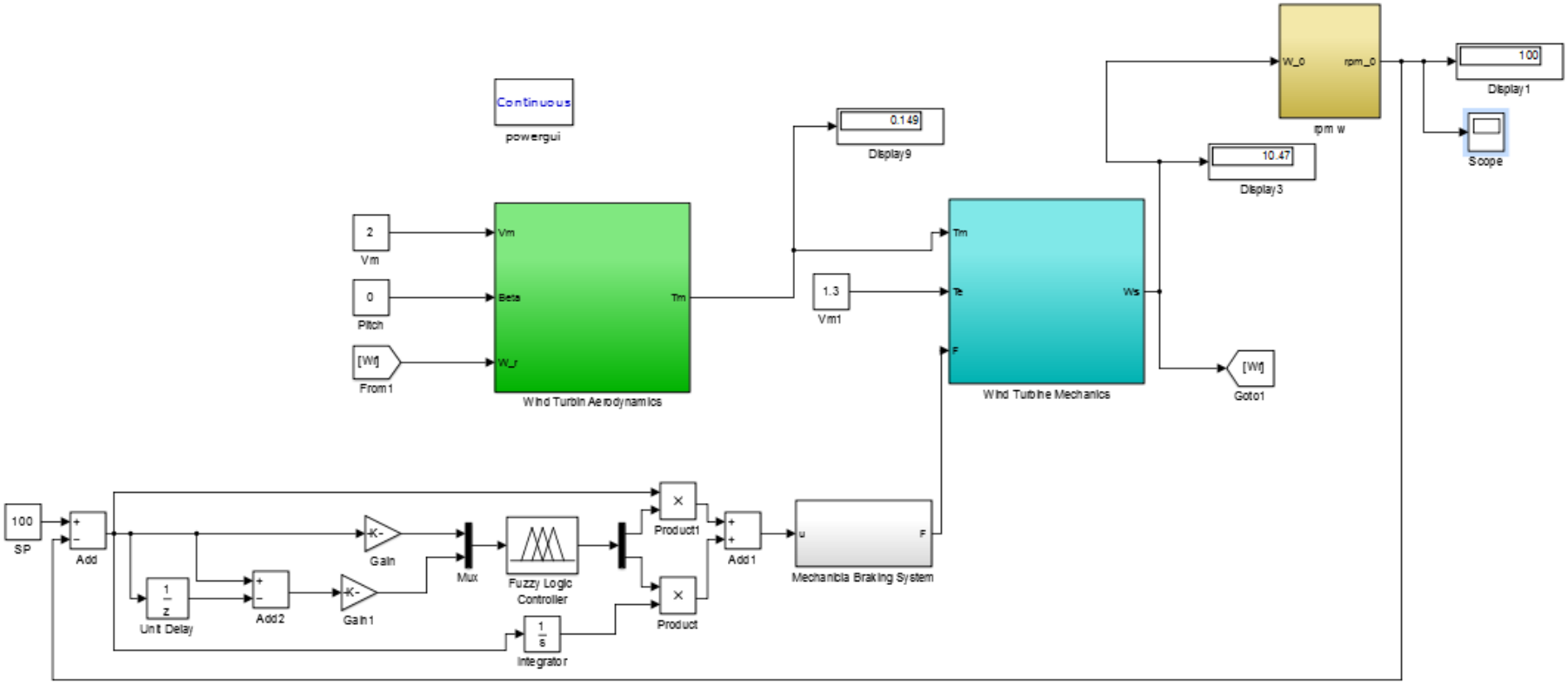
Gambar 3.12 Diagram Blok *Open Loop System* pada Simulasi

- Sistem *close loop* dengan pengendali PI



Gambar 3.13 Diagram Blok Sistem Pengendali PI pada Simulasi

- Sistem *close loop* dengan pengendali Fuzzy-PI



Gambar 3.14 Diagram Blok Sistem Pengendali Fuzzy-PI pada Simulasi

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai pengujian dan analisa yang dilakukan terhadap sistem pengendali kecepatan putar rotor turbin angin. Pengujian tersebut untuk mengetahui mode pegendalian serta pengaruh penerapan sistem pengendalinya. Pada penelitian ini digunakan sistem pengendali Fuzzy-PI serta sistem pengendali PI konvensional dan selanjutnya akan dianalisa perbandingan keduanya.

4.1 Hasil Uji Sensor Optocoupler

Pengujian ini menggunakan motor DC 12 Volt dan *power supply* 12 Volt. Pengujian ini menggunakan variasi tegangan *input* sebanyak 5 kali. Berikut merupakan hasil uji sensor optocoupler :

Tabel 4.1 Hasil Uji Sensor Optocoupler

No	Tegangan *input* (V)	Pembacaan sensor optocoupler (RPM)		Pembacaan tachometer (RPM)		Standar deviasi (RPM)
		5 kali pengulangan	Rata-rata	5 kali pengulangan	Rata-rata	
1	0,5	134	135,6	131	134,6	2,475
		133		136		
		141		143		
		134		130		
		136		133		
2	1,1	252	256	261	260,6	6,227
		263		269		
		259		254		
		250		262		
		256		257		
3	1,5	378	374,6	366	374.4	7,501
		379		387		
		380		372		
		364		381		
		372		366		
4	2	543	548,6	560	560	6,818
		550		573		
		545		564		
		551		542		
		554		561		

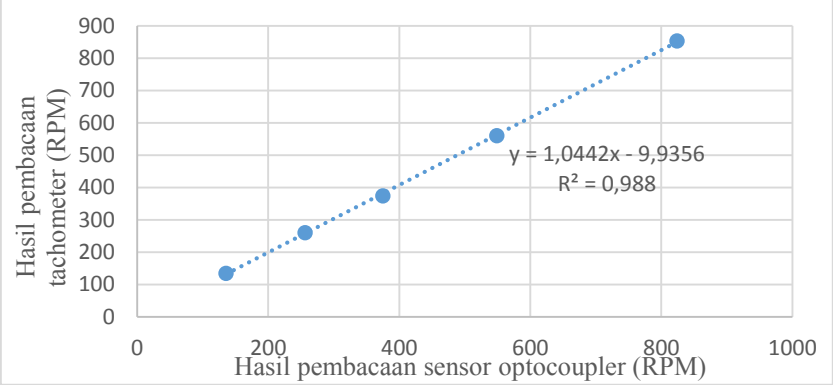
Tabel 4.1 (lanjutan)

No	Tegangan *input* (V)	Pembacaan sensor optocoupler (RPM)		Pembacaan tachometer (RPM)		Standar deviasi (RPM)
		5 kali pengulangan	Rata-rata	5 kali pengulangan	Rata-rata	
5	2,6	822	836	832	847,4	8,456
		832		843		
		858		878		
		839		852		
		829		832		

Optocoupler XD-51 digunakan sebagai sensor yang akan mengukur kecepatan putar rotor turbin angin. Tachometer Dekko 2234BL digunakan sebagai alat ukur konvensional pembanding. Variasi tegangan masukan diberikan untuk mendapatkan kecepatan motor yang berubah-ubah. Lima kali pengambilan data dilakukan pada setiap tegangan *input* yang digunakan. Hal tersebut untuk mengantisipasi adanya data *error* yang diakibatkan oleh beberapa faktor seperti tegangan dari dc *power supply* yang belum stabil serta *error* akibat pembacaan sistem sensor *rotary encoder*.

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa ketika putaran RPM rendah (di bawah 200 RPM), hasil pengukuran kecepatan putar menggunakan optocopuler adalah mendekati hasil pengukuran menggunakan tachometer. Hal tersebut dapat dilihat dari nilai *error* yang kecil. Namun ketika putaran RPM sudah mulai bertambah (di atas 200 RPM), hasil pengukuran kecepatan putar menggunakan optocoupler memiliki pergeseran nilai yang lebih besar terhadap hasil pengukuran dengan tachometer. Hal tersebut dikarena adanya keterbatasan sensor pasangan *infrared* dan *phototransistor* yang tidak bisa merespon adanya perubahan sinyal yang cepat. Perubahan sinyal terjadi ketika gelombang *infrared* terhubung atau terhalangi oleh piringan penghalang yang diletakkan tepat diantara *infrared* dan *phototransistor.* Sedangkan kecepatan perubahan sinyal dikarenakan penghalang tersebut diletakkan pada rotor dan akan berputar mengikuti kecepatan putar rotor. Penyebab lain yang memungkinkan adalah perlu adanya faktor koreksi pada perubahan sinyal dari analog ke digital melalui *analog to digital converter* (Arduino Mega 2560). Hasil pengujian sensor tegangan bertujuan mengetahui karakteristik statik dari

sensor tegangan yang digunakan. Karakteristik statik yang dianalisis adalah linieritas dari sensor.



Gambar 4.1 Grafik Hasil Uji Linieritas Sensor Optocoupler

Gambar 4.1 menunjukan perbandingan nilai pengukuran kecepatan putar pada sensor terhadap alat ukur tachometer. Koefisien determinasi (R^2) yang didapat pada pengujian ini menunjukkan bahwa nilainya mendekati 1, yaitu $R^2 = 0{,}988$. Nilai koefisien R^2 menunjukkan tingkat linieritas dari sumbu X terhadap sumbu Y dari grafik. Dimana jika nilai R^2 semakin dekat dengan nilai 1 maka semakin linier grafik tersebut. Berdasarkan hal tersebut, hasil uji sensor optocupler menunjukkan bahwa perbandingan nilai pengukuran kecepatan putar pada sensor terhadap alat ukur tachometer adalah linier. Linieritas tersebut mengindikasikan bahwa pengukuran kecepatan putar dengan sensor sudah sesuai dengan tachometer.

Nilai ketidakpastian dari sensor optocoupler untuk pemeriksaan skala adalah:

$$U_{A1} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{4.1}$$

sehingga,

$$U_{A1} = \pm 1{,}107 \text{ RPM}$$

Pada penelitian ini ketidakpastian tipe-A merupakan analisa menggunakan metode statistik dengan pengulangan pengambilan data sebanyak 5 kali. Analisa dengan metode statistik lainnya adalah analisa ketidakpastian regresi (U_{A2}).

$$U_{A2} = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}} \tag{4.2}$$

sehingga,

$U_{A2} = \pm 2{,}031$ RPM

Ketidakpastian tipe-B merupakan analisa non-stastisik. Sensor optocoupler yang digunakan dapat membaca kecepatan putar dengan resolusi sebesar 0.01 RPM. Sehingga ketidakpastian resolusi (U_{B1}) yang didapatkan adalah:

$$U_{B1} = \frac{\frac{1}{2}\text{Resolusi}}{\sqrt{3}} \tag{4.3}$$

sehingga,

$U_{B1} = \pm 0{,}003$ RPM

Alat ukur standar yang digunakan adalah tachometer dengan nilai ketidak pastian a = 0,006, diasumsikan bahwa faktor cakupan k = 2, sehingga :

$$U_{B2} = \frac{a}{k} \tag{4.4}$$

$$U_{B2} = \frac{0{,}006}{2}$$

maka,

$U_{B2} = \pm 0{,}003$ RPM

Pada analisa tipe ini akan digunakan selain metode statistik, yaitu berdasarkan sertifikat kalibrasi atau spesifikasi dari alat tersebut. Sedangkan nilai ketidakpastian gabungan (U_C) adalah :

$$U_C = \sqrt{\left(U_{A1}{}^2 + U_{A2}{}^2 + U_{B1}{}^2 + U_{B2}{}^2\right)} \tag{4.5}$$

maka,

$U_C = \pm 3{,}337$ RPM

Nilai ketidakpastian diperluas (U_{exp}) dari sensor optocoupler adalah:

$$U_{exp} = kUc \tag{4.6}$$

maka,

$U_{exp} = \pm 5{,}909$ RPM

Pada perhitungan ketidakpastian diperluas, *k* adalah faktor cakupan yang dapat dilihat pada tabel *T-Student's Distribution*. Pengujian ketidakpastian sensor ini menggunakan tingkat kepercayaan 95 %, seperti lazimnya dipakai dalam pelaporan

hasil pengujian saat ini. Hasil uji ketidakpastian dan kalibrasi sensor optocoupler dapat dilihat pada Lampiran A1.

4.2 Hasil Uji Sensor Anemometer

Sebagai sumber energi yang digunakan pada turbin angin, kecepatan angin perlu diukur. Kecepatan angin akan berkaitan dengan besar ekstraksi energi angin menjadi energi listrik. Agar mendapatkan hasil pengukuran kecepatan angin yang *real time* serta mampu direkam, maka penggunaan sensor anemometer diperlukan. Pengujian ini menggunakan tiga buah *blower* yang berbeda dengan spesifikasi masing-masing *blower* adalah:

a. *Blower* 1. Tegangan *input* = 220 Volt, daya = 110 Watt
b. *Blower* 2. Tegangan *input* = 220 Volt, daya = 130 Watt
c. *Blower* 3. Tegangan *input* = 220 Volt, daya = 111 Watt

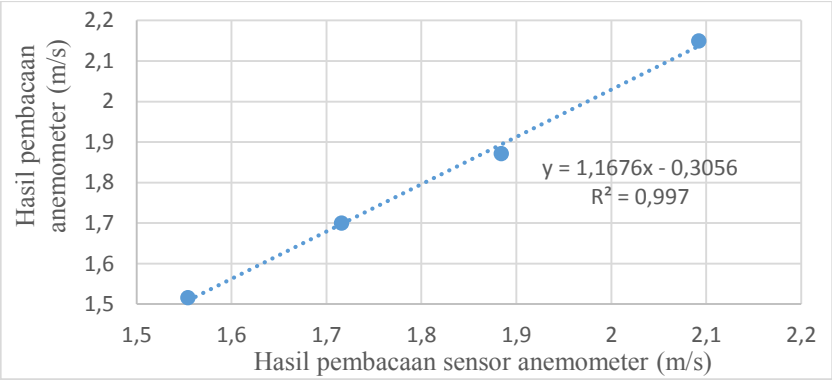
Berikut merupakan hasil pengujian sensor anemometer:

Tabel 4.2 Hasil Uji Sensor Anemometer

No	Keadaan *blower*			Pembacaan sensor (m/s)		Pembacaan anemometer (m/s)		Standar deviasi (m/s)
	A	B	C	5 kali pengukuran	Rata-rata	5 kali pengukuran	Rata-rata	
1.	*Low*	*High*	*Low*	1,54	1,554	1,49	1,516	0,034
				1,61		1,52		
				1,56		1,54		
				1,52		1,52		
				1,54		1,51		
2.	*Low*	*High*	*High*	1,76	1,716	1,81	1,7	0,035
				1,66		1,62		
				1,78		1,77		
				1,63		1,64		
				1,75		1,66		
3.	*High*	*High*	*Low*	1,83	1,884	1,85	1,872	0,051
				1,92		1,87		
				1,82		1,91		
				1,91		1,91		
				1,94		1,82		
4.	*High*	*High*	*High*	2,11	2,092	2,14	2,15	0,047
				2,07		2,19		
				2,05		2,10		
				2,11		2,13		
				2,12		2,12		

Anemometer AN15 digunakan sebagai alat ukur pembanding. Variasi keadaan tiga buah *blower* tersebut diberikan untuk mendapatkan hasil pengukuran yang berubah-ubah. Lima kali pengambilan data dilakukan pada setiap keadaan *blower*. Hal tersebut untuk mengantisipasi adanya data *error*.

Pengujian ini dilakukan dengan meletakkan alat ukur, yaitu: sensor anemometer dan anemometer AN15 sejauh 300 cm terhadap *blower*. Jarak tersebut sesuai dengan konfigurasi peletakan *blower* terhadap sumber angin seperti pada Bagian 3.4 penelitian ini. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kecepatan angin yang dihasilkan oleh ketiga *blower* masih kecil meskipun sudah diatur dalam keadaan *high*. Berikut merupakan hasil uji linieritas sensor anemometer:



Gambar 4.2 Grafik Hasil Uji Linieritas Sensor Anemometer

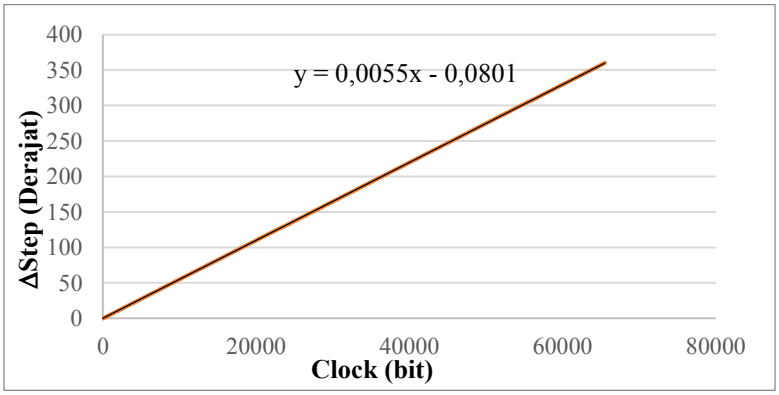
Gambar 4.2 menunjukan perbandingan nilai pengukuran kecepatan putar pada sensor terhadap alat ukur anemometer. Koefisien determinasi (R^2) yang didapat pada pengujian ini menunjukkan bahwa nilainya mendekati 1, yaitu $R^2 = 0{,}997$. Seperti halnya pengujian sensor optocouplerm hasil tersebut mengindikasikan bahwa pengukuran kecepatan putar dengan sensor sudah sesuai dengan alat ukur tachometer.

Hasil uji ketidakpastian pengukuran sensor anemometer menggunakan persamaan-persamaan yang sama dengan uji ketidakpastian pengukuran sensror optocoupler seperti pada bagian sebelumnya. Hasil uji sensor anemometer mendapatkan nilai ketidakpastian pengukuran untuk pemeriksaan skala U_{A1}

sebesar ± 0,015 m/s dan ketidakpastian regresi U_{A2} sebesar ± 0,039 m/s. Pada penelitian ini ketidakpastian tipe-A menggunakan pengukuran sebanyak 5 kali untuk U_{A1} dan 4 kali untuk U_{A2}. Nilai ketidakpastian tipe-B didapatkan sebesar sebesar ± 0,003 m/s untuk ketidakpastian resolusi U_{B1} dan ketidakpastian alat standar U_{B2} sebesar ± 0,003 m/s. Ketidakpastian diperluas (U_{exp}) dari sensor anemometer sebesar ± 0,129 m/s. Nilai U_{exp} tersebut menunjukan tingkatan keyakinan akan keberadaan nilai sebenarnya pada pengukuran. Hasil kalibrasi sensor anemometer secara lengkap ditampilkan pada Lampiran A2.

4.3 Hasil Pengujian Karakteristik Motor Stepper

Motor stepper yang digunakan adalah jenis unipolar dengan 6 kabel. Motor stepper ini dapat berputar searah maupun berlawanan arah dengan putaran jam (*clockwise* dan *counter clockwise*). Karakteristik dari motor stepper dapat dilihat dari grafik hubungan antara pulsa terhadap perubahan step (derajat). Sumbu-*x* mewakili pulsa masukan motor stepper dan sumbu-*y* mewakili perubahan step motor stepper.

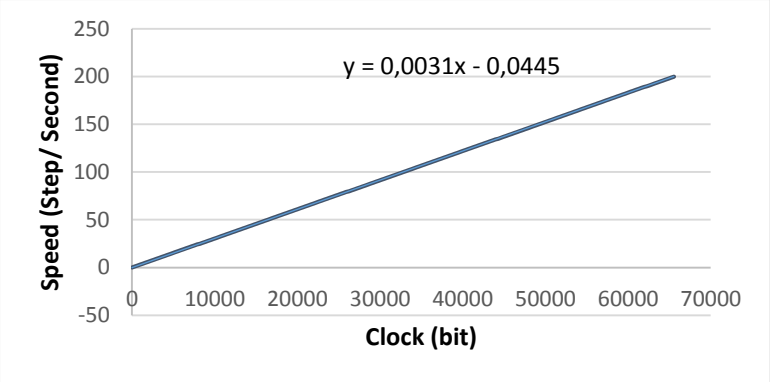


Gambar 4.3 Grafik Hubungan antara Pulsa terhadap Perubahan Step dari Motor Stepper

Identifikasi dari karakteristik motor stepper juga dapat dilihat dari grafik hubungan antara pulsa terhadap kecepatan (step/ second). Sumbu-*x* mewakili pulsa masukan motor stepper dan sumbu-*y* mewakili kecepatan motor stepper.

Pada penelitian ini tegangan masukan dari motor stepper diwakili oleh sinyal 16 byte (0 bit – 65535 bit). Adapun data hasil pengujian karakteristik motor stepper

dapat dilihat pada bagian Lampiran B. Pulsa maksimum yang dapat diberikan pada motor stepper adalah 65535 bit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pulsa yang diberikan berbanding lurus terhadap step (derajat) dan kecepatan (step/ second) dari motor stepper. Perubahan polaritas dan tegangan masukan akan mengakibatkan perubahan putaran searah maupun berlawanan arah dengan putaran jam serta perubahan kecepatan *angular* motor stepper. Perubahan posisi *shaft* dari motor stepper akan mengakibatkan pergerakan pada tuas, sehingga akan terjadi gesekan antara kampas rem pada tuas dengan rotor turbin angin. Gesekan tersebut akan menyebabkan putaran rotor turbin angin dapat dikendalikan.



Gambar 4.4 Grafik Hubungan antara Pulsa terhadap Kecepatan Step dari Motor Stepper

Motor stepper memiliki kemampuan untuk berputar baik secara kontinyu maupun diskrit (tiap step). Selain itu motor stepper dapat berhenti baik dengan mempertahankan torsinya maupun tidak. Berikut ini merupakan *command set* dari motor stepper yang digunakan:

4.3.1 Continous Run

Continous run merupakan kemampuan motor stepper untuk berputar secara kontinyu sampai dengan ketentuan jumlah putar yang diberikan. Pada perintah ini, *pulse delay* hanya akan berpengaruh pada kecepatan putar motor. Semakin kecil nilai *pulse delay*, maka semakin cepat putaran motor stepper. Berikut ini merupakan *pseudo code* untuk menggunakan perintah ini dengan *interface* I^2C (dengan alamat I^2C = 0xE0) :

4.3.2 Pulse Count Run

Pulse count run merupakan kemampuan motor stepper untuk berputar tiap step. Motor stepper yang digunakan memiliki perubahan derajat sebesar $1{,}8^0$ sehingga untuk mencapai maksimal satu putaran penuh, maka diperlukan 200 step. *Pulse delay* pada perintah ini berpengaruh pada kecepatan motor untuk mencapai satu step, serta berpengaruh pada jumlah step yang diberikan. Semakin kecil nilai pulse delay, maka semakin cepat motor stepper mencapai satu step dan semakin sedikit step yang diberikan pada motor stepper.

4.3.3 Brake

Brake merupakan keadaan dimana motor stepper berhenti dengan tetap mempertahankan torsi motor (lilitan motor tetap dialiri arus). Keadaan tersebut menyebabkan motor tidak akan bisa diputar secara manual. *Pulse delay* pada perintah ini berpengaruh pada lama waktu *delay.*

4.3.4 Stop

Stop merupakan keadaan yang berkebalikan dengan *Brake*. *Stop* adalah keadaan untuk menghentikan putaran maupun step dari motor stepper dengan tidak adanya arus listrik yang mengalir pada lilitan motor.

Pada penelitian ini, *command set* yang digunakan adalah *pulse count run* dan *brake. Pulse count run* diatur untuk mampu berputar baik searah putaran jarum jam maupun berlawanan arah jarum jam. Kedua *command set* tersebut digunakan untuk mekanisme pengeraman putaran rotor turbin angin. Perhitungan dan percobaan menunjukkan bahwa dengan panjang tuas 7 cm serta ketebalan kampas rem 1 cm.

4.4 Hasil Perhitungan *Coefficient Power* (Cp)

Coefficient power (*Cp*) adalah perbandingan antara daya mekanik pada bilah akibat gaya angin terhadap daya kinetik yang dihasilkan oleh turbin angin. Aliran udara yang mengenai turbin angin menyebabkan adanya gaya tekan (*drag*) serta gaya angkat (*lift*).

$$C_p = \frac{P_1}{P_2} = \frac{\frac{1}{4}\rho S(V_1 + V_2)(V_1^{\,2} - V_2^{\,2})}{\frac{1}{2}\rho S V_1^{\,3}} = \frac{1}{2}\frac{(V_1 + V_2)(V_1^{\,2} - V_2^{\,2})}{V_1^{\,3}} \qquad (4.7)$$

Keterangan:

Cp = *Coefficient Power*

P = Daya turbin angin (Watt)

ρ = densitas angin (kg/m^3)

S = Luas sapuan angin ketika mengenai bilah (m^2)

V = Kecepatan angin ketika mengenai bilah (m/s)

Indeks

1 = Sebelum melewati bilah

2 = Setelah melewati bilah

Perhitungan *coefficient power* menggunakan dua buah anemometer yang diletakkan di depan serta di belakang turbin angin dalam waktu yang bersamaan. Uji dan kalibrasi sensor optocoupler mendapatkan hasil yang baik yaitu nilai error yang berada di bawah 5 % seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Berdasarkan hal tersebut, nilai pengukuran kecepatan angin menggunakan sensor anemometer dapat merepresentasikan nilai pengukuran kecepatan angin menggunakan anemometer konvensional. Pada penelitian ini sensor anemometer diletakkan di bagian depan turbin angin dan anemometer AN15 diletakkan di belakang turbin angin.Adapun hasil perhitungan *coefficient power* turbin angin adalah seperti pada Tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan C*oefficient Power* (*Cp*)

No	Keadaan *blower*			Kecepatan angin sebelum melewati bilah (m/s)	Kecepatan angin setelah melewati bilah (m/s)	*Coefficient power*	Rata-Rata *Coefficient Power*
	A	B	C				
1.	*Low*	*High*	*High*	1,76	1,23	0,43	0,424
				1,66	1,15	0,44	
				1,78	1,29	0,41	
				1,63	1,18	0,41	
				1,75	1,24	0,43	
2.	*High*	*High*	*Low*	1,83	1,32	0,41	0,423
				1,92	1,32	0,44	
				1,82	1,29	0,43	
				1,91	1,39	0,41	
				1,94	1,37	0,43	
3.	*High*	*High*	*High*	2,11	1,26	0,51	0,516
				2,07	1,28	0,50	
				2,05	1,16	0,53	
				2,11	1,23	0,52	
				2,12	1,27	0,51	

Hasil perhitungan *coefficient power* pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa pada keadaan ketika semua *blower* diatur *high*, maka didapatkan hasil *coefficient power* paling besar. *Coefficient power* yang dihasilkan adalah 0,424 untuk keadaan pertama, 0,423 untuk keadaan kedua, dan 0,516 untuk keadaan ketiga. Berdasarkan hasil analisis diketahui bahwa ketika kecepatan angin yang lebih tinggi mengenai bilah, maka bilah akan berputar semakin cepat sehingga semakin sedikit angin yang bisa melewati bilah turbin angin dan selanjutnya akan berpengaruh pada rendahnya kecepatan angin setelah melewati bilah. Sebaliknya, ketika kecepatan angin yang lebih rendah mengenai bilah, maka bilah akan berputar semakin lambat sehingga semakin banyak angin yang bisa melewati bilah turbin angin dan selanjutnya akan berpengaruh pada tingginya kecepatan angin yang dihasilkan.

Coefficient power berkaitan erat dengan kemampuan suatu turbin angin dalam ekstraksi energi kinetik angin menjadi energi mekanik berupa putaran rotor. Semakin besar nilai *coefficient power* maka turbin angin semakin baik dalam ekstraksi energi kinetik angin. Besar ekstraksi energi kinetik angin akan mempengaruhi energi listrik yang dapat dihasilkan ketika turbin angin sudah dihubungkan dengan alternator. Secara keseluruhan turbin angin yang telah dikembangkan memiliki nilai *coefficient power* (*Cp*) yang masih kurang ideal. Nilai *Coefficient Power* (Cp) ideal menurut Albert Betz adalah $Cp = \frac{16}{27}$ atau $Cp = 0{,}593$ (Ragheb & Adam, 2011).

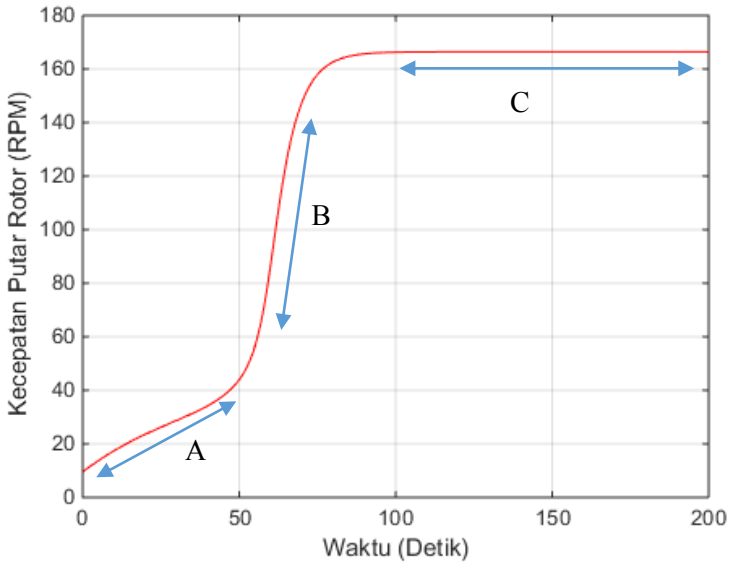
4.5 Simulasi Sistem Pengendali PI dan Fuzzy-PI

Simulasi pengendali diperlukan untuk mengetahui karateristik *plant* yang digunakan. *Plant* yang digunakan adalah turbin angin dengan beberapa sistem, meliputi sistem aerodinamika bilah turbin angin dan sistem mekanika putaran rotor turbin angin.

4.5.1 Sistem *Open Loop*

Sistem *open loop* diperlukan untuk mengetahui sinyal tanggapan dari sistem pada *plant* sebelum diberikan kendali. *Source code* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada bagian Lampiran C. Simulasi yang telah dilakukan

menggunakan variabel-variabel *input* yang sesuai dengan spesifikasi turbin angin yang digunakan. Kecepatan angin yang digunakan pada simulasi ini adalah 2 m/s. Hal tersebut sesuai dengan percobaan sebelumnya bahwa kecepatan angin maksimal yang dapat dihasilkan oleh *blower* adalah 2 m/s. Sinyal tanggapan yang dihasilkan adalah 166,4 RPM. Sinyal tanggapan tersebut masih berada dalam *range* hasil pengukuran *real plant* yang akan dibahas pada bagian selanjutnya. Hal tersebut menunjukkan hasil simulasi sesuai dengan keadaan *real plant* turbin angin. Berikut ini merupakan grafik sinyal tanggapan dari sisitem *open loop* turbin angin.



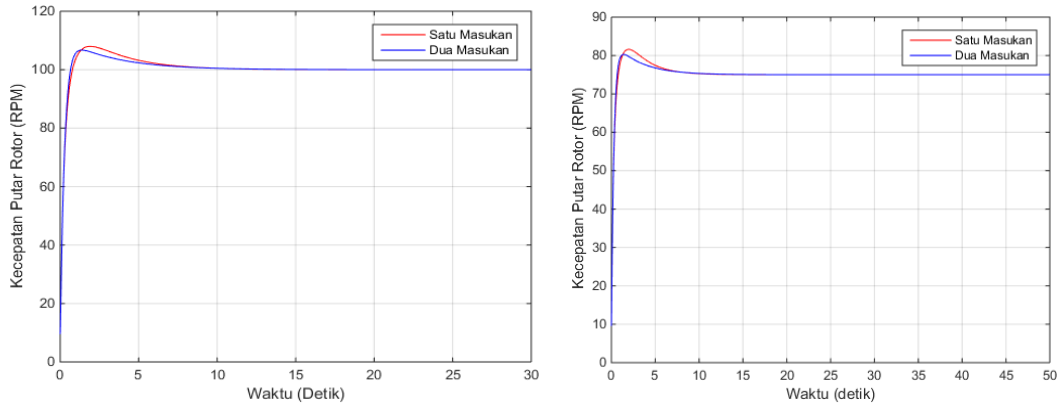
Gambar 4.5 Tanggapan Sistem *Open Loop*

Terdapat tiga bagian dari Gambar 4.3 yaitu bagian A (keadaan transien 1), bagian B (keadaan transien 2) dan bagian C (keadaan steady). Adanya dua keadaan transien merupakan pengaruh dari ekstraksi energi angin yang tidak dapat terjadi secara konstan. Ekstraksi energi angin akan mulai memutar rotor secara perlahan. Hal tersebut dapat direpresentasikan seperti pada bagian A. Rotor akan berputar semakin cepat setelah mencapai waktu tertentu yang dipengaruhi oleh karakteristik turbin angin. Turbin angin mampu mengekstraksi energi angin secara maksimal pada keadaan ini. Keadaan tersebut akan menyebabkan turbin angin memiliki dua keadaan transien, seperti pada bagian B. Energi mekanik berupa putaran rotor pada

akhirnya akan berputar secara konstan pada waktu tertentu. Hal tersebut dapat dilihat pada bagian C.

4.5.2 Perbandingan Variasi Masukan Logika Fuzzy pada Sistem Pengendali Fuzzy-PI

Pengujian variasi *input* logika Fuzzy merupakan bagian dari pengujian sistem pengendali Fuzzy-PI secara menyeluruh. Pengujian ini dilakukan dengan menerapkan aksi pengendali menggunakan dua jenis sistem pengendali Fuzzy-PI. Sistem pengendali yang digunakan adalah Fuzzy-PI dengan satu *input* pada Logika Fuzzy dan Fuzzy-PI dengan dua *input* pada Logika Fuzzy. Variabel *error* pada Fuzzy-PI dengan satu *input* memiliki fungsi keanggotaan yang sama dengan variabel *error* pada Fuzzy-PI dengan dua *input*. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh adanya variabel tambahan yang diberikan, yaitu *deltaerror*. Berikut merupakan grafik sinyal tanggapan dengan pemberian variasi jumlah *input* Logika Fuzzy pada sistem pengendali Fuzzy-PI.



(a) (b)

Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Hasil Tanggapan Sistem *Close Loop* Fuzzy-PI dengan Variasi *Input* ketika (a) *set point* 100 RPM dan (b) *set point* 75 RPM

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa sistem pengendali Fuzzy-PI dengan dua variabel *input* memberikan sinyal tanggapan yang lebih baik dibandingkan dengan sistem pengendali Fuzzy-PI dengan satu variabel *input.* Karakteristik kinerja meliputi: waktu tunda, waktu naik, waktu puncak, dan waktu turun, dari sistem pengendali Fuzzy-PI dengan dua variabel *input* memiliki nilai yang lebih cepat dibandingkan dengan sistem pengendali Fuzzy-PI dengan satu variabel *input.* Nilai

maximum overshoot (%) dari sistem pengendali Fuzzy-PI dengan dua variabel *input* juga lebih kecil dibandingkan dengan sistem pengendali Fuzzy-PI dengan satu variabel *input.*Berikut ini merupakan karakteristik kinerja sistem pengendali Fuzzy-PI dengan variasi *input* Logika Fuzzy:

Tabel 4.4 Karakteristik Kinerja Sistem Pengendali Fuzzy-PI dengan Variasi *Input* Logika Fuzzy pada Simulasi

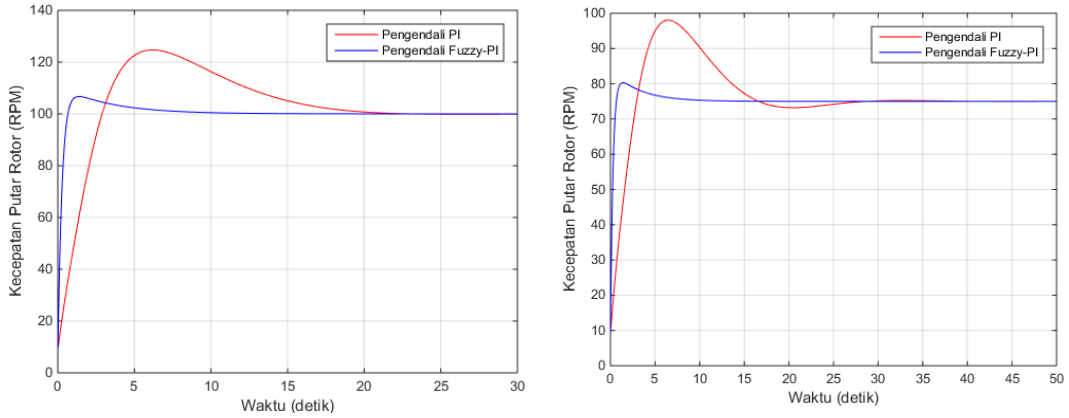
Parameter	*Set point* 100 RPM		*Set point* 75 RPM	
	Satu Variabel *Input*	Dua Variabel *Input*	Satu Variabel *Input*	Dua Variabel *Input*
t_d (s)	0,392	0,330	0,146	0,144
t_r (s)	0,784	0,660	0,665	0,658
t_p (s)	1,912	1,375	1,963	1,389
t_s (s)	3,790	2,593	3,987	2,720
M_p (%)	7,981	6,724	6,607	5,829
e_{ss} *(%)*	0	0	0	0
t_{ess} *(s)*	-	-	-	-

Pemberian dua variabel *input* akan meningkatkan kemampuan dari sistem pengendali (Gasboui *et. al.*, 2011). Nilai *deltaerror* memberikan koreksi terhadap sinyal kendali yang lebih baik. Hal tersebut akan menyebabkan sinyal kendali akan lebih mendekati *set point*. Setelah fungsi keanggotaan *error* dan *deltaerror* disusun, maka dapat ditentukan aktuasi yang tepat untuk *tuning* PI untuk memperbaiki *respon plant*. Keanggotaan *error* dan *deltaerror* masing-masing berjumlah lima fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan tersebut didapatkan dari hasil percobaan yang dilakukan secara berulang-ulang sehingga dapat menghasilkan respon yang optimal.

4.5.3 Perbandingan Sistem Pengendali PI dan Fuzzy-PI

Penelitian ini menggunakan metode *direct synthesis* untuk mendapatkan parameter pengendali PI. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa parameter *Kp* dan *Ki* yang didapatkan dari *tuning* dengan metode *direct synthesis* adalah *Kp* = - 0,02 dan *Ki* = - 0,0058. Parameter *Kp* dan *Ki* tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menyusun fungsi keanggotaan keluaran Logika Fuzzy. Penggunaan sistem pengendali PI dan Fuzzy-PI pada simulasi *plant* turbin angin menghasilkan

grafik sinyal tanggapan seperti pada Gambar 4.7 berikut:



Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Hasil Tanggapan Sistem *Close Loop* PI dan Fuzzy-PI ketika (a) *set point* 100 RPM dan (b) *set point* 75 RPM

Karakteristik kinerja meliputi: waktu tunda, waktu naik, waktu puncak, dan waktu turun, dari sistem pengendali Fuzzy-PI memiliki nilai yang lebih cepat dibandingkan dengan sistem pengendali PI. Nilai *maximum overshoot* (%) dari sistem pengendali Fuzzy-PI juga lebih kecil dibandingkan dengan sistem pengendali PI.

Tabel 4.5 Karakteristik Kinerja Sistem Pengendali PI dan Fuzzy-PI pada Simulasi

Parameter	*Set point* 100 RPM		*Set point* 75 RPM	
	Pengendali PI	Pengendali Fuzzy-PI	Pengendali PI	Pengendali Fuzzy-PI
t_d (s)	1,071	0,392	1,012	0,146
t_r (s)	2,889	0,784	2,933	0,665
t_p (s)	6,176	1,912	6,464	1,963
t_s (s)	15,051	3,790	14,204	3,987
M_p (%)	24,704	7,981	23,022	6,607
e_{ss} (%)	0	0	0	0
t_{ess} (s)	-	-	-	-

Turbin angin merupakan salah satu sistem non linear. Hal tersebut mengakibatkan sistem kendali PI tidak bisa optimal ketika diterapkan pada *plant* turbin angin. Kendala tersebut dapat diatasi dengan menerapkan sistem kendali Fuzzy-PI. Logika Fuzzy digunakan untuk melakukan *tuning* pada parameter kendali PI yaitu *Kp* dan *Ki* (Salomao, *et. al.*, 2012). Aksi kendali dari Logika Fuzzy adalah adanya perubahan nilai parameter *Kp* dan *Ki* ketika putaran turbin angin

belum sesuai dengan *setpoint.* Nilai *error* akan dihitung dan memberikan koreksi ke dalam fungsi keanggotaan logika fuzzy. Ketentuan tersebut juga berlaku saat menghitung nilai *deltaerror.*

4.6 Penerapan Sistem Pengendali Putaran Rotor pada Turbin Angin

Pada bagian ini akan dianalisa mengenai penerapan sistem pengendali kecepatan putar pada turbin angin beserta hasil pengukuran variabel-variabelnya menggunakan sensor.

4.6.1 Pengukuran Kecepatan Angin dan Kecepatan Putar Rotor

Sinyal kendali dari sistem pengendali putaran rotor turbin angin didapatkan dari *feedback* hasil pembacaan sensor optocoupler yang dipasang. Sebelum digunakan, sensor tersebut telah dikalibrasi menggunakan tachometer, seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Sensor anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan angin ketika tepat mengenai bilah pada saat turbin angin beroperasi.

Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Kecepatan Angin dan Kecepatan Putar Rotor

No	Keadaan *blower*			Kecepatan angin (m/s)	Kecepatan putar rotor (RPM)
	A	B	C		
1.	*Low*	*High*	*High*	1.76	102
				1.66	97
				1,78	97
				1,63	101
				1.75	99
2.	*High*	*High*	*Low*	1.83	108
				1.92	108
				1,82	106
				1,91	110
				1.94	113
3.	*High*	*High*	*High*	2.11	161
				2.07	144
				2,05	156
				2,11	152
				2.12	168

Pengambilan data kecepatan angin dan kecepatan putar rotor pada turbin angin menggunakan tiga buah *blower* sebagai sumber angin. Terdapat ketentuan bahwa agar rotor turbin angin dapat berputar, maka minimal terdapat dua buah

blower yang diatur dalam keadaan *high* dan salah satunya adalah *blower* B. Hal tersebut dikarenakan *blower* B mampu menghasilkan angin dengan kecepatan paling besar dibandingkan *blower* A dan C. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.7. Pengambilan data dilakukan dengan meletakkan *blower* di depan sensor anemometer sejauh 3 meter. Hal tersebut sesuai dengan jarak penempatan blower terhadap turbin angin.

Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Kecepatan Angin pada *Blower*

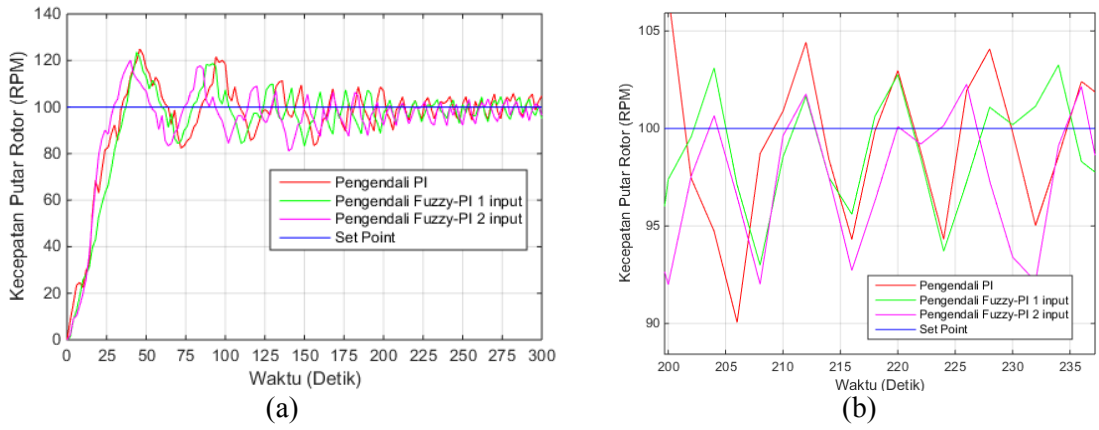
No	*Blower*	Keadaan	Kecepatan angin (m/s)
1	A	*Low*	1,430
			1,470
			1,450
		High	1,510
			1,510
			1,540
2	B	*Low*	1,780
			1,830
			1,770
		High	1,920
			1,940
			1,870
3	C	*Low*	1,520
			1,470
			1,530
		High	1,580
			1,610
			1,620

Hasil pengukuran pada Tabel 4.7 menunjukan bahwa kecepatan angin dan kecepatan rotor maksimal didapatkan ketika keadaan ketiga kipas adalah *high*. Namun demikian, kecepatan angin yang dihasilkan dari ketiga kipas tersebut masih kurang dari spesifikasi kecepatan angin yang dibutuhkan untuk mendapatkan kecepatan putar rotor optimal yaitu 6 m/s. Keadaan tersebut sangat berpengaruh pada hasil ekstraksi energi angin untuk menghasilkan kecepatan putar rotor.

4.6.2 Penerapan Sistem Pengendali PI dan Fuzzy-PI pada Turbin Angin

Simulasi yang telah dilakukkan menunjukkan bahwa sistem pengendali Fuzzy-PI memberikan sinyal tanggapan yang lebih baik dibandingkan dengan

sistem pengendali PI. Hasil simulasi tersebut digunakan untuk merancang dan menerapkan sistem pengendali pada turbin angin. Berikut ini merupakan sinyal respon dari penerapan sistem pengendali pada *plant* turbin angin untuk *set point* 100 RPM:



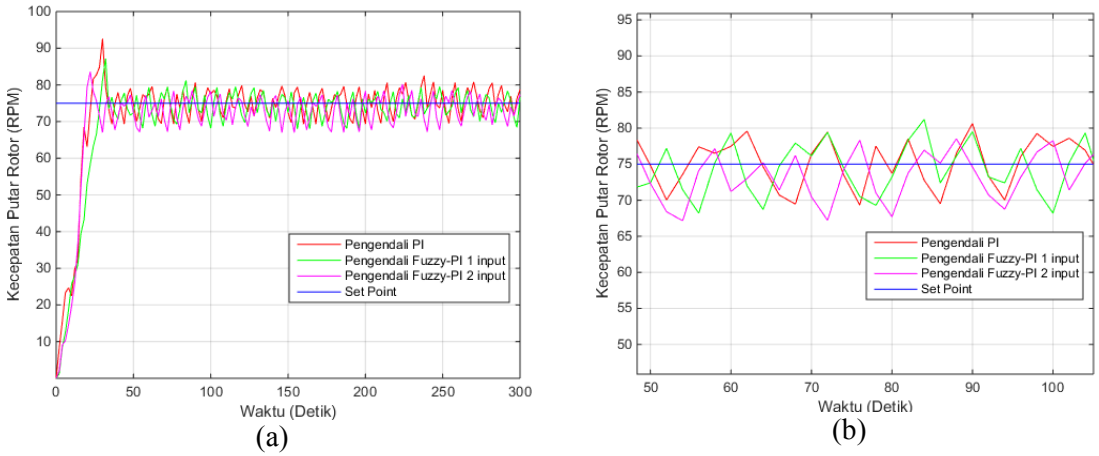
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Hasil Tanggapan Fuzzy-PI dan PI pada *set point* 100 RPM (a) ketika keadaan transien (b) ketika keadaan tunak.

Penggunaan sistem pengendali PI pada *plant* turbin angin menghasilkan grafik performa seperti pada Gambar 4.8. Karakteristik kinerja yang dihasilkan menunjukkan hasil yang telah sesuai dengan simulasi. Karakteristik kinerja meliputi: waktu tunda, waktu naik, waktu puncak, dan waktu turun, serta nilai *maximum overshoot* (%).

Tabel 4.8 Karakteristik Kinerja Sistem Pengendali pada *Plant* Turbin Angin ketika *set point* 100 RPM

Parameter	Fuzzy-PI		PI
	Satu Variabel *Input* pada Fuzzy	Dua Variabel *Input* pada Fuzzy	
t_d (s)	18,528	14,729	17,260
t_r (s)	37,057	29,458	34,520
t_p (s)	44	40	46
t_s (s)	210	202	226
M_p (%)	23,610	20,020	24,930
e_{ss} (%)	19,725	16,134	18,961
t_{ess} (s)	216	209	231

Penerapan sistem pengendali secara *real plant* menggunakan toleransi *error steady state* sebesar 5 %. Hal tersebut berkaitan dengan hasil pembacaan sensor-sensor. Meskipun memiliki hasil pembacaan yang baik, sensor-sensor yang digunakan belum memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Masih terdapat nilai ketidakpastian pengukuran dari sensor-sensor yang digunakan terhadap alat ukur konvensional. Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa sistem pengendali Fuzzy-PI dan PI dapat diterapkan pada plant turbin angin. Namun sesuai dengan hasil simulasi, sistem pengendali Fuzzy-PI dengan dua variabel *input* memberikan respon yang paling baik. Pemberian variasai *set point* dilakukan untuk mengetahui performansi sistem pengendalian. Selain menggunakan set point 100 RPM, pada penelitian ini juga digunakan *set point* sebesar 75 RPM. Sinyal respon dari penerapan sinyal pengendalian ditampilkan pada Gambar 4.7 berikut:



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Hasil Tanggapan Fuzzy-PI dan PI pada set point 75 RPM (a) ketika keadaan transien (b) ketika keadaan tunak.

Hasil penerapan sistem pengendali memberikan karakteristik kinerja yang berbeda dibandingkan dengan hasil simulasi. Penerapan sistem pengendali memberikan waktu tunda, naik, puncak, dan waktu turun yang lebih lama serta *maximum overshoot* yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil simulasi. Hal tersebut disebabkan oleh beberapa faktor, meliputi: Keadaan ideal yang tidak tercapai ketika pengukuran dan pengambilan data; Perbedaan karakteristik *plant* turbin angin ketika diubah menjadi persamaan; Akurasi sensor dibandingkan dengan alat ukur konvensional; dan adanya pengaruh dari mikrokontroler, berupa

pemberian waktu *delay*, serta kecepatan transmisi data. Berikut ini merupakan karakteristik kinerja sistem untuk *set point* 75 RPM :

Tabel 4.9 Karakteristik Kinerja Sistem Pengendali pada *Plant* Turbin Angin ketika *set point* 75 RPM

Parameter	Fuzzy-PI		PI
	Satu Variabel *Input* pada Fuzzy	Dua Variabel *Input* pada Fuzzy	
t_d (s)	17,313	11,571	14,080
t_r (s)	34,626	23,142	28,170
t_p (s)	32	22	30
t_s (s)	82	50	94
M_p (%)	12,710	8,620	17,610
e_{ss} *(%)*	8,823	6,541	9,760
t_{ess} *(s)*	86	57	98

Penerapan sistem pengendali memberikan sinyal tanggapan yang baik. Ketiga sistem pengendali yang digunakan dapat bekerja sesuai dengan harapan yaitu mampu mencapai keadaan *steady*. Namun demikian sistem pengendali Fuzzy-PI dengan dua variabel masukan pada Logika Fuzzy telah terbukti memberikan sinyal tanggapan yang terbaik dibandingkan dengan dua sistem pengendali lainnya.

Salah satu aspek yang menyebabkan kerusakan pada turbin angin adalah pada mekanisme pengendalian kecepatan putar rotor. Ketika kecepatan putar rotor berlebih maka akan menimbulkan banyak permasalahan pada mekanisme turbin angin (Hossain, *et. al.*, 2018). Analisa pada keadaan tunak diperlukan berkaitan dengan tingkat keberhasilan sistem pengendali. Hal tersebut akan memberikan informasi yang sangat penting berkaitan dengan pencegahan kegagalan sistem pada generator.

Setiap generator memiliki batas maksimum *input* putaran. Jika putaran berlebih, maka besar kemungkinan generator akan mengalami kegagalan sistem, baik secara elektrik maupun mekanik. Adanya sistem pengendali yang dikembangkan pada penelitian ini akan memperkecil kemungkinan kegagalan sistem generator tersebut. Sistem pengendali akan membatasi kecepatan putar rotor turbin angin. Berikut ini merupakan perbandingan *error steady state* dari setiap sistem pengendali ketika sudah mencapai keadaan tunak.

Tabel 4.10 Sinyal Tanggapan pada Keadaan Tunak ketika *set point* 100 RPM

Rentang Waktu (s)	RPM	Pengendali PI		Fuzzy-PI satu *input*		Fuzzy-PI dua *input*	
		% e	$\bar{e}$	% e	$\bar{e}$	% e	$\bar{e}$
226-250	101,94	1,94	2,706	2,74	2,217	2,27	3,195
	104,08	4,08		1,09		2,69	
	99,81	0,19		0,19		6,59	
	95,03	4,97		1,14		7,85	
	98,58	1,42		3,26		0,89	
	102,41	2,41		1,7		2,15	
	101,51	1,51		2,6		3,8	
	102,46	2,46		4,86		1,99	
	104,58	4,58		0,1		0,2	
	99,62	0,38		3,14		3,59	
	95,72	4,28		2,81		1,2	
	94,46	5,54		4		4,53	
	101,42	1,42		1,19		3,79	
251-275	104,46	4,46	3,371	2,6	2,482	0,79	2,330
	98,51	1,49		2,19		3,33	
	94,32	5,68		3,54		3,99	
	102,51	2,51		3,8		3,29	
	98,72	1,28		0,2		1,24	
	103,51	3,51		4,32		1,94	
	97,78	2,22		3		0,15	
	94,52	5,48		1,3		3,52	
	101,52	1,52		0,25		0,39	
	105,64	5,64		2,93		4,27	
	98,32	1,68		1,14		3,26	
	95,02	4,98		4,51		1,79	
276-300	101,07	1,07	3,081	0,6	2,461	1,67	2,182
	104,25	4,25		3,28		3,25	
	102,46	2,46		2,27		3,6	
	105,83	5,83		0,8		0,12	
	101,92	1,92		2,66		2,52	
	98,04	1,96		4,24		2,77	
	96,05	3,95		2,61		4,66	
	100,52	0,52		1,11		0,42	
	103,98	3,98		3,51		2,88	
	105,56	5,56		1,78		1	
	98,71	1,29		3,67		1,42	
	102,43	2,43		0,57		0,51	
	104,83	4,83		4,89		3,55	

Tabel 4.11 Sinyal Tanggapan pada Keadaan Tunak ketika *set point* 75 RPM

Rentang Waktu (s)	RPM	Pengendali PI		Fuzzy-PI satu *input*		Fuzzy-PI dua *input*	
		% e	$\bar{e}$	% e	$\bar{e}$	% e	$\bar{e}$
76-100	69.32	7.573	4.336	5.973	4.779	4.440	4.009
	77.51	3.347		7.613		5.320	
	73.72	1.707		2.373		9.720	
	78.51	4.680		4.387		1.653	
	72.78	2.960		8.267		2.587	
	69.52	7.307		3.480		0.200	
	76.52	2.027		1.480		4.693	
	80.64	7.520		6.013		0.520	
	73.32	2.240		2.373		5.693	
	70.02	6.640		3.467		8.347	
	76.07	1.427		2.920		2.387	
	79.25	5.667		4.720		2.227	
	77.46	3.280		9.067		4.333	
101-125	82.6	10.133	3.588	0.267	3.622	4.800	3.643
	76.92	2.560		5.760		0.160	
	73.04	2.613		4.000		3.360	
	71.05	5.267		8.400		3.693	
	75.52	0.693		0.333		6.213	
	78.98	5.307		3.907		0.560	
	74	1.333		1.520		7.840	
	73.71	1.720		6.013		1.333	
	77.43	3.240		0.800		1.893	
	79.83	6.440		4.373		0.680	
	74.54	0.613		7.027		4.733	
	72.65	3.133		1.067		8.453	
126-150	76.89	2.520	3.310	3.547	3.233	1.333	3.653
	71.43	4.760		5.653		4.653	
	76.31	1.747		3.480		0.347	
	78.73	4.973		1.480		3.147	
	77.82	3.760		4.680		0.520	
	73.76	1.653		2.373		6.480	
	70.97	5.373		4.893		10.107	
	76.31	1.747		0.760		0.773	
	73.82	1.573		6.520		2.813	
	77.05	2.733		0.013		2.507	
	79.67	6.227		3.213		10.667	
	76.92	2.560		2.000		3.267	
	72.45	3.400		3.413		0.880	

Pemasangan sistem pengendali pada rotor turbin angin selain digunakan untuk mencegah kegagalan sistem pada generator adalah digunakan untuk mencegah kerusakan pada mekanik turbin angin baik ketika terdapat *drive train* maupun tidak. Penelitian ini menunjukkan bahwa ketiga sistem pengendali mampu memberikan sinyal respon pada keadaan tunak di bawah toleransi *error steady state* yang diberikan yaitu < 5 %. Hasil *error steady state* pada keadaan tunak pada setiap sistem pengendali disajikan pada Tabel 4.10 untuk *set point* 100 RPM dan Tabel 4.11 untuk *set point* 75 RPM. Pemberian skala waktu digunakan pada analisa ini. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui nilai presentase *error* tiap skala waktu.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berbagai hasil dari penelitian ini memberikan gambaran umum yang dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penerapan sistem pengendali pada turbin angin memberikan hasil sinyal tanggapan yang baik. Hal tersebut ditunjukkan dengan kemampuan sistem untuk mencapai *set point*. Hasil percobaan menunjukkan bahwa Logika Fuzzy dengan dua input akan memberikan sinyal tanggapan yang lebih baik dibandingkan dengan satu input. Adanya variabel input tambahan akan memberikan koreksi yang berulang terhadap output, sehingga sinyal tanggapan yang dihasilkan akan semakin baik. Karakteristik tanggapan yang dihasilkan dari sistem pengendali Fuzzy-PI ketika *set point* 100 RPM meliputi $t_d = 14{,}729$ s, $t_r = 29{,}458$ s, $t_p = 40$ s, $t_s = 202$ s, $Mp = 20{,}02$ %, $e_{ss} = 16{,}134$ %, dan $t_{ess} = 209$ s. Sedangkan karakteritik tanggapan yang dihasilkan dari sistem pengendali Fuzzy-PI ketika *set point* 75 RPM meliputi $t_d = 11{,}571$ s, $t_r = 23{,}142$ s, $t_p = 22$ s, $t_s = 50$ s, $Mp = 8{,}620$ %, $e_{ss} = 6{,}541$ %, dan $t_{ess} = 57$ s.

2. Hasil percobaan menunjukkan bahwa sistem pengendali Fuzzy-PI memberikan tanggapan sinyal yang lebih baik dibandingkan sistem pengendali PI. Sistem pengendali Fuzzy akan sesuai ketika digunakan pada *plant* turbin angin yang memiliki karakter non-linear. Karakteristik tanggapan yang dihasilkan dari sistem pengendali Fuzzy-PI ketika *set point* 100 RPM meliputi $t_d = 18{,}528$ s, $t_r = 37{,}057$ s, $t_p = 44$ s, $t_s = 210$ s, $Mp = 23{,}610$ %, $e_{ss} = 19{,}725$ %, dan $t_{ess} = 216$ s. Sedangkan karakteritik tanggapan yang dihasilkan dari sistem pengendali Fuzzy-PI ketika *set point* 75 RPM meliputi $t_d = 17{,}313$ s, $t_r = 34{,}262$ s, $t_p = 32$ s, $t_s = 82$ s, $Mp = 12{,}710$ %, $e_{ss} = 8{,}823$ %, dan $t_{ess} = 86$ s.

5.2 Saran

Berbagai hasil penelitian telah memberikan gambaran hasil yang sudah memuaskan. Namun demikian penelitian ini dapat lebih ditingkatkan lagi untuk memberikan hasil yang lebih baik lagi. Berikut merupakan saran yang disampaikan penulis untuk penelitian selanjutnya :

1. Variabel-variabel turbin angin diukur secara teliti agar mendapatkan pemodelan yang lebih sesuai dengan sistem *real plant*.
2. Menggunakan sensor dengan kualitas yang lebih baik untuk mendapatkan hasil respon sistem kendali yang lebih baik pula.

DAFTAR PUSTAKA

Artanto, Dian. 2012. *Interaksi Arduino dan LabVIEW*. Jakarta: PT Elex Media Komputindo.

Ajayi, O. A. (2012). *Application of Automotive Alternators in Small Wind Turbines*. Delft University of Technology. Delft, Netherlands.

Atacak, I., & Faruk, O. (2012). A type-2 fuzzy logic controller design for buck and boost DC – DC converters. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *23*, 1023–1034. https://doi.org/10.1007/s10845-010-0388-1

Banzi, M. (2011). *Getting started with Arduino*. (B. Jepson, Ed.) (Second). Sebastopol: O'Reilly Media, Inc. USA.

Barhoumi, E., & Ben, salah B. (2011). New Positioning Control of Stepper Motor using BP Neural Networks. *Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, *2*(6), 300–306.

Bianchi, F. D., Battista, H. De, & Mantz, R. J. (2006). *Wind Turbine Control Systems : Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. (M. J. Grimble & M. A. Johnson, Eds.) (Second). Verlag, London, UK: Springer.

Bindu, G. H., & Mandadi, P. N. (2014). Design and Modelling of Induction Generator Wind power Systems by using MATLAB / SIMULINK. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, *3*(8), 11472–11478.

Byrd, D. (2014). Closed-loop motor control : An introduction to rotary resolvers and encoders. *Analog Applications Journal*, *20*, 5–8.

Dababneh, M., Emar, W., & Ttrad, I. (2013). Chopper Control of a Bipolar Stepper Motor. *International Journal of Engineering*, *7*(2), 61–73.

Das, S., Sarkar, T. S., Chakraborty, B., & Dutta, H. S. (2016). Physical Study on Array of Photo-Detector Based Absolute Rotary Encoder. *Sensors & Actuators*, *246*, 114–122. https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.05.026

Feng, J., & Sheng, W. Z. (2012). Control of variable speed pitch-regulated wind turbines in strong wind conditions using a combined feedforward and feedback technique. In *Proceedings of Torque*. The science of making torque from wind ForWind - Center for Wind Energy Research. General.

Gasboui, B., Chaker, A., & Adellah, L. (2011). Multi-input multi-output fuzzy logic controller for utility electric vehicle. *Archieves of Electrical ENgineering*, *60*(3), 239–256. https://doi.org/10.2478/v10171-011-0023-6

Hossain, M. L., Abu-Siada, A., & Muyeen, S. M. (2018). Methods for Advanced Wind Turbine Condition Monitoring and Early Diagnosis: A Literature Review. *MDPI Energies Journal*, *11*(1309). https://doi.org/10.3390/en11051309

Ibrahim, A. M. (2004). *Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications*. Burlington, USA: Elsevier SCience.

Irasari, P. (2011). Experiment and Analysis of Car Alternator for Wind Turbine Application. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, *2*(1), 1–10.

Jackson, D., Anand, M. D., Sivarajan, T., & Prabha, D. M. (2016). Development of Utilizing Magnetic Brake in Small Wind Turbine Speed Control using Fuzzy Logic Controller. *Indian Journal of Science and Technology*, *9*(April), 1–13. https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i13/90560

Kelemen, M., Virgala, I., Miková, Ľ., & Frankovský, P. (2015). Experimental Identification of Linear Actuator Properties. *Acta Mechanica Slovaca*, *19*(1), 42–47.

Keller, J., Guo, Y., McNiff, B., LaCava, W., & Link, H. (2012). Gearbox Reliability Collaborative Phase 1 and 2 : Testing and Modeling Results. In P. Sas, D. Moens, & S. Jonckheere (Eds.), *ISMA International Conference on Noise and Vibration Engineering* (pp. 4371–4380). Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

Kushartanto, J. S. (2015). *The Influence of Indonesia National Renewable Energy Development for Analyzing Entrepreneurship Process on Wind Energy Business*. Aarhus Universitiet. Aarhus, Denmark.

Manyonge, A. W., Ochieng, R. M., Onyango, F. N., & Shichikha, J. M. (2012). Mathematical Modelling of Wind Turbine in a Wind Energy - Conversion System Power Coefficient Analysis. *Applied Mathematical Sciences*, *6*(91), 4527–4536.

Margolis, M. (2011). *Arduino Cookbook*. (B. Jepson & S. S. Laurent, Eds.) (First). O'Reilly Media, Inc. USA.

Martinez, J. (2007). *Modelling and Control of Wind Turbines*. Imperial College London, United Kingdom.

Martosaputro, S., & Murti, N. (2014). Blowing the Wind Energy in Indonesia. *Energy Procedia*, *47*, 273–282. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.225

Mitra, S., & Ojha, A. (2015). Performance Analysis Of BLDC Motor Drive Using PI and Fuzzy Logic Control Scheme. *International Research Journal of Engineering and Technology*, *2*(4), 916–922.

Musyafa', A. (2012). Comparative Analysis Of Small-Scale Wind Turbine Design For The Low Rate Wind Speed. *Asian Journal Of Natural & Applied Sciences*, *1*(3), 5–17.

Musyafa', A., & Al., E. (2010). Pitch Angle Control of Variable Low Rated Speed Wind Turbine Using Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Engineering & Technology*, *1*(5), 1–4.

Nagakumararaj, S. (2017). Steam Temperature Optimization Using Arduino Steam Temperature Optimization Using Arduino Mega 2560 Microcontroller. *Journal of Advance Research in Dynamical & Control Systems*, (13), 291–295.

Petersson, A. (2005). *Analysis , Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines*. Chalmers University Of Technology. Goteberg, Sweden.

Petru, T. (2003). *Modeling of Wind Turbines for Power System Studies Department of Electric Power Engineering*. Chalmers University Of Technology. Goteberg, Sweden.

Ragheb, M., & Adam, R. M. (2011). Fundamental and Advanced Topics in Wind Power Edited. In R. Carriveau (Ed.), *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power Edited*. Rijeka, Croatia: InTech.

Rajendran, S., & Jena, D. (2014). Control of Variable Speed Variable Pitch Wind Turbine at Above and Below Rated Wind Speed. *Hindawi Publishing Corporation*, *2014*. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2014/709128

Ross, T. J. (2004). *Fuzzy Logic With Engineering Applications* (Second). Chichester, Eggland: John Wiley & Sons, Ltd.

Salomao, L. A. . T., Cuatzin, H. G., Marín, J. A., & Castillo, I. I. L. (2012). Fuzzy-PI Control , PI Control and Fuzzy Logic Control Comparison Applied to a Fixed Speed Horizontal Axis 1 . 5 MW Wind Turbine. In *World Congress on Engineering and Computer Science* (Vol. 2). San Francisco, USA: World Congress on Engineering and Computer Science.

Sheng, S., & Veers, P. (2011). Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring – An Overview. In National Renewable Energy Laboratory (Ed.), *Mechanical Failures Prevention Group: Applied Systems Health Management Conference*. Virginia, US: U.S. Department of Commerce National Technical Information Service.

Singh, M., Muljadi, E., Jonkman, J., Gevorgian, V., Girsang, I., & Dhupia, J. (2014). *Simulation for Wind Turbine Generators — With FAST and MATLAB-Simulink Modules*. Springfield, USA.

Sivanandam, S. . N., Sumathi, S., & Deepa, S. N. (2007). *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. New York, USA: Sprimger.

Soriano, L. A., Yu, W., & Rubio, J. de J. (2013). Modeling and Control of Wind Turbine. *Hindawi Publishing Corporation*, *2013*(Mathematical Problems in Engineering). https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2013/982597

Valdez, C. (2013). *Voltage Stabilizer of Generator Output Through Field Current Control Using Fuzzy Logic*. Universiti Tun Hussien Onn, Malaysia.

Vanitha, K., & Shravani, C. (2013). Permanent Magnet Synchronous Generator with Fuzzy Logic Controller for Wind Energy Conversion System. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, *2*(11), 3943–3950.

Vidal, Y., Acho, L., Luo, N., Zapateiro, N., & Pozo, F. (2012). Power Control Design for Variable-Speed Wind Turbines. *MDPI Energies Journal*, *5*, 3033–3050. https://doi.org/10.3390/en5083033

Wang, F., & Stelson, K. A. (2013). Model Predictive Control for Power Optimization in a Hydrostatic Wind Turbine. In *Scandinavian International Conference on Fluid Power* (pp. 155–160). Linköping, Sweden: Scandinavian International Conference on Fluid Power.

Yu, C. C. (2006). *Autotuning of PID Controllers : A Relay Feedback Approach* (Second). Verlag, London, UK: Springer.

LAMPIRAN

A. Hasil Uji dan Kalibrasi Sensor

1. Sensor Optocoupler

Analisa tipe A

- **Pemeriksaan skala**

Rentang (RPM)	Pembacaan Standar (RPM)	Pembacaan Sensor (RPM)	Koreksi (RPM)
0.5	134	131	-3
	133	136	3
	141	143	2
	134	130	4
	136	133	3

Standar deviasi (σ) = 2,476 RPM

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A1}) :

$$U_{A1} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \qquad U_{A1} = \pm 1{,}107 \text{ RPM}$$

Derajat kebebasan (V_1) = 4

- **Pembacaan berulang**

Rentang (RPM)	Rata-rata Pembacaan Standar (RPM)	Rata-rata Pembacaan Sensor (RPM)	Koreksi (RPM)
0,5	134,6	135,6	-1,0
1,1	260,6	256	4,60
1,5	374,4	374,6	-0,2
2	560,0	548,6	11,40
2,6	853,8	823,8	30,00

Persamaan regresi linier (y_{reg}):

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

dengan :

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

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

Sehingga akan didapatkan persamaan regresi linier berupa:

$y_{reg} = -2{,}661 + 0{,}018\ x_i$

Persamaan residu yang digunakan adalah :

$R = y_i - y_{reg}$

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A2}) :

$U_{A2} = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}}$ $U_{A2} = \pm 3{,}148$ RPM

Derajat kebebasan (V_2) = 4

Analisa tipe B

Ketidakpastian resolusi (U_{B1}) :

$U_{B1} = \frac{\frac{1}{2}\text{Resolusi}}{\sqrt{3}}$ $U_{B1} = \pm 0{,}003$ RPM

Ketidakpastian alat standar (U_{B2}) :

Asumsi k = 2,0 $V_4 = 60$ a = 0,006

$U_{B2} = \frac{a}{k}$ $U_{B2} = \pm 0{,}003$

Ketidakpastian gabungan (U_C) :

$U_c = (\sum_{k=1}^{n} C_n . U_n)^{\frac{1}{2}}$ $; C1 \dots \dots \dots Cn = 1$ $U_C = \pm 3{,}337$ RPM

Derajat kebebasan efektif (Veff) :

$V_{eff} = \frac{(Uc)^4}{\sum_{k=1}^{n} \frac{(Un)^4}{Vn}}$ $V_{eff} = 10{,}98634076$

Pendekatan/pembulatan $V_{eff} = 11$

$k = 1{,}7709$

Ketidakpastian diperluas (U_{95}) :

$U_{95} = k\ .\ U_C$ $U_{95} = \pm 5{,}909$ RPM

2. Sensor Anemometer

Analisa tipe A

- **Pemeriksaan skala**

Keadaan Blower			Pembacaan Standar (m/s)	Pembacaan Sensor (m/s)	Koreksi (m/s)
A	B	C			
Low	Low	High	1,54	1,49	-0,05
			1,61	1,52	-0,09
			1,56	1,54	-0,02
			1,52	1,52	0
			1,54	1,51	0,03

Standar deviasi (σ) = 0,034 m/s

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A1}) :

$$U_{A1} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \qquad U_{A1} = \pm 0{,}015 \text{ m/s}$$

Derajat kebebasan (V_1) = 4

Pembacaan berulang

Keadaan Blower			Rata-rata Pembacaan Standar (m/s)	Rata-rata Pembacaan Sensor (m/s)	Koreksi (m/s)
A	B	C			
Low	Low	High	1,5	1,554	-0,038
Low	High	Low	1,7	1,716	-0,016
High	High	Low	1,9	1,884	-0,012
High	High	High	2,2	2,092	0,058

Persamaan regresi linier (y_{reg}):

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

dengan :

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

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

Sehingga akan didapatkan persamaan regresi linier berupa:

$$y_{reg} = -0{,}02 + 0{,}01\ x_i$$

Persamaan residu yang digunakan adalah :

$R = y_i - y_{reg}$

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A2}) :

$U_{A2} = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}}$ $U_{A2} = \pm 0{,}039$ m/s

Derajat kebebasan (V_2) = 2

Analisa tipe B

Ketidakpastian resolusi (U_{B1}) :

$U_{B1} = \frac{\frac{1}{2}\text{Resolusi}}{\sqrt{2}}$ $U_{B1} = \pm 0{,}003$ m/s

Ketidakpastian alat standar (U_{B2}) :

Asumsi k = 2,0 $V_4 = 60$ a = 0,006

$U_{B2} = \frac{a}{k}$ $U_{B2} = \pm 0{,}003$

Ketidakpastian gabungan (U_C) :

$U_c = (\sum_{k=1}^{n} C_n . U_n)^{\frac{1}{2}}$ $; C1 \dots \dots \dots Cn = 1$ $U_C = \pm 0{,}042$ m/s

Derajat kebebasan efektif (Veff) :

$V_{eff} = \frac{(Uc)^4}{\sum_{k=1}^{n} \frac{(Un)^4}{Vn}}$ $V_{eff} = 11{,}668$

Pendekatan/pembulatan $V_{eff} = 12$

$k = 3{,}0545$

Ketidakpastian diperluas (U_{95}) :

$U_{95} = k \, . \, U_C$ $U_{95} = \pm 0{,}129$ m/s

B. Hasil Uji Karakterirtik Motor Stepper

Berikut ini merupakan data hasil pengujian karakteristik motor stepper :

Clock	Step	Derajat	Speed (Step/ Second)
0	0	0	0
328	1	1.8	1
656	2	3.6	2
984	3	5.4	3
1312	4	7.2	4
1640	5	9	5
1968	6	10.8	6
2296	7	12.6	7
2624	8	14.4	8
2952	9	16.2	9
3280	10	18	10
3608	11	19.8	11
3936	12	21.6	12
4264	13	23.4	13
4592	14	25.2	14
4920	15	27	15
5248	16	28.8	16
5576	17	30.6	17
5904	18	32.4	18
6232	19	34.2	19
6560	20	36	20
6888	21	37.8	21
7216	22	39.6	22
7544	23	41.4	23
7872	24	43.2	24
8200	25	45	25
8528	26	46.8	26
8856	27	48.6	27
9184	28	50.4	28
9512	29	52.2	29
9840	30	54	30
10168	31	55.8	31
10496	32	57.6	32
10824	33	59.4	33
11152	34	61.2	34
11480	35	63	35
11808	36	64.8	36

Clock	Step	Derajat	Speed (Step/ Second)
12136	37	66.6	37
12464	38	68.4	38
12792	39	70.2	39
13120	40	72	40
13448	41	73.8	41
13776	42	75.6	42
14104	43	77.4	43
14432	44	79.2	44
14760	45	81	45
15088	46	82.8	46
15416	47	84.6	47
15744	48	86.4	48
16072	49	88.2	49
16400	50	90	50
16728	51	91.8	51
17056	52	93.6	52
17384	53	95.4	53
17712	54	97.2	54
18040	55	99	55
18368	56	100.8	56
18696	57	102.6	57
19024	58	104.4	58
19352	59	106.2	59
19680	60	108	60
20008	61	109.8	61
20336	62	111.6	62
20664	63	113.4	63
20992	64	115.2	64
21320	65	117	65
21648	66	118.8	66
21976	67	120.6	67
22304	68	122.4	68
22632	69	124.2	69
22960	70	126	70
23288	71	127.8	71
23616	72	129.6	72
23944	73	131.4	73

Clock	Step	Derajat	Speed (Step/ Second)
24272	74	133.2	74
24600	75	135	75
24928	76	136.8	76
25256	77	138.6	77
25584	78	140.4	78
25912	79	142.2	79
26240	80	144	80
26568	81	145.8	81
26896	82	147.6	82
27224	83	149.4	83
27552	84	151.2	84
27880	85	153	85
28208	86	154.8	86
28536	87	156.6	87
28864	88	158.4	88
29192	89	160.2	89
29520	90	162	90
29848	91	163.8	91
30176	92	165.6	92
30504	93	167.4	93
30832	94	169.2	94
31160	95	171	95
31488	96	172.8	96
31816	97	174.6	97
32144	98	176.4	98
32472	99	178.2	99
32800	100	180	100
33128	101	181.8	101
33456	102	183.6	102
33784	103	185.4	103
34112	104	187.2	104
34440	105	189	105
34768	106	190.8	106
35096	107	192.6	107
35424	108	194.4	108
35752	109	196.2	109
36080	110	198	110
36408	111	199.8	111
36736	112	201.6	112
37064	113	203.4	113

Clock	Step	Derajat	Speed (Step/ Second)
37392	114	205.2	114
37720	115	207	115
38048	116	208.8	116
38376	117	210.6	117
38704	118	212.4	118
39032	119	214.2	119
39360	120	216	120
39688	121	217.8	121
40016	122	219.6	122
40344	123	221.4	123
40672	124	223.2	124
41000	125	225	125
41328	126	226.8	126
41656	127	228.6	127
41984	128	230.4	128
42312	129	232.2	129
42640	130	234	130
42968	131	235.8	131
43296	132	237.6	132
43624	133	239.4	133
43952	134	241.2	134
44279	135	243	135
44606	136	244.8	136
44933	137	246.6	137
45260	138	248.4	138
45587	139	250.2	139
45914	140	252	140
46241	141	253.8	141
46568	142	255.6	142
46895	143	257.4	143
47222	144	259.2	144
47549	145	261	145
47876	146	262.8	146
48203	147	264.6	147
48530	148	266.4	148
48857	149	268.2	149
49184	150	270	150
49511	151	271.8	151
49838	152	273.6	152
50165	153	275.4	153

Clock	Step	Derajat	Speed (Step/ Second)
54416	166	298.8	166
54743	167	300.6	167
55070	168	302.4	168
55397	169	304.2	169
55724	170	306	170
56051	171	307.8	171
56378	172	309.6	172
56705	173	311.4	173
57032	174	313.2	174
57359	175	315	175
57686	176	316.8	176
58013	177	318.6	177
58340	178	320.4	178
58667	179	322.2	179
58994	180	324	180
59321	181	325.8	181
59648	182	327.6	182
59975	183	329.4	183

Clock	Step	Derajat	Speed (Step/ Second)
60302	184	331.2	184
60629	185	333	185
60956	186	334.8	186
61283	187	336.6	187
61610	188	338.4	188
61937	189	340.2	189
62264	190	342	190
62591	191	343.8	191
62918	192	345.6	192
63245	193	347.4	193
63572	194	349.2	194
63899	195	351	195
64226	196	352.8	196
64553	197	354.6	197
64880	198	356.4	198
65207	199	358.2	199
65534	200	360	200

Halaman ini sengaja dikosongkan

C. Simulasi Sistem Pengendali

Source Code

```
%parameter
c1 = 0.6450;
c2 = 116;
c3 = .4;
c4 = 5;
c5 = 21;
c6 = .00912;
c7 = .08;
c8 = .035;
rho=1.2;
Rj=1.5;
CpMax=.5;
lambda_CpMax=9.9495;
Pnom = 15e6/0.9;
Pmec1 = 15e6;
rated_omegar=1.2;
wind_speed_CpMax = 11;
Prated=Pmec1*1;

%Cp
K1=lambda_CpMax/rated_omegar*wind_speed_CpMax;

Prated=Pmec1*1;
P_rated_omegar_theta_zero=0.75;

K2 =
P_rated_omegar_theta_zero/(wind_speed_CpMax^3*CpMax);

A=3.14*Rj^2;
K3=(0.5*A*rho)/(wind_speed_CpMax^3*CpMax);

% data
wmo = 1.2; % (pu of nominal speed)
init = -0.2;
taug = 0.1;
ng = 1;
```

Halaman ini sengaja dikosongkan

D. Hasil Sinyal Tanggapan Sistem Pengendali

1. Sistem Pengendali PI ketika *set point* 100 RPM

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
0	0.00	-100	0
2	8.24	-91.76	2
4	15.6	-84.4	2
6	23.39	-76.61	2
8	24.65	-75.35	2
10	22.45	-77.55	2
12	29.71	-70.29	2
14	32.33	-67.67	2
16	54.3	-45.7	2
18	68.5	-31.5	2
20	63.13	-36.87	2
22	72.84	-27.16	2
24	81.65	-18.35	2
26	82.7	-17.3	2
28	88.49	-11.51	1
30	92.38	-7.62	1
32	85.64	-14.36	1
34	98.71	-1.29	1
36	103.65	3.65	1
38	105.73	5.73	1
40	112.87	12.87	1
42	117.09	17.09	1
44	119.86	19.86	1
46	124.93	24.93	1
48	122.51	22.51	-2
50	116.72	16.72	-2
52	114.42	14.42	-2
54	109.06	9.06	-2
56	112.87	12.87	-2
58	110.61	10.61	-2
60	104.06	4.06	-2
62	101.32	1.32	-1
64	99.87	-0.13	-1
66	92.64	-7.36	-1
68	98.71	-1.29	-1
70	87.94	-12.06	0

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
72	82.33	-17.67	0
74	83.41	-16.59	0
76	85.62	-14.38	0
78	86.77	-13.23	1
80	91.3	-8.7	1
82	93.07	-6.93	1
84	98.65	-1.35	1
86	102.41	2.41	1
88	103.96	3.96	1
90	108.51	8.51	1
92	110.04	10.04	-1
94	121.65	21.65	-2
96	119.13	19.13	-2
98	120.08	20.08	-2
100	118.61	18.61	-1
102	105.09	5.09	-1
104	102.58	2.58	-1
106	108.73	8.73	-2
108	101.89	1.89	-2
110	98.71	-1.29	-1
112	96.43	-3.57	-1
114	91.44	-8.56	0
116	85.65	-14.35	0
118	86.71	-13.29	0
120	90.98	-9.02	0
122	94.89	-5.11	0
124	98.65	-1.35	1
126	98.71	-1.29	1
128	96.43	-3.57	1
130	101.31	1.31	1
132	108.73	8.73	-1
134	110.65	10.65	-1
136	111.32	11.32	-1
138	100.81	0.81	-1
140	96.84	-3.16	0
142	95.61	-4.39	1

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
144	99.54	-0.46	1
146	104.61	4.61	0
148	109.52	9.52	-1
150	98.71	-1.29	0
152	95.82	-4.18	0
154	90.98	-9.02	1
156	83.42	-16.58	1
158	84.61	-15.39	1
160	89.62	-10.38	1
162	94.78	-5.22	1
164	95.62	-4.38	1
166	102.43	2.43	1
168	107.83	7.83	-1
170	99.54	-0.46	-1
172	96.65	-3.35	0
174	92.41	-7.59	0
176	89.64	-10.36	0
178	101.89	1.89	0
180	96.43	-3.57	0
182	101.31	1.31	0
184	108.73	8.73	-1
186	102.82	2.82	-1
188	98.76	-1.24	-1
190	95.97	-4.03	0
192	93.02	-6.98	0
194	89.74	-10.26	0
196	103.05	3.05	0
198	108.67	8.67	-1
200	106.92	6.92	-1
202	97.45	-2.55	0
204	94.73	-5.27	0
206	90.05	-9.95	0
208	98.71	-1.29	0
210	100.89	0.89	0
212	104.42	4.42	0
214	98.43	-1.57	-1
216	94.31	-5.69	0
218	99.86	-0.14	0
220	102.97	2.97	0
222	98.81	-1.19	0

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
224	94.32	-5.68	0
226	101.94	1.94	0
228	104.08	4.08	-1
230	99.81	-0.19	-1
232	95.03	-4.97	0
234	98.58	-1.42	0
236	102.41	2.41	0
238	101.51	1.51	0
240	102.46	2.46	-1
242	104.58	4.58	-1
244	99.62	-0.38	0
246	95.72	-4.28	0
248	94.46	-5.54	0
250	101.42	1.42	-1
252	104.46	4.46	-1
254	98.51	-1.49	0
256	94.32	-5.68	0
258	102.51	2.51	0
260	98.72	-1.28	0
262	103.51	3.51	0
264	97.78	-2.22	0
266	94.52	-5.48	0
268	101.52	1.52	0
270	105.64	5.64	-1
272	98.32	-1.68	-1
274	95.02	-4.98	0
276	101.07	1.07	0
278	104.25	4.25	-1
280	102.46	2.46	-1
282	105.83	5.83	-1
284	101.92	1.92	-1
286	98.04	-1.96	-1
288	96.05	-3.95	0
290	100.52	0.52	0
292	103.98	3.98	-1
294	105.56	5.56	-1
296	98.71	-1.29	0
298	102.43	2.43	0
300	104.83	4.83	-1

2. Sistem Pengendali Fuzzy-PI dengan satu variabel masukan pada Logika Fuzzy ketika *set point* 100 RPM

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
0	0	-100	0
2	1.24	-98.76	2
4	8.56	-91.44	2
6	12.61	-87.39	2
8	18.72	-81.28	2
10	25.65	-74.35	2
12	28.07	-71.93	2
14	31.01	-68.99	2
16	39.52	-60.48	2
18	43.14	-56.86	2
20	52.98	-47.02	2
22	58.26	-41.74	2
24	63.13	-36.87	1
26	66.52	-33.48	1
28	73.33	-26.67	1
30	81.38	-18.62	1
32	87.17	-12.83	1
34	91.06	-8.94	1
36	97.39	-2.61	1
38	102.33	2.33	1
40	111.55	11.55	1
42	115.77	15.77	1
44	123.61	23.61	1
46	121.19	21.19	-1
48	115.4	15.4	-1
50	113.1	13.1	-1
52	107.74	7.74	-1
54	111.55	11.55	-1
56	109.29	9.29	-1
58	102.74	2.74	-1
60	100	0	-2
62	98.55	-1.45	-2
64	91.32	-8.68	-2

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
66	97.39	2.61	-2
68	86.62	-13.38	-2
70	84.3	-15.7	-2
72	85.45	-14.55	-1
74	89.98	-10.02	-1
76	91.75	-8.25	-1
78	97.33	-2.67	-1
80	101.09	1.09	-1
82	102.64	2.64	0
84	107.19	7.19	0
86	108.72	8.72	0
88	118.33	18.33	0
90	117.81	17.81	-1
92	118.76	18.76	-1
94	117.29	17.29	-1
96	103.77	3.77	-1
98	101.26	1.26	1
100	107.41	7.41	1
102	100.57	0.57	1
104	97.39	-2.61	1
106	95.11	-4.89	-1
108	90.12	-9.88	-2
110	84.33	-15.67	-2
112	85.39	-14.61	-2
114	89.66	-10.34	-1
116	93.57	-6.43	-1
118	97.33	-2.67	-1
120	97.39	-2.61	-2
122	95.11	-4.89	-2
124	99.99	-0.01	-1
126	107.41	7.41	-1
128	109.33	9.33	0
130	110	10	0
132	99.49	-0.51	0
134	95.52	-4.48	0
136	94.29	-5.71	0
138	98.22	-1.78	1
140	103.29	3.29	1

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
142	108.2	8.2	1
144	97.39	-2.61	1
146	94.5	-5.5	-1
148	89.66	-10.34	-1
150	83.29	-16.71	-1
152	88.3	-11.7	0
154	93.46	-6.54	1
156	94.3	-5.7	1
158	101.11	1.11	0
160	106.51	6.51	-1
162	98.22	-1.78	0
164	95.33	-4.67	0
166	91.09	-8.91	1
168	88.32	-11.68	1
170	100.57	0.57	1
172	95.11	-4.89	1
174	99.99	-0.01	1
176	107.41	7.41	1
178	101.5	1.5	1
180	97.44	-2.56	-1
182	94.65	-5.35	-1
184	91.7	-8.3	0
186	88.42	-11.58	0
188	101.73	1.73	0
190	107.35	7.35	0
192	105.6	5.6	0
194	96.13	-3.87	0
196	93.41	-6.59	-1
198	88.73	-11.27	-1
200	97.39	-2.61	-1
202	99.57	-0.43	0
204	103.1	3.1	0
206	97.11	-2.89	0
208	92.99	-7.01	0
210	98.54	-1.46	-1
212	101.65	1.65	-1
214	97.49	-2.51	0
216	95.6	-4.4	0
218	100.62	0.62	0
220	102.76	2.76	0
222	98.49	-1.51	0
224	96.71	-3.29	0

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
226	97.26	-2.74	-1
228	101.09	1.09	0
230	100.19	0.19	0
232	101.14	1.14	0
234	103.26	3.26	0
236	98.3	-1.7	0
238	97.4	-2.6	0
240	95.14	-4.86	-1
242	100.1	0.1	-1
244	103.14	3.14	0
246	97.19	-2.81	0
248	96	-4	0
250	101.19	1.19	0
252	97.4	-2.6	-1
254	102.19	2.19	-1
256	96.46	-3.54	0
258	96.2	-3.8	0
260	100.2	0.2	0
262	104.32	4.32	-1
264	97	-3	-1
266	98.7	-1.3	0
268	99.75	-0.25	0
270	102.93	2.93	0
272	101.14	1.14	0
274	104.51	4.51	0
276	100.6	0.6	0
278	96.72	-3.28	0
280	97.73	-2.27	0
282	99.2	-0.8	-1
284	102.66	2.66	-1
286	104.24	4.24	0
288	97.39	-2.61	0
290	101.11	1.11	-1
292	103.51	3.51	-1
294	98.22	-1.78	-1
296	96.33	-3.67	-1
298	100.57	0.57	-1
300	95.11	-4.89	0

3. Sistem Pengendali Fuzzy-PI dengan dua variabel masukan pada Logika Fuzzy ketika *set point* 100 RPM

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
0	0	-100	0
2	2.03	-97.97	2
4	9.06	-90.94	2
6	10.31	-89.69	2
8	14.62	-85.38	2
10	19.76	-80.24	2
12	25.92	-74.08	2
14	36.52	-63.48	2
16	51.99	-48.01	2
18	66.19	-33.81	2
20	79.34	-20.66	2
22	86.18	-13.82	2
24	90.07	-9.93	1
26	88.32	-11.68	1
28	96.4	-3.6	1
30	101.34	1.34	1
32	103.42	3.42	1
34	110.56	10.56	1
36	114.78	14.78	1
38	117.55	17.55	1
40	120.2	20.2	-1
42	114.41	14.41	-1
44	112.11	12.11	-1
46	110.56	10.56	-1
48	108.3	8.3	-1
50	106.75	6.75	-1
52	101.75	1.75	-1
54	99.01	-0.99	-1
56	97.56	-2.44	0
58	90.33	-9.67	0
60	96.4	-3.6	-1
62	85.63	-14.37	-1
64	83.31	-16.69	-2
66	84.46	-15.54	-2
68	88.99	-11.01	-2
70	90.76	-9.24	-2
72	96.34	-3.66	-2
74	100.1	0.1	-1
76	101.65	1.65	-1

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
78	106.2	6.2	-2
80	107.73	7.73	-2
82	116.82	16.82	-1
84	117.77	17.77	-1
86	116.3	16.3	0
88	102.78	2.78	0
90	100.27	0.27	0
92	104.42	4.42	1
94	99.58	-0.42	1
96	96.4	-3.6	1
98	94.12	-5.88	1
100	89.13	-10.87	1
102	84.4	-15.6	-1
104	88.67	-11.33	-2
106	92.58	-7.42	-2
108	96.34	-3.66	-2
110	96.4	-3.6	-1
112	94.12	-5.88	-1
114	99	-1	-1
116	106.42	6.42	-2
118	108.34	8.34	-2
120	109.01	9.01	-1
122	98.5	-1.5	-1
124	94.53	-5.47	0
126	93.3	-6.7	0
128	97.23	-2.77	0
130	102.3	2.3	0
132	107	7	0
134	96.4	-3.6	1
136	93.51	-6.49	1
138	88.67	-11.33	1
140	81.11	-18.89	1
142	82.3	-17.7	-1
144	87.31	-12.69	-1
146	92.47	-7.53	-1
148	93.31	-6.69	-1
150	100.12	0.12	0
152	105.52	5.52	1
154	97.23	-2.77	1

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
156	94.34	-5.66	0
158	90.1	-9.9	-1
160	87.33	-12.67	0
162	99.58	-0.42	0
164	94.12	-5.88	1
166	99	-1	1
168	106.42	6.42	1
170	100.51	0.51	1
172	96.45	-3.55	1
174	93.66	-6.34	1
176	90.71	-9.29	1
178	87.43	-12.57	-1
180	100.74	0.74	-1
182	106.36	6.36	0
184	104.61	4.61	0
186	95.14	-4.86	0
188	92.42	-7.58	0
190	87.74	-12.26	0
192	96.4	-3.6	0
194	98.58	-1.42	-1
196	102.11	2.11	-1
198	96.12	-3.88	-1
200	92	-8	0
202	97.55	-2.45	0
204	100.66	0.66	0
206	96.5	-3.5	-1
208	92.01	-7.99	-1
210	99.63	-0.37	-1
212	101.77	1.77	0
214	97.5	-2.5	0
216	92.72	-7.28	0
218	96.27	-3.73	0
220	100.1	0.1	0
222	99.2	-0.8	-1
224	100.15	0.15	-1
226	102.27	2.27	-1
228	97.31	-2.69	0
230	93.41	-6.59	0
232	92.15	-7.85	0
234	99.11	-0.89	0
236	102.15	2.15	-1
238	96.2	-3.8	-1
240	98.01	-1.99	-1
242	100.2	0.2	0
244	96.41	-3.59	0

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
244	96.41	-3.59	0
246	101.2	1.2	0
248	95.47	-4.53	0
250	92.21	-7.79	-1
252	99.21	-0.79	-1
254	103.33	3.33	-1
256	96.01	-3.99	0
258	92.71	-7.29	0
260	98.76	-1.24	-1
262	101.94	1.94	-1
264	100.15	0.15	-1
266	103.52	3.52	-1
268	99.61	-0.39	0
270	95.73	-4.27	0
272	93.74	-6.26	0
274	98.21	-1.79	0
276	101.67	1.67	0
278	103.25	3.25	-1
280	96.4	-3.6	-1
282	100.12	0.12	-1
284	102.52	2.52	0
286	97.23	-2.77	0
288	95.34	-4.66	0
290	99.58	-0.42	-1
292	94.12	-5.88	-1
294	99	-1	-1
296	101.42	1.42	-1
298	100.51	0.51	0
300	96.45	-3.55	0

4. Sistem Pengendali PI ketika *set point* 75 RPM

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
0	0.00	-75	0
2	8.24	-66.76	1
4	15.6	-59.4	1
6	23.39	-51.61	1
8	24.65	-50.35	2
10	22.45	-52.55	2
12	29.71	-45.29	2
14	32.33	-42.67	2
16	54.3	-20.7	2
18	68.5	-6.5	2
20	63.13	-11.87	2
22	72.84	-2.16	2
24	81.65	6.65	2
26	82.7	7.7	2
28	84.8	9.8	0
30	92.61	17.61	0
32	79.42	4.42	0
34	73.43	-1.57	-1
36	69.31	-5.69	0
38	74.86	-0.14	0
40	77.97	2.97	0
42	73.81	-1.19	0
44	69.32	-5.68	0
46	76.94	1.94	0
48	79.08	4.08	-1
50	74.81	-0.19	-1
52	70.03	-4.97	0
54	73.58	-1.42	0
56	77.41	2.41	0
58	76.51	1.51	0
60	77.46	2.46	-1
62	79.58	4.58	-1
64	74.62	-0.38	0
66	70.72	-4.28	0
68	69.46	-5.54	0
70	76.42	1.42	-1

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
72	79.46	4.46	-1
74	73.51	-1.49	0
76	69.32	-5.68	0
78	77.51	2.51	0
80	73.72	-1.28	0
82	78.51	3.51	0
84	72.78	-2.22	0
86	69.52	-5.48	0
88	76.52	1.52	0
90	80.64	5.64	-1
92	73.32	-1.68	-1
94	70.02	-4.98	0
96	76.07	1.07	0
98	79.25	4.25	-1
100	77.46	2.46	-1
102	82.6	7.6	-1
104	76.92	1.92	-1
106	73.04	-1.96	-1
108	71.05	-3.95	0
110	75.52	0.52	0
112	78.98	3.98	-1
114	74	-1	-1
116	73.71	-1.29	0
118	77.43	2.43	0
120	79.83	4.83	-1
122	74.54	-0.46	0
124	72.65	-2.35	0
126	76.89	1.89	0
128	71.43	-3.57	0
130	76.31	1.31	0
132	78.73	3.73	-1
134	77.82	2.82	-1
136	73.76	-1.24	0
138	70.97	-4.03	0
140	76.31	1.31	0
142	73.82	-1.18	0

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
144	77.05	2.05	-1
146	79.67	4.67	-1
148	76.92	1.92	-1
150	72.45	-2.55	0
152	69.73	-5.27	0
154	77.89	2.89	0
156	79.42	4.42	-1
158	75.43	0.43	-1
160	69.31	-5.69	0
162	74.86	-0.14	0
164	77.97	2.97	0
166	73.81	-1.19	0
168	69.32	-5.68	0
170	76.94	1.94	0
172	79.08	4.08	-1
174	74.81	-0.19	-1
176	70.03	-4.97	0
178	73.58	-1.42	0
180	77.41	2.41	-1
182	76.51	1.51	-1
184	77.46	2.46	-1
186	79.58	4.58	-1
188	74.62	-0.38	0
190	70.72	-4.28	0
192	69.46	-5.54	0
194	76.42	1.42	0
196	79.46	4.46	-1
198	73.51	-1.49	-1
200	69.32	-5.68	0
202	77.51	2.51	0
204	73.72	-1.28	0
206	78.51	3.51	-1
208	72.78	-2.22	-1
210	69.52	-5.48	0
212	76.52	1.52	0
214	80.64	5.64	-1
216	73.32	-1.68	0
218	70.02	-4.98	0
220	76.07	1.07	0
222	79.25	4.25	-1

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
224	224	77.46	-1
226	226	80.73	-1
228	228	75.81	-1
230	230	71.84	0
232	232	70.61	0
234	234	74.54	0
236	236	79.61	-1
238	238	82.52	-1
240	240	73.71	0
242	242	77.43	0
244	244	80.83	-1
246	246	74.54	-1
248	248	73.72	0
250	250	78.51	0
252	252	72.78	0
254	254	69.52	0
256	256	76.52	0
258	258	80.64	-1
260	260	73.32	-1
262	262	70.02	0
264	264	76.07	0
266	266	79.25	-1
268	268	77.46	-1
270	270	80.83	-1
272	272	76.92	-1
274	274	73.04	-1
276	276	71.05	0
278	278	75.52	0
280	280	78.98	-1
282	282	80.56	-1
284	284	73.71	0
286	286	77.43	0
288	288	79.83	-1
290	290	74.54	0
292	292	72.65	0
294	294	76.89	0
296	296	71.43	0
298	298	76.31	0
300	300	78.73	-1

5. Sistem Pengendali Fuzzy-PI dengan satu variabel masukan pada Logika Fuzzy ketika *set point* 75 RPM

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
0	0	-75	0
2	1.24	-73.76	1
4	8.56	-66.44	1
6	12.61	-62.39	2
8	18.72	-56.28	2
10	25.65	-49.35	2
12	28.07	-46.93	2
14	31.01	-43.99	2
16	39.52	-35.48	2
18	43.14	-31.86	2
20	52.98	-22.02	2
22	58.26	-16.74	2
24	63.13	-11.87	1
26	66.52	-8.48	1
28	73.33	-1.67	1
30	81.38	6.38	1
32	87.17	12.17	1
34	73.54	-1.46	-1
36	76.65	1.65	0
38	72.49	-2.51	0
40	70.6	-4.4	0
42	75.62	0.62	0
44	77.76	2.76	0
46	73.49	-1.51	0
48	71.71	-3.29	-1
50	72.4	-2.6	-1
52	77.19	2.19	0
54	71.46	-3.54	0
56	68.2	-6.8	0
58	75.2	0.2	0
60	79.32	4.32	-1
62	72	-3	-1
64	68.7	-6.3	0
66	74.75	-0.25	0
68	77.93	2.93	0
70	76.14	1.14	-1

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
72	79.41	4.41	-1
74	74.49	-0.51	0
76	70.52	-4.48	0
78	69.29	-5.71	-1
80	73.22	-1.78	0
82	78.29	3.29	0
84	81.2	6.2	0
86	72.39	-2.61	-1
88	76.11	1.11	-1
90	79.51	4.51	-1
92	73.22	-1.78	-1
94	72.4	-2.6	0
96	77.19	2.19	0
98	71.46	-3.54	0
100	68.2	-6.8	-1
102	75.2	0.2	-1
104	79.32	4.32	0
106	72	-3	0
108	68.7	-6.3	-1
110	74.75	-0.25	-1
112	77.93	2.93	0
114	76.14	1.14	0
116	79.51	4.51	0
118	75.6	0.6	0
120	71.72	-3.28	0
122	69.73	-5.27	-1
124	74.2	-0.8	-1
126	77.66	2.66	0
128	79.24	4.24	0
130	72.39	-2.61	-1
132	76.11	1.11	-1
134	78.51	3.51	-1
136	73.22	-1.78	-1
138	71.33	-3.67	-1
140	75.57	0.57	0
142	70.11	-4.89	0

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
144	74.99	-0.01	-1
146	77.41	2.41	-1
148	76.5	1.5	0
150	72.44	-2.56	0
152	78.1	3.1	0
154	74.11	-0.89	0
156	67.99	-7.01	0
158	73.54	-1.46	-1
160	76.65	1.65	-1
162	72.49	-2.51	-1
164	68	-7	0
166	75.62	0.62	0
168	77.76	2.76	0
170	73.49	-1.51	-1
172	68.71	-6.29	-1
174	72.26	-2.74	0
176	76.09	1.09	0
178	75.19	0.19	0
180	76.14	1.14	0
182	78.26	3.26	0
184	73.3	-1.7	0
186	69.4	-5.6	-1
188	68.14	-6.86	-1
190	75.1	0.1	0
192	78.14	3.14	0
194	72.19	-2.81	-1
196	68	-7	-1
198	76.19	1.19	-1
200	72.26	-2.74	0
202	76.09	1.09	0
204	75.19	0.19	0
206	76.14	1.14	0
208	78.26	3.26	0
210	73.3	-1.7	0
212	72.4	-2.6	-1
214	70.14	-4.86	-1
216	75.1	0.1	0
218	78.14	3.14	0
220	72.19	-2.81	0
222	71	-4	0

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
224	76.19	1.19	-1
226	72.4	-2.6	-1
228	77.19	2.19	0
230	71.46	-3.54	0
232	71.2	-3.8	0
234	75.2	0.2	-1
236	79.32	4.32	-1
238	72	-3	0
240	73.7	-1.3	0
242	74.75	-0.25	0
244	77.93	2.93	0
246	76.14	1.14	0
248	79.51	4.51	0
250	75.6	0.6	0
252	71.72	-3.28	0
254	72.73	-2.27	-1
256	74.2	-0.8	-1
258	77.66	2.66	0
260	79.24	4.24	0
262	72.39	-2.61	-1
264	76.11	1.11	-1
266	78.51	3.51	-1
268	73.22	-1.78	-1
270	71.33	-3.67	-1
272	75.57	0.57	0
274	70.11	-4.89	0
276	74.99	-0.01	-1
278	77.41	2.41	-1
280	76.5	1.5	0
282	72.44	-2.56	0
284	69.65	-5.35	-1
286	74.99	-0.01	0
288	72.5	-2.5	0
290	75.73	0.73	0
292	78.35	3.35	0
294	75.6	0.6	0
296	71.13	-3.87	-1
298	68.41	-6.59	-1
300	76.57	1.57	0

6. Sistem Pengendali Fuzzy-PI dengan dua variabel masukan pada Logika Fuzzy ketika *set point* 75 RPM

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
0	0	-75	0
2	2.03	-72.97	1
4	9.06	-65.94	1
6	10.31	-64.69	2
8	14.62	-60.38	2
10	19.76	-55.24	2
12	25.92	-49.08	2
14	36.52	-38.48	2
16	51.99	-23.01	2
18	66.19	-8.81	2
20	79.34	4.34	2
22	83.62	8.62	2
24	78.18	3.18	0
26	75.66	0.66	0
28	71.5	-3.5	-1
30	67.01	-7.99	-1
32	74.63	-0.37	-1
34	76.77	1.77	0
36	72.5	-2.5	0
38	67.72	-7.28	0
40	71.27	-3.73	0
42	75.1	0.1	0
44	74.2	-0.8	-1
46	75.15	0.15	-1
48	77.27	2.27	-1
50	72.31	-2.69	0
52	68.41	-6.59	0
54	67.15	-7.85	0
56	74.11	-0.89	0
58	77.15	2.15	-1
60	71.2	-3.8	-1
62	73.01	-1.99	-1
64	75.2	0.2	0
66	71.41	-3.59	0
68	76.2	1.2	0
70	70.47	-4.53	0

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
72	67.21	-7.79	-1
74	74.21	-0.79	-1
76	78.33	3.33	-1
78	71.01	-3.99	0
80	67.71	-7.29	0
82	73.76	-1.24	-1
84	76.94	1.94	-1
86	75.15	0.15	-1
88	78.52	3.52	-1
90	74.61	-0.39	0
92	70.73	-4.27	0
94	68.74	-6.26	0
96	73.21	-1.79	0
98	76.67	1.67	0
100	78.25	3.25	-1
102	71.4	-3.6	-1
104	75.12	0.12	-1
106	77.52	2.52	0
108	72.23	-2.77	0
110	70.34	-4.66	0
112	74.58	-0.42	-1
114	69.12	-5.88	-1
116	74	-1	-1
118	76.42	1.42	-1
120	75.51	0.51	0
122	71.45	-3.55	0
124	68.66	-6.34	-1
126	74	-1	-1
128	71.51	-3.49	0
130	74.74	-0.26	0
132	77.36	2.36	-1
134	74.61	-0.39	-1
136	70.14	-4.86	0
138	67.42	-7.58	0
140	75.58	0.58	0
142	77.11	2.11	-1

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
144	73.12	-1.88	-1
146	67	-8	-1
148	72.55	-2.45	0
150	75.66	0.66	0
152	71.5	-3.5	0
154	67.01	-7.99	0
156	74.63	-0.37	-1
158	76.77	1.77	-1
160	72.5	-2.5	-1
162	67.72	-7.28	0
164	71.27	-3.73	0
166	75.1	0.1	0
168	74.2	-0.8	-1
170	75.15	0.15	-1
172	77.27	2.27	-1
174	72.31	-2.69	0
176	68.41	-6.59	0
178	67.15	-7.85	0
180	74.11	-0.89	0
182	77.15	2.15	-1
184	71.2	-3.8	-1
186	67.01	-7.99	-1
188	75.2	0.2	0
190	71.41	-3.59	0
192	76.2	1.2	-1
194	70.47	-4.53	-1
196	67.21	-7.79	-1
198	74.21	-0.79	0
200	78.33	3.33	0
202	71.01	-3.99	0
204	67.71	-7.29	0
206	73.76	-1.24	0
208	76.94	1.94	-1
210	75.15	0.15	-1
212	78.42	3.42	-1
214	73.5	-1.5	0
216	69.53	-5.47	0
218	68.3	-6.7	0
220	72.23	-2.77	-1
222	77.3	2.3	-1

Time	Putaran rotor (RPM)	Error	Jumlah Step
224	80.21	5.21	-1
226	71.4	-3.6	-1
228	75.12	0.12	0
230	78.52	3.52	0
232	72.23	-2.77	0
234	71.41	-3.59	-1
236	76.2	1.2	-1
238	70.47	-4.53	-1
240	67.21	-7.79	-1
242	74.21	-0.79	0
244	78.33	3.33	0
246	71.01	-3.99	0
248	67.71	-7.29	-1
250	73.76	-1.24	-1
252	76.94	1.94	0
254	75.15	0.15	0
256	78.52	3.52	-1
258	74.61	-0.39	-1
260	70.73	-4.27	0
262	68.74	-6.26	0
264	73.21	-1.79	0
266	76.67	1.67	0
268	78.25	3.25	-1
270	71.4	-3.6	-1
272	75.12	0.12	-1
274	77.52	2.52	-1
276	72.23	-2.77	0
278	70.34	-4.66	0
280	74.58	-0.42	-1
282	69.12	-5.88	-1
284	74	-1	-1
286	76.42	1.42	-1
288	75.51	0.51	0
290	71.45	-3.55	0
292	68.66	-6.34	0
294	74	-1	0
296	71.51	-3.49	0
298	74.74	-0.26	0
300	77.36	2.36	-1

BIODATA

ALEX TAUFIQURROHMAN ZAIN merupakan nama lengkap penulis dengan nama panggilan Alex. Penulis dilahirkan di Jombang 17 Oktober 1993 sebagai anak pertama dari 3 bersaudara. Riwayat pendidikan penulis adalah MI Miftahul Huda, Diwek, Jombang (1999-2005), MTs N Diwek (2005-2008), MAN Jombang (2008-2011), Jurusan Fisika FMIPA Universitas Jember (2011-2015). Penulis diterima sebagai mahasiswa S2 Teknik Fisika FTI ITS di bidang keahlian rekayasa instrumentasi industri pada tahun 2016. Penulis fokus pada bidang rekayasa instrumentasi dan kontrol untuk turbin angin sebagai penelitian tesisnya. Penulis dapat dihubungi melalui email Alex16@mhs.ep.its.ac.id.

Halaman ini sengaja dikosongkan