



TUGAS AKHIR - TF 141581

PERANCANGAN SISTEM FAULT TOLERANCE FUZZY CONTROL PADA TURBIN ANGIN DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR

**ALIEF GHAZI
NRP. 2413 100 043**

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

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

“Halaman ini memang dikosongkan”



FINAL PROJECT - TF 141581

**DESIGN OF FAULT TOLERANCE FUZZY
CONTROL SYSTEM ON WIND TURBINE
WITH ERRORS ON SENSOR**

ALIEF GHAZI
NRP. 2413 100 043

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

ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

“Halaman ini memang dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Alief Ghazi
NRP : 2413100043
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Perancangan Sistem Fault Tolerance Fuzzy Control Pada Turbin Angin Dengan Kesalahan Pada Sensor" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Surabaya, 17 Juli 2017
Yang membuat pernyataan,



Alief Ghazi
NRP. 2413100043

“Halaman ini memang dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

PERANCANGAN SISTEM FAULT TOLERANCE
FUZZY CONTROL PADA TURBIN ANGIN DENGAN
KESALAHAN PADA SENSOR

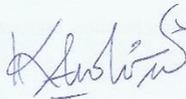
Oleh:

Alief Ghazi

NRP. 2413 100 043

Surabaya, 17 Juli 2017

Menyetujui,
Dosen Pembimbing



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

NIPN. 19760523 200012 2 001

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Elektro FTI-ITS



Agus Murniawan Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.

NIPN. 19780902 200312 1 002

“Halaman ini memang dikosongkan”

**LEMBAR PENGESAHAN
PERANCANGAN SISTEM FAULT TOLERANCE
FUZZY CONTROL PADA TURBIN ANGIN DENGAN
KESALAHAN PADA SENSOR**

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

ALIEF GHAZI
NRP. 2413 100 043

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  (Pembimbing)
2. Hendra Cordova, ST, MT  (Penguji I)
3. Dr. Imam Abadi, ST, MT (Penguji II)
4. Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D.  (Penguji III)

**SURABAYA
JULI, 2017**

“Halaman ini memang dikosongkan”

PERANCANGAN SISTEM FAULT TOLERANCE FUZZY CONTROL PADA TURBIN ANGIN DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR

Nama : Alief Ghazi
NRP : 2413 100 043
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.

Abstrak

Turbin angin menghasilkan daya tergantung dari interaksi antara rotor dan angin. Daya yang dihasilkan terkadang tidak sesuai dengan hasil sebenarnya (hasil pembacaan) sehingga dikatakan terdapat kesalahan pada sensor. Turbin angin tersebut akan dikendalikan oleh Fuzzy PI controller dimana akan dikombinasikan dengan perancangan sistem FTC (*Fault Tolerance Control*) yang dapat mentolerir kegagalan komponen, tetap menjaga kinerja dan stabilitas yang diinginkan. Pengendalian Proportional dan integral yang diterapkan pada fuzzy PI controller didapatkan sebesar 0.14 dan 0.18. Berdasarkan hasil pengujian turbin angin dengan memberikan kesalahan bias sebesar 1%, 5%, 10% dan 20% serta kesalahan sensitivitas sebesar 90%, 85% dan 80% maka dapat disimpulkan bahwa FTC mampu mengestimasi dan mengakomodasi kesalahan sehingga respon sistem dapat kembali ke *set point*. FTC juga memiliki batas toleransi kesalahan minimum dan maksimum yaitu 30% dan 100%, karena $error > 2\%$.

Kata Kunci : Fault Tolerance Control, Fuzzy PI, Sensor

“Halaman ini memang dikosongkan”

**DESIGN OF FAULT TOLERANCE FUZZY CONTROL
SYSTEM ON WIND TURBINE WITH ERRORS ON
SENSOR**

Name : Alief Ghazi
NRP : 2413 100 043
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisors : Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.

Abstract

The wind turbine produces power depending on the interaction between rotor and wind. The wind turbine will be controlled by Fuzzy PI controller which will be combined with FTC (Fault Tolerance Control) method which can tolerate component failure, while maintaining the desired performance and stability so that it is said to be a tolerant control system. Proportional and integral gain that applied to the fuzzy PI controller are 0.14 and 0.18. Based on wind turbine test results by giving 1%, 5%, 10% and 20% bias error and also sensitivity error at 90%, 85% and 80%, it can be concluded that FTC can estimate and accommodate errors so that the system response can return to set point. FTC also has a minimum and maximum tolerance limit of 30% and 100%, due to error > 2%.

Keywords : *Fault Tolerance Control, Fuzzy PI, Sensor*

“Halaman ini memang dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **“PERANCANGAN SISTEM FAULT TOLERANCE FUZZY CONTROL PADA TURBIN ANGIN DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR”**.

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Instrumensi yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Sekartedjo M.Sc selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.
5. Kedua orang tua (Bapak Hakam Abubakar dan Ibu Ardayati Ratna). Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
6. Seluruh teman Tugas Akhir (Alif Helmi Aghnia, Ivan Taufik Akbar dan Viqi Bhagaskara) dan teman seperjuangan (Ayu Fitriyah, Ilham Bintang, Laurien Merindha, Shinta Aprilia, Farida Ambarwati, Hafizh Rifqi, Januar Ananta, Ira Nur, Mochamad Wahyu Ardiatama), terima kasih untuk semuanya.
7. Seluruh teman – teman Departemen Teknik Fisika angkatan 2013, terima kasih untuk semuanya.

8. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

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

Surabaya, 20 Juni 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul	xi
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	xiv
LEMBAR PENGESAHAN I	xvii
LEMBAR PENGESAHAN II	xviii
Abstrak	xx
<i>Abstract</i>	xii
KATA PENGANTAR	xiv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Turbin Angin	3
2.2 FTCS	8
2.3 Pemodelan Dinamik dari Turbin Angin	11
2.4 Observer	13
2.5 <i>Fuzzy proportional integral controller</i>	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Studi profil angin dan penentuan spesifikasi turbin angin	21
3.2 Pembuatan Model Turbin Angin dalam Matlab	23
3.3 Perancangan <i>State Space Observer</i>	25
3.4 Perancangan <i>Fuzzy Control</i>	27
3.5 Perancangan <i>Fault Tolerance Fuzzy Control</i>	29
3.6 Kesalahan pada Sensor	30
BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Analisa Hasil	31
4.2 Pembahasan	44
BAB V PENUTUP	47
5.1 Kesimpulan	47

5.2	Saran.....	47
	DAFTAR PUSTAKA.....	49
	LAMPIRAN A.....	51
	LAMPIRAN B.....	59
	BIODATA PENULIS.....	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Komponen Turbin Angin.....	4
Gambar 2.2	Skema <i>Active Fault Tolerance Control</i> (Jiang, 2005).....	10
Gambar 2.3	Variasi dari C_p dari Tip Speed Ratio (Shaker, 2012).....	13
Gambar 2.4	Gambar sistem dan <i>full order observer</i> (Ogata, 2010).....	15
Gambar 2.5	Contoh <i>membership function</i> . Membaca keatas – kebawah dan dari kiri- ke kanan : (a) fungsi – s (b) fungsi - π (c) fungsi – z (d-f) versi <i>triangular</i> (g-i) versi <i>trapezoidal</i> (j) fungsi flat - π (k) <i>rectangle</i> (l) <i>singleton</i>	18
Gambar 2.6	Diagram blok <i>fuzzy controller</i> (Jantzen, 1998).....	19
Gambar 3. 1	Kecepatan angin rata-rata dan maksimum (I, 2012).....	21
Gambar 3. 2	Diagram alir simulasi wind turbine.....	22
Gambar 3. 3	Gambar error pada <i>Fuzzy Inference System</i> (FIS).27	27
Gambar 3. 4	Gambar delta error pada <i>Fuzzy Inference System</i> (FIS).....	28
Gambar 3. 5	Skema <i>Fault Tolerance Fuzzy Control</i>	29
Gambar 4. 1	Grafik observer tanpa kesalahan.....	31
Gambar 4. 2	Grafik observer dengan kesalahan bias 1%.....	32
Gambar 4. 3	Grafik observer dengan kesalahan bias 5%.....	32
Gambar 4. 4	Grafik observer dengan kesalahan bias 10%.....	33
Gambar 4. 5	Grafik observer dengan kesalahan bias 20%.....	33
Gambar 4.6	Kecepatan rotor akrobat variansi kecepatan angin dengan kesalahan bias 1%.....	34
Gambar 4.7	Kecepatan rotor akrobat variansi kecepatan angin dengan kesalahan bias 5%.....	35
Gambar 4.8	Kecepatan rotor akrobat variansi kecepatan angin dengan kesalahan bias 10%.....	36
Gambar 4.9	Kecepatan rotor akrobat variansi kecepatan angin dengan kesalahan bias 20%.....	36
Gambar 4.10	Grafik hasil kompensasi kesalahan bias 1%.....	38

Gambar 4. 11	Grafik hasil kompensasi kesalahan bias 5%	38
Gambar 4. 12	Grafik hasil kompensasi kesalahan bias 10%	39
Gambar 4. 13	Grafik hasil kompensasi kesalahan bias 20%	39
Gambar 4.14	Grafik kecepatan rotor dengan kesalahan sensitivitas 90%	41
Gambar 4.15	Grafik kecepatan rotor dengan kesalahan sensitivitas 85%	42
Gambar 4.16	Grafik kecepatan rotor dengan kesalahan sensitivitas 80%	42
Gambar 4. 17	Hasil kompensasi kesalahan sensitivitas 90%	43
Gambar 4. 18	Hasil kompensasi kesalahan sensitivitas 85%	43
Gambar 4. 19	Hasil kompensasi kesalahan sensitivitas 80%	44

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Format dari <i>Rule of fuzzy</i>	17
Tabel 3. 1 Spesifikasi turbin angin.....	21
Tabel 3. 2 Kecepatan angin rata-rata dan maksimum (I, 2012) ..	23
Tabel 3. 3 Tabel pengambilan keputusan (Kp, Ki)	28
Tabel 3. 4 Spesifikasi sensor MT-190W (Sagrillo, 2002)	30
Tabel 4. 1 Karakteristik sistem akibat kesalahan bias	37
Tabel 4. 2 Karakteristik sistem hasil kompensasi oleh observer ..	40

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan listrik merupakan suatu permasalahan yang sangat penting di zaman modern seperti ini. Permasalahan ini memiliki keterkaitan yang cukup besar dengan semakin banyaknya pengguna *smart phone*, televisi dan juga laptop. Akibatnya kebutuhan listrik pun meningkat sangat tinggi, maka dari itu banyak langkah-langkah yang dilakukan oleh pemerintah guna mengatasi tingginya kebutuhan listrik. Salah satunya dengan menambah sumber alternatif seperti biomassa, photo voltage dan turbin angin.

Salah satu yang sedang digalakkan untuk pemenuhan kebutuhan listrik adalah turbin angin. Turbin angin merupakan alat pengubah sumber energi alternatif yang ramah lingkungan, berprinsip mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik yang selanjutnya digunakan untuk memutar generator listrik (Marnoto, 2011). Di dalam kehidupan sehari-hari, beberapa orang terutama petani menggunakan turbin angin untuk mengolah pertanian seperti pengairan. Hal ini dilakukan terus menerus setiap waktu selama angin terus berhembus dan operasi normal dari turbin angin. Namun selama waktu terus berjalan maka akan timbul kesalahan kecil (*minor*) maupun besar (*major*) dalam turbin angin tersebut. Jika instalasi dilakukan secara tepat maka kesalahan kecil (*minor*) pada turbin lebih mungkin sering terjadi dibanding kesalahan besar (*major*).

Salah satu kesalahan minor dalam turbin angin adalah kesalahan sensor. Efek Untuk mengatasi hal tersebut dibutuhkan suatu metode agar kesalahan tersebut bisa diatasi yaitu menggunakan metode *Fault Tolerance Control* (FTC) sedangkan tipe yang digunakan adalah tipe aktif yaitu *Active Fault Tolerance Control* (AFTC). Metode FTC ini bisa meminimalkan biaya pembuatan (manufaktur) dan perawatan (Shaker, 2012). Maka dari itu sesuai dengan latar belakang tersebut, dibuatlah tugas

akhir yang berjudul “Perancangan Sistem *Fault Tolerance Fuzzy Control* Pada Turbin Angin Dengan Kesalahan Pada Sensor ”

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat dirumuskan permasalahannya yaitu bagaimana cara mengatasi kesalahan pada sensor agar tidak mengalami kesalahan *minor* pada turbin angin?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang ada maka tujuan dari tugas akhir adalah mengatasi kesalahan pada sensor agar tidak mengalami kesalahan *minor* pada turbin angin.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah untuk Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Turbin angin yang digunakan adalah turbin angin *three-bladed* dengan kapasitas 200 KW
- b. Objek yang diteliti akan dilakukan dalam bentuk simulasi pada region dua
- c. Kesalahan yang digunakan adalah kesalahan *minor* yaitu kesalahan pada sensor.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

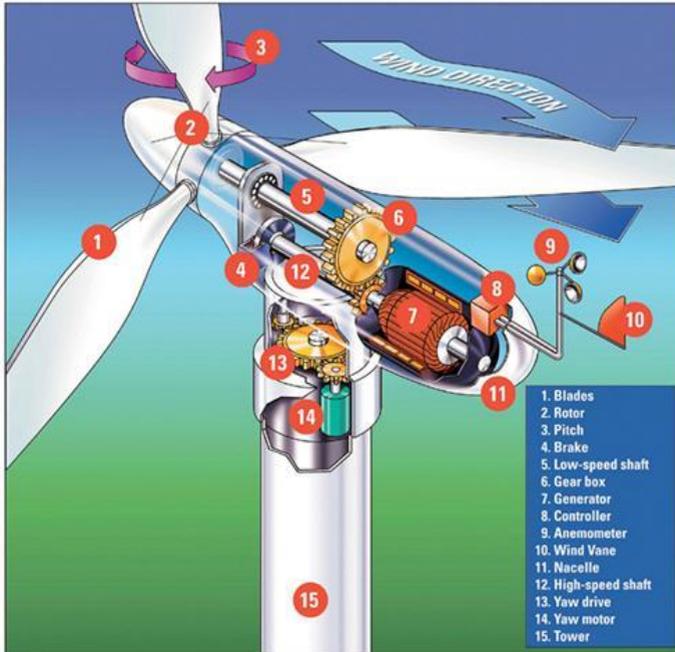
Turbin angin menghasilkan daya tergantung dari interaksi antara rotor dan angin. Angin sendiri merupakan kombinasi dari angin rata-rata dan fluktuasi turbulensi dari aliran angin tersebut. Pengalaman menunjukkan bahwa aspek utama dari kinerja turbin angin (berarti output daya dan beban rata-rata) ditentukan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

Turbin angin diklasifikasikan dalam dua tipe yaitu sumbu horizontal dan sumbu vertikal. Sumbu horizontal, memiliki *blade* atau kipas yang berputar sejajar dengan tanah, sedangkan pada sumbu vertikal memiliki *blade* atau kipas yang berputar tegak lurus ke tanah, namun sangat sedikit turbin angin dengan sumbu vertikal yang tersedia secara komersial dibandingkan dengan sumbu horizontal. (Darmawan & Ibnu Kahfi Bachtiar ST, 2014).

Di dalam turbin angin itu sendiri terdapat beberapa komponen seperti Gambar 2.2. Komponen turbin angin menurut buku (Manwell, 2009) akan dijelaskan dibawah ini serta diasumsikan turbin angin yang digunakan adalah *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) yaitu :

2.1.1 Rotor

Rotor adalah komponen yang unik karena hanya rotor yang dirancang untuk menggali (ekstrak) daya yang cukup besar dari angin dan mengkonversinya menjadi gerakan rotasi. Berikut adalah tiga komponen penting dalam rotor yaitu :



Gambar 2. 1 Komponen Turbin Angin

a. *Blades*

Blades merupakan salah satu komponen penting dalam rotor dimana *blades* adalah perangkat yang mengkonversi gaya angin menjadi torsi yang dibutuhkan untuk menghasilkan tenaga yang berguna.

b. *Aerodynamics control surface*

Aerodynamics control surface adalah perangkat yang dapat dipindahkan untuk mengubah karakteristik aerodinamis rotor. Berbagai jenis *aerodynamics control surface* dapat digabungkan dalam bilah turbin angin. Perangkat ini harus dirancang bekerja sama dengan rotor, terutama *blades*.

c. *Hub*

Hub dari turbin angin adalah komponen yang menghubungkan *blade* ke poros utama dan akhirnya ke seluruh

drive train. *hub* mentransmisikan dan harus menahan semua beban yang dihasilkan oleh *blade*. *Hub* umumnya terbuat dari baja, baik dilas atau cor. Rincian dari *hub* banyak berbeda tergantung pada filosofi desain keseluruhan turbin.

2.1.2 *Drive train*

Sebuah *drive train* dari turbin angin yang lengkap terdiri dari semua komponen yang berputar: rotor, poros utama, kopling, *gearbox*, rem, dan generator. Dengan pengecualian dari komponen rotor, yang telah dibahas diatas, semua komponen akan dibahas yaitu sebagai berikut :

a) Poros Utama

Setiap turbin angin memiliki poros utama, kadang-kadang disebut sebagai kecepatan rendah atau poros rotor. Poros utama adalah elemen berputar utama, menyediakan untuk transfer torsi dari rotor ke seluruh *drive train*. Ini juga mendukung berat rotor.

b) Kopling

Kopling digunakan untuk menghubungkan poros secara bersama-sama. Ada dua lokasi khusus di mana kopling yang besar kemungkinan akan digunakan dalam turbin angin yaitu antara poros utama dan *gearbox* dan antara poros output *gearbox* dan generator.

c) *Gearbox*

Kebanyakan *drive train* turbin angin termasuk *gearbox* untuk meningkatkan kecepatan poros input ke generator. Peningkatan kecepatan diperlukan karena rotor turbin angin, dan poros utamanya berubah pada kecepatan yang jauh lebih rendah dari yang dibutuhkan oleh sebagian besar generator listrik. angin rotor turbin kecil berubah pada kecepatan di angka beberapa ratus rpm. turbin angin besar berubah lebih lambat. Kebanyakan generator konvensional berubah di 1800 rpm (60 Hz) atau 1500 rpm (50 Hz).

d) Rem

Hampir semua turbin angin menggunakan rem mekanik di suatu tempat di *drive train*. rem seperti biasanya disertakan di samping rem aerodinamis. Bahkan, beberapa standar desain

(Germanischer Lloyd, 1993) membutuhkan dua sistem pengereman yaitu rem aerodinamis dan lainnya yang pada *drive train*. Dalam kebanyakan kasus, rem mekaniklah yang mampu menghentikan turbin. Dalam kasus lain, rem mekanik hanya digunakan untuk parkir. Yang memiliki arti bahwa rem menjaga rotor untuk nyala ketika turbin tidak beroperasi.

e) Generator

Generator adalah komponen penting dimana generator berfungsi mengkonversi daya mekanik dari rotor menjadi tenaga listrik.

2.1.3 *Yaw System*

Dengan beberapa pengecualian, semua turbin angin sumbu horisontal harus mampu menyimpang sehingga dapat menyesuaikan diri sesuai dengan arah angin. Beberapa turbin juga menggunakan *yaw* aktif sebagai cara untuk mengatur daya.

Ada dua tipe dasar dari sistem *yaw*: *yaw* aktif dan *yaw* bebas. Turbin dengan *yaw* aktif biasanya mesin melawan angin. Mereka menggunakan motor untuk aktif menyelaraskan turbin. Turbin dengan *yaw* bebas biasanya mesin mengikuti arah angin. Mereka bergantung pada aerodinamika rotor untuk menyelaraskan turbin. Untuk turbin lebih besar, *yaw* aktif mungkin akan dipertimbangkan lebih dibandingkan turbin yang mengikuti arah angin.

2.1.4 *Main Frame and Nacelle*

Nacelle adalah rumah untuk komponen utama dari turbin angin (dengan pengecualian untuk rotor). Ini termasuk *main frame* dan penutup *nacelle*.

Main frame adalah komponen struktural yang mana gearbox, generator, dan rem telah terpasang. Ini menyediakan struktur yang kaku untuk menjaga keselarasan antara komponen-komponen lainnya. Ini juga menyediakan titik attachment untuk bantalan *yaw*, yang pada gilirannya dibautkan ke puncak menara.

Pada dasarnya ada dua jenis *main frame*. *Main frame* berupa komponen terpisah, atau merupakan bagian dari gearbox yang terintegrasi.

Ketika *main frame* adalah komponen terpisah, biasanya dibuat dari pengecoran baja kaku atau lasan. lubang ulir atau titik attachment lainnya disediakan di lokasi yang tepat untuk dibautkan ke komponen lainnya.

Ketika *main frame* adalah bagian dari gearbox yang terintegrasi, tempat ini dibuat cukup tebal sehingga dapat membawa beban yang diperlukan. Seperti dengan main frame terpisah, titik *attachment* disediakan untuk mengamankan barang-barang lainnya.

Main Frame harus mengirimkan semua beban dari rotor dan reaksi beban dari generator dan rem ke menara. Hal ini juga harus cukup kaku yang tidak membolehkan adanya gerakan relatif antara bantalan dukungan rotor, gearbox, generator, dan rem.

Perumahan *Nacelle* memberikan perlindungan cuaca untuk komponen turbin angin yang terletak di *nacelle* tersebut. Ini termasuk, dalam komponen tertentu, listrik dan mekanik yang dapat dipengaruhi oleh sinar matahari, hujan, es, atau salju. *Nacelle* rumah biasanya terbuat dari bahan yang ringan, seperti fiberglass.

2.1.5 Tower

Tower adalah bagian dari turbin angin yang mendukung untuk meningkatkan bagian utama dari turbin di udara. Sebuah menara biasanya setidaknya setinggi diameter rotor. Untuk turbin kecil menara mungkin jauh lebih tinggi dari itu. Umumnya, ketinggian tower tidak boleh kurang dari 24m karena kecepatan angin lebih rendah dan lebih kacau (turbulen) jika terlalu dekat dengan tanah.

Menara turbin angin biasanya terbuat dari baja, meskipun beton yang diperkuat kadang-kadang digunakan. Ketika materi adalah baja, biasanya dilakukan galvanisasi atau dicat untuk melindunginya dari korosi. Kadang-kadang digunakan baja Cor-Ten, yang pada dasarnya tahan korosi.

2.2 FTCS

Sistem teknologi modern sangat bergantung pada sistem kontrol yang canggih untuk memenuhi persyaratan keselamatan dan kinerja yang meningkat. Hal ini terutama berlaku dalam aplikasi kritis keselamatan, seperti pesawat terbang, pesawat ruang angkasa, pembangkit listrik tenaga nuklir dan bahan kimia pengolahan bahan berbahaya, di mana kesalahan kecil dan sering jinak berpotensi berkembang menjadi peristiwa bencana jika tidak ditangani atau ditangani dengan tidak benar. Untuk mencegah kesalahan yang disebabkan kerugian dan untuk meminimalkan risiko potensial, teknik pengendalian dan pendekatan desain baru perlu dikembangkan untuk mengatasi malfungsi komponen sistem sambil mempertahankan tingkat stabilitas dan tingkat kinerja sistem yang diinginkan. Sistem kontrol yang memiliki kemampuan semacam itu sering dikenal sebagai sistem kontrol toleran kesalahan (Jiang, 2005). Juga menurut penelitian (Zhang & Jiang, 2008) bahwa *FTC System* (FTCS) adalah sistem kontrol yang memiliki kemampuan untuk mengakomodasi kegagalan komponen otomatis. Mereka mampu menjaga stabilitas sistem secara keseluruhan dan kinerja yang dapat diterima dalam hal kegagalan tersebut. Dengan kata lain, sistem kontrol loop tertutup yang dapat mentolerir kerusakan komponen, tetap menjaga kinerja dan stabilitas. Penting untuk menekankan bahwa kunci FTCS adalah adanya redundansi sistem. Metode perancangan yang berbeda hanyalah cerminan berbagai filosofi dalam memanfaatkan dan mengelola redundansi semacam itu. Untuk alasan sederhana, perlu ditekankan bahwa kontrol toleransi kesalahan mungkin tidak sesuai untuk aplikasi apapun, karena *redundling* selalu dikenai biaya tambahan untuk komponen tambahan dan dengan tambahan tambahan, seperti penambahan berat, ukuran dan belum lagi biaya pemeliharaan dalam rentang umur komponen tambahan ini (Jiang, 2005).

Untuk mempertahankan tingkat kinerja tertentu, kegagalan sistem komponen, sistem harus memiliki beberapa tingkat redundansi. Kendati demikian, keterbatasan fisik dan keuangan sering kali memberikan batasan maksimal pada redundansi yang

terinstal. Oleh karena itu, solusi yang tepat adalah mengurangi permintaan pada kinerja bila diperlukan jika terjadi kesalahan pada sistem. Hanya bagian yang paling penting dari sistem yang dijaga. Sebenarnya, untuk sistem yang direkayasa dengan baik, kesalahan harus dianggap sebagai kejadian langka dan bukan kejadian biasa. Jelas, dari sudut pandang praktis, ada garis tipis antara biaya yang diinvestasikan dan potensi keuntungan yang didapat. Secara umum, dari sudut pandang kontrol toleransi kesalahan, lebih banyak redundansi akan berpotensi diterjemahkan ke dalam kemampuan toleransi kesalahan yang lebih baik. Namun, lebih banyak redundansi pasti akan meningkatkan kompleksitas desain sistem kontrol toleran kesalahan dan proses implementasi. (Jiang, 2005)

Sensor adalah perangkat penting lainnya dalam sistem kontrol. Kegagalan dalam sensor pasti akan menyebabkan keputusan yang salah, yang dapat membahayakan operasi yang aman dari keseluruhan sistem. Untungnya, sensor itu sendiri adalah alat pasif dalam arti bahwa mereka tidak secara langsung berpartisipasi dalam tindakan kontrol, daripada memberikan informasi yang dibutuhkan untuk pengendali dan aktuator. Oleh karena itu, seringkali memungkinkan untuk menggunakan banyak sensor dan saling mengecek status operasional masing-masing untuk meningkatkan keandalan keseluruhan sistem pengukuran. Ini juga merupakan tren di industri saat ini untuk mengadopsi sensor "cerdas" dengan self validation dan kemampuan diagnostik diri. (Jiang, 2005).

Secara umum FTCS dibagi menjadi dua yaitu tipe pasif (PFTCS) dan tipe aktif (AFTCS). Skema untuk untuk AFTCS yaitu pada Gambar 2.2

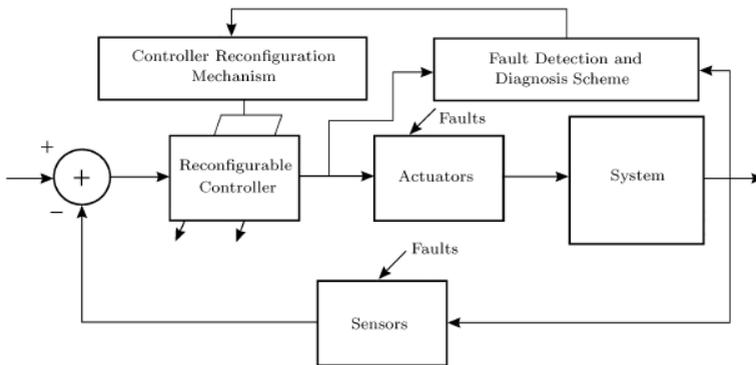
Selama tiga dekade terakhir, permintaan untuk keamanan, kehandalan, pemeliharaan, dan survivabilitas dalam sistem teknis telah menarik penelitian yang signifikan di *Fault Detection and Diagnosis* (FDD).

Dalam PFTCS, tidak memerlukan adanya skema FDD ataupun *reconfigurable control* namun memiliki kemampuan toleransi kesalahan yang terbatas. Berbanding terbalik dengan

PFTCS, bahwa AFTCS bereaksi terhadap kegagalan komponen secara aktif dengan cara *reconfigurable control* sehingga stabilitas dan peformansi dari seluruh system bisa dipertahankan.

Sebuah system AFTC memiliki tiga atau empat bagian yaitu *reconfigurable controller*, skema FDD, mekanisme controller untuk rekonfigurasi dan perintah atau referensi dari alat pengatur.

Untuk *error* dari sensor yang digunakan adalah *error* maksimal yang sesuai dalam thesis (Shaker, 2012) yaitu *error* 10% saat membaca kecepatan putaran rotor.



Gambar 2. 2 Skema *Active Fault Tolerance Control* (Jiang, 2005)

Dalam industri proses, sinyal pengukuran / kontrol biasanya ditransmisikan menggunakan jalur sinyal standar 4 sampai 20mA. Salah satu yang signifikan dalam menggunakan 4 ma, daripada 0 mA karena batas sinyal rendah adalah untuk memberikan toleransi kesalahan yang melekat pada kabel yang rusak. Dalam keadaan lain, untuk kapasitas yang sama, tiga pompa kecil sering disukai dibanding pompa besar untuk memberikan toleransi kesalahan yang lebih baik jika terjadi kegagalan pada pompa. Ini juga merupakan praktik umum bahwa beberapa sensor dan transmitter ditempatkan di lokasi strategis untuk mengukur variabel kritis proses yang sama dan diikuti oleh skema *voting*

untuk meningkatkan toleransi kesalahan terhadap kegagalan sensor. (Jiang, 2005).

2.3 Pemodelan Dinamik dari Turbin Angin

Plant non-linear dari turbin angin mengkombinasi dari sistem individual seperti persamaan (2.1)-(2.6) yang diambil dari (Shaker, 2012).

$$P_{cap} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V_{EWS}^3 \quad (2.1)$$

dengan :

P_{cap} : daya aerodinamis yang dihasilkan oleh rotor (watt)

ρ : densitas udara (kg/m^3)

R : radius dari rotor (m)

β : *pitch angle* dari blade ($^\circ$)

λ : tip speed ratio

V_{EWS} : kecepatan angin efektif yang sesuai dengan rotor (m/s)

C_p : koefisien daya yang tergantung β dan λ

Daya tersebut dihasilkan oleh generator dimana input generator adalah kecepatan rotor dan torsi turbin angin yang akan dijelaskan pada persamaan (2.2) dan kemudian disubstitusikan menjadi persamaan (2.3) dengan koefisien torsi pada persamaan (2.4) serta mensubstitusikan persamaan (2.5) ke dalam persamaan (2.2) sehingga menjadi persamaan (2.6). Terakhir disederhanakan menjadi persamaan (2.7)

$$T_T = \frac{P_{cap}}{\omega_r} \quad (2.2)$$

$$T_T = \frac{1}{2\omega_r} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V_{EWS}^3 \quad (2.3)$$

$$C_T = \frac{C_P}{\lambda} \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{\omega_r} = \frac{R}{\lambda V_{EWS}} \quad (2.5)$$

$$T_T = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \frac{R}{\lambda V_{EWS}} C_T \lambda(\lambda, \beta) V_{EWS}^3 \quad (2.6)$$

$$T_T = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_T(\lambda, \beta) V_{EWS}^2 \quad (2.7)$$

dengan :

ω_r : kecepatan rotor (rpm)

T_T : torsi turbin angin (Nm)

C_T : koefisien torsi

Torsi yang bekerja pada sebuah rotor disebabkan oleh beberapa hal yaitu pada persamaan (2.8). Lalu persamaan (2.8) yang merupakan fungsi dengan domain waktu akan diubah menjadi domain s yaitu dengan mentransformasikan fungsi tersebut dengan transformasi *Laplace* sehingga menjadi persamaan (2.9). Sehingga persamaan rotor menjadi persamaan (2.10)

$$\sum T = T_T - T_L - b\omega_r \quad (2.8)$$

$$T_T - T_L - b\omega_r = Js\omega_r \quad (2.9)$$

$$\omega_r = \frac{1}{Js+b} (T_T - T_L) \quad (2.10)$$

dengan :

$\sum T$: Total torsi yang bekerja pada rotor (Nm)

T_L : Torsi akibat dari beban pembebanan (Nm)

b : Koefisien gesekan yang merugikan rotor

Selain rotor juga terdapat generator sebagai komponen penting dalam turbin angin namun generator tidak terhubung secara langsung dengan turbin angin melainkan dengan gearbox. Penggunaan gearbox dikarenakan generator membutuhkan kecepatan putaran lebih besar sehingga persamaan ditunjukkan pada persamaan (2.11) dan (2.12) sedangkan untuk model matematisnya dituliskan pada persamaan (2.13).

$$T_g = \frac{T_T}{n} \quad (2.11)$$

$$\omega_g = \omega_r n \quad (2.12)$$

$$\omega_g = \int \frac{1}{2H} \quad (2.13)$$

dengan :

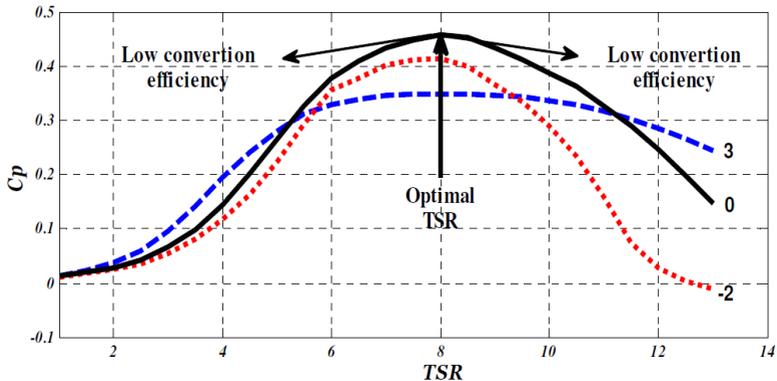
T_g : Torsi generator (Nm)

n : Faktor pengali generator

ω_g : Kecepatan generator (rpm)
 H : Konstanta inertia

Setelah mendapatkan semua model matematis turbin angin sebenarnya ada satu variabel yang sangat penting yaitu koefisien daya yang mempengaruhi konversi daya dari turbin angin dikarenakan koefisien daya memiliki nilai maksimal yaitu 59% dikarenakan tidak ada satupun turbin angin yang dapat mengkonversi energy kinetic menjadi energy mekanik rotor. Didalam persamaan (2.1) dan (2.3) terdapat satu variable yang memiliki peran penting dalam perhitungan daya maupun torsi yaitu C_p dimana C_p memiliki nilai bervariasi salah satunya terhadap *tip speed ratio* yang akan ditunjukkan pada Gambar 2.3 dan persamaannya ditunjukkan pada persamaan (2.14)

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6\lambda \quad (2.14)$$



Gambar 2. 3 Variasi dari C_p dari Tip Speed Ratio (Shaker, 2012)

2.4 Observer

Dalam pendekatan pole-placement pada perancangan sistem kontrol, kita mengasumsikan bahwa semua variabel keadaan tersedia untuk umpan balik. Namun, dalam praktiknya, tidak semua variabel keadaan tersedia untuk umpan balik. Maka

kita perlu memperkirakan variabel keadaan yang tidak tersedia. Estimasi variabel keadaan yang tidak terukur biasanya disebut observasi. Perangkat (atau sebuah program komputer) yang memperkirakan atau mengamati variabel keadaan disebut state observer, atau bisa disebut seorang observer. Jika state observer mengamati semua variabel keadaan sistem, terlepas dari apakah beberapa variabel keadaan tersedia untuk pengukuran langsung, ini disebut *full order state observer*. Ada kalanya hal ini tidak diperlukan, kapan kita memerlukan observasi hanya variabel keadaan yang tidak terukur, tapi bukan dari yang sebenarnya bisa diukur secara langsung juga. Sebagai contoh, karena variabel output dapat diamati dan berhubungan secara linear dengan variabel keadaan, kita tidak perlu mengamati semua variabel keadaan, namun hanya mengamati variabel $n-m$ state, di mana n adalah dimensi vektor keadaan dan m adalah dimensi dari Vektor keluaran. (Ogata, 2010)

Observer yang memperkirakan kurang dari n variabel keadaan, dimana n adalah dimensi dari vektor keadaan, disebut *reduced-order state observer* atau secara sederhana disebut *reduced-order observer*. Jika observer dengan tingkat reduksi minimal, maka observer disebut *minimum-order state observer* atau *minimum-order observer*. (Ogata, 2010)

Berikut adalah model yang ditunjukkan oleh persamaan (2.15) dan (2.16)

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.15)$$

$$y = Cx \quad (2.16)$$

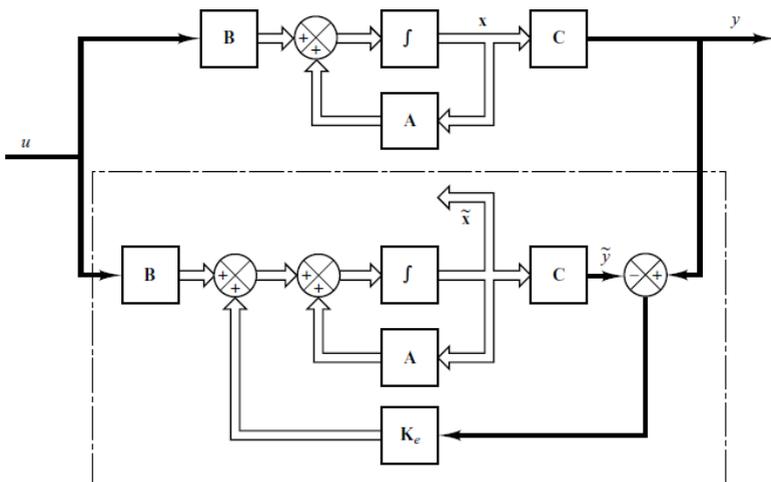
Observer adalah *subsystem* untuk merekonstruksi vektor state dari plant. Model matematis dari observer pada dasarnya sama dengan plant kecuali kita memasukkan syarat tambahan yang didalamnya terdapat perkiraan *error* untuk mengkompensasi ketidakakuratan dalam matriks A dan B serta *error* awal. Perkiraan *error* atau *error* observasi adalah perbedaan diantara output hasil pengukuran dengan estimasi output. *Error* awal adalah perbedaan diantara state awal dengan estimasi state.

Sehingga model matematis dari observer menjadi persamaan (2.17) dan (2.18) (Ogata, 2010)

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + K_e(y - C\tilde{x}) \quad (2.17)$$

$$= (A - K_eC)\tilde{x} + Bu + K_ey \quad (2.18)$$

Dimana \tilde{x} adalah perkiraan keadaan dan $C\tilde{x}$ merupakan perkiraan output. Masukan ke observer adalah output y dan input kontrol u . Matrix K_e , yang disebut matriks gain observer, adalah matriks pembobotan dengan istilah koreksi yang melibatkan perbedaan antara Output terukur y dan hasil perkiraan $C\tilde{x}$. Hasil dari persamaan (2.17) dan (2.18) digambarkan oleh diagram blok pada Gambar 2.5



Gambar 2. 4 Gambar sistem dan *full order observer* (Ogata, 2010)

2.5 Fuzzy proportional integral controller

Fuzzy controller merupakan salah satu kontrol yang baik untuk kondisi non linear dimana berdasarkan teori *fuzzy* dan beberapa tekniknya. Untuk lebih jelas mengenai *fuzzy controller* akan ditampilkan pada Gambar 2.6. *Fuzzy PI controller* adalah

controller hybrid yang menggunakan dua set gain PI untuk menghasilkan respon non-linear. Algoritma logika *fuzzy* dapat digunakan dalam *control* turbin angin dengan model non-linear yang kompleks dan parameter yang bervariasi. Struktur dasar *fuzzy logic controller* terdiri dari tiga tahapan penting yaitu :

1. Fuzzifikasi

Blok pertama di dalam *controller* adalah *fuzzification*, yang mengubah setiap input data menjadi tingkat keanggotaan dengan melihat dalam satu atau beberapa fungsi keanggotaan. Blok *fuzzifikasi* sesuai dengan data masukan dengan ketentuan peraturan untuk menentukan seberapa baik kondisi masing-masing aturan sesuai dengan contoh masukan tertentu. Ada tingkat keanggotaan untuk setiap istilah linguistik yang berlaku untuk masukan itu. (Jantzen, 1998)

2. Pengambilan keputusan

Aturan untuk pengambilan keputusan bisa menggunakan beberapa variabel baik dalam kondisi maupun kesimpulan peraturan. Oleh karena itu, pengendali dapat diterapkan pada masalah multi-input-multi-output (MIMO) dan masalah single-input-single-output (SISO). Masalah SISO yang khas adalah mengatur sinyal kontrol berdasarkan sinyal kesalahan. Kontroler sebenarnya bisa memerlukan kesalahan, perubahan kesalahan, dan kesalahan akumulasi sebagai masukan, namun kita akan menyebutnya kontrol satu lingkaran, karena pada prinsipnya ketiganya terbentuk dari pengukuran kesalahan. Untuk menyederhanakan, bagian ini mengasumsikan bahwa tujuan pengendalian adalah mengatur beberapa keluaran proses di sekitar titik setel atau referensi yang ditentukan. Presentasi dengan demikian terbatas pada kontrol single-loop. Di dalam proses pengambilan keputusan ada dua hal yang terpenting yaitu :

a) *Rule Format*

Pada dasarnya pengendali linguistik berisi aturan dalam format if-then, namun dapat disajikan dalam format yang berbeda. Dalam banyak sistem, aturan dipresentasikan kepada *end-user* dalam format yang mirip dengan yang ada di tabel 2.1

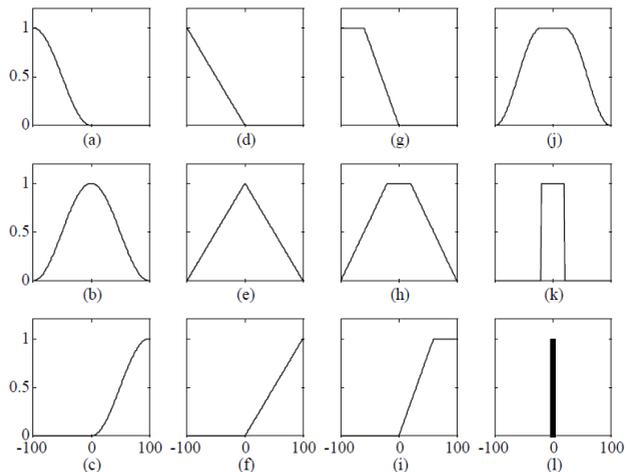
Tabel 2. 1 Format dari *Rule of fuzzy*

Error	Change in error	Output
Negatif	Positif	Zero
Negatif	Zero	NM
Negatif	Negatif	NB
Zero	Positif	PM
Zero	Zero	Zero
Zero	Negatif	NM
Positif	Positif	PB
Positif	Zero	PM
Positif	Negatif	Zero

b) *Membership function*

Setiap elemen di *universe of discourse* adalah anggota himpunan fuzzy sampai kelas tertentu, bahkan mungkin nol. Nilai keanggotaan untuk semua anggotanya menggambarkan himpunan fuzzy, seperti Negatif. Dalam elemen himpunan fuzzy diberi nilai keanggotaan, sehingga transisi dari keanggotaan ke bukan keanggotaan secara bertahap bukan mendadak. Kumpulan elemen yang memiliki keanggotaan non-zero disebut dukungan dari Himpunan fuzzy Fungsi yang mengikat sebuah nomor ke setiap elemen x alam semesta disebut *membership function* (Fungsi keanggotaan). *Designer* pasti dihadapkan pada pertanyaan bagaimana membangun syarat set. Ada dua pertanyaan spesifik yang harus dipertimbangkan: (i) Bagaimana seseorang menentukan bentuk *sets*? Dan (ii) Berapa banyak *set* yang diperlukan dan

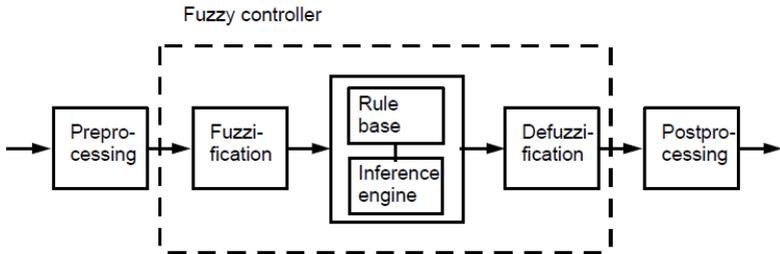
cukup? Misalnya, kesalahan pada posisi pengendali menggunakan keluarga dengan istilah Negatif, nol, dan positif. Menurut teori himpunan fuzzy pemilihan bentuk dan lebar bersifat subjektif, namun beberapa aturan praktis berlaku. Pada Gambar 2.5 ditunjukkan contoh *membership function*.



Gambar 2. 5 Contoh *membership function*. Membaca keatas – kebawah dan dari kiri- ke kanan : (a) fungsi – s (b) fungsi - π (c) fungsi – z (d-f) versi *triangular* (g-i) versi *trapezoidal* (j) fungsi flat - π (k) *rectangle* (l) *singleton*

3. Defuzzifikasi.

Set fuzzy yang dihasilkan harus dikonversi dalam angka yang bisa dikirim ke proses sebagai sinyal kontrol. Operasi ini disebut defuzzifikasi. Rangkaian fuzzy yang dihasilkan dengan demikian menjadi defuzzifikasi ke dalam *crisp* (himpunan tegas) sinyal kontrol.



Gambar 2. 6 Diagram blok *fuzzy controller* (Jantzen, 1998)

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini akan menjelaskan tentang langkah-langkah simulasi wind turbine pada Matlab 2009a pada Gambar 3.1.

3.1 Studi profil angin dan penentuan spesifikasi turbin angin

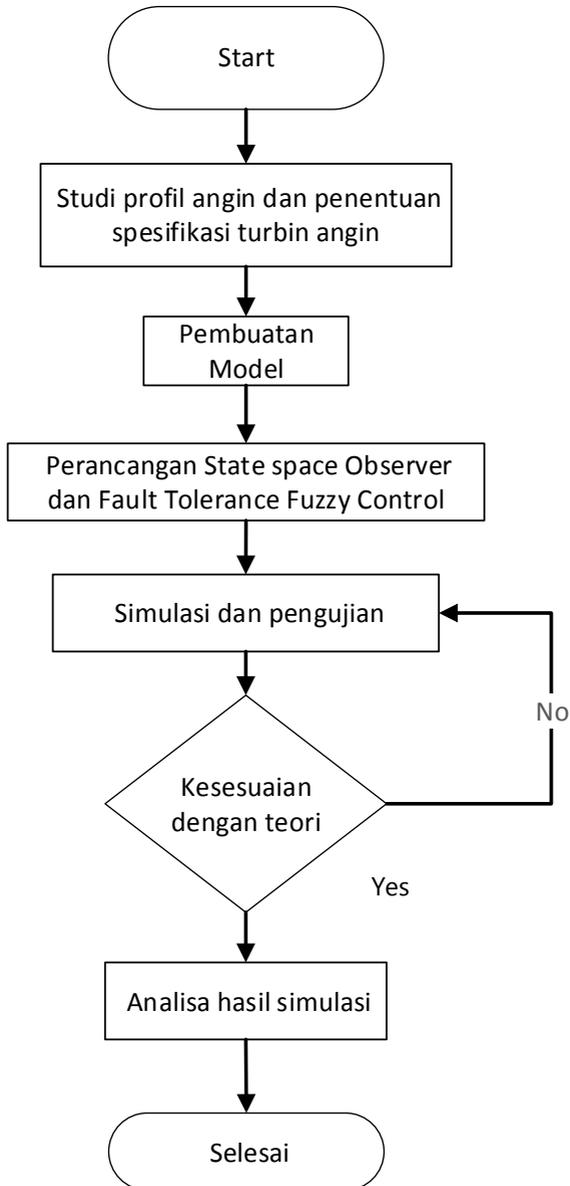
Studi profil angin dan penentuan spesifikasi turbin angin merupakan langkah pertama dalam pengerjaan tugas akhir ini. Studi ini tentang kecepatan angin yang nantinya akan digunakan dalam simulasi sedangkan spesifikasi turbin angin akan ditunjukkan pada Tabel 3.1. Untuk profil angin yang digunakan adalah Surabaya ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan Tabel 3.2

Tabel 3. 1 Spesifikasi turbin angin

Model	WT 600
Manufacturer	Proven Engineering
Rotor diameter (m)	2.56
Swept area (m ²)	5.15
Rated wind speed (m/s)	10.06
Rated Output (watt)	600
Maximum design wind speed (m/s)	64.82
RPM at rated output	500
Blade material	Polypropylene
Tip speed ratio (TSR)	6.7
Battery system voltages (volt)	12, 24 or 48



Gambar 3. 1 Kecepatan angin rata-rata dan maksimum (I, 2012)



Gambar 3. 2 Diagram alir simulasi wind turbine

Tabel 3. 2 Kecepatan angin rata-rata dan maksimum (I, 2012)

Bulan	Kecepatan Rata-Rata (m/s)	Kecepatan Angin Maksimum	
		Arah (°)	Kecepatan (m/s)
Januari	3.6	280	12.86
Februari	2.06	340	20.58
Maret	3.6	290	14.92
April	3.09	090	9.26
Mei	3.09	100	9.26
Juni	3.6	100	5.66
Juli	3.6	100	9.26
Agustus	4.11	100	9.26
September	4.11	110	12.35
Oktober	3.6	100	13.37
November	3.09	090	12.35
Desember	3.09	220	22.63
Rata-ratas	3.09	174	12.35

3.2 Pembuatan Model Turbin Angin dalam Matlab

Pemodelan turbin angin merupakan langkah kedua dalam tugas akhir ini. Setelah mendapatkan bentuk plant dari wind turbine maka dilakukan pemodelan untuk mempresentasikan plant. Pemodelan dilakukan dengan memodifikasi model yang sudah ada berdasarkan laporan dari (Miller, Price, & Sanchez-Gasca, 2003) yaitu mengacu pada persamaan (2.1) untuk daya turbin angin, (2.6) untuk torsi turbin angin, (2.10) untuk rotor, (2.14) untuk generator, (2.15) untuk koefisien daya

Pada persamaan (3.1) digunakan untuk mendefinisikan salah satu variabel pada persamaan (2.15). Dan untuk nilai koefisien C_1 sampai C_6 akan ditunjukkan pada persamaan (3.2)-(3.7)

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

$$C_1 = 0.645 \quad (3.2)$$

$$C_2 = 116 \quad (3.3)$$

$$C_3 = 0.4 \quad (3.4)$$

$$C_4 = 5 \quad (3.5)$$

$$C_5 = 21 \quad (3.6)$$

$$C_6 = 0.00912 \quad (3.7)$$

Setelah pemodelan di atas, selanjutnya dimodelkan elemen lain seperti blade, rotor dan generator. Untuk *blade position actuators* ditunjukkan pada persamaan berikut (Miller, dkk, 2003):

$$\frac{\theta(s)}{\theta_{cmd}} = \frac{1}{1+sT_p} \quad (3.8)$$

dengan nilai amplitudo dan laju perubahan sudut pitch dibatasi untuk mengakomodasi keterbatasan fisik alat, yaitu :

$$\theta_{max}(k) = 10$$

$$\theta_{min}(k) = -10$$

$$d\theta/dt_{max} = 27$$

$$d\theta/dt_{min} = 0$$

$$\theta_{cmd}(k) = \theta_{ref}(k) + \theta_{com}(k) \quad (3.9)$$

dengan :

$$\theta_{cmd}(k) = \text{Sudut pitch command } (^{\circ})$$

$$\theta_{ref}(k) = \text{Sudut pitch referensi } (^{\circ})$$

$$\theta_{com}(k) = \text{Sudut pitch kompensasi } (^{\circ})$$

Diasumsikan $P_{max}(k)$ tidak lebih dari $P_{rated}(k)$ sehingga $\theta_{com}(k) = 0$)

$$\theta_{ref}(k) = u \quad (3.10)$$

Dengan u merupakan sinyal output dari controller fuzzy PI

$$u(k) = (Kp * e(k)) + (e(k + 1) * Ki) \quad (3.11)$$

$$e(k) = \omega_r(k) - \omega_{ref}(k) \quad (3.12)$$

Untuk persamaan generator ditunjukkan pada persamaan berikut (Miller, dkk, 2003):

$$\omega_g(k+1) = \omega_g(k) + \frac{Tm(k) - Tg(k) + \omega_g(k) * F}{2 * H(k)} \quad (3.13)$$

Untuk persamaan rotor ditunjukkan pada persamaan berikut (Miller, dkk, 2003):

$$\omega_r(k+1) = \omega_r(k) + \frac{(T_r(k) - Tm(k))}{(2 * H_{wt})} \quad (3.14)$$

$$Tm(k) = (\omega_r(k+1) - \omega_g(k+1)) * Ksh + (\omega_r(k+1) - \omega_g(k+1)) * D_{mutual} \quad (3.15)$$

dengan :

Tm : Torsi mekanik rotor (Nm)

H_{wt} : Konstanta inersia (s)

Ksh : Konstanta pegas pada rotor

D_{mutual} : Konstanta redaman pada motor

3.3 Perancangan *State Space Observer*

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3.16)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (3.17)$$

Dari proses pengubahan *transfer function* ke *state space* maka didapatkan matriks-matriks dari persamaan ruang keadaan:

$$A = -0.5000 \quad (3.18)$$

$$B = 1 \quad (3.19)$$

$$C = 2.5000 \quad (3.20)$$

$$D = 0 \quad (3.21)$$

Lalu berdasarkan jurnal dari (Indriawati, dkk, 2013) bahwa dengan adanya kesalahan pada sensor maka persamaan ruang keadaan pada persamaan (3.16) dan (3.17) menjadi persamaan (3.22) dan (3.23).

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3.22)$$

$$y(k) = Cx(k) + Ffs(k) \quad (3.23)$$

Kemudian ditambahkan variabel baru $z(k + 1)$

$$\frac{z(k+1) - z(k)}{T_s} = A_z \cdot [y(k) - z(k)] \quad (3.24)$$

Kemudian persamaan (3.24) dimasukkan ke persamaan (3.23), menjadi

$$\begin{aligned} z(k + 1) &= A_z T_s [y(k) - z(k)] + z(k) \\ &= A_z T_s [Cx(k) + Ffs(k) - z(k)] + z(k) \\ &= A_z T_s Cx(k) + A_z T_s Ffs(k) - A_z T_s z(k) + z(k) \\ &= A_z T_s Cx(k) + A_z T_s Ffs(k) + (-A_z T_s + I)z(k) \end{aligned} \quad (3.25)$$

diketahui nilai $z(k + 1) = 0$, maka

$$y(k) = z(k) \quad (3.26)$$

Sehingga dari persamaan (3.22), (3.25), dan (3.26) diubah ke dalam persamaan ruang keadaan menjadi,

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ z(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z T_s C & -A_z T_s + I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & A_z T_s F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} fa(k) \\ fs(k) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\bar{y}(k) = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Dengan asumsi nilai:

$$A_z = 1 \text{ dan } T_s = 5e-4.$$

Kemudian dari persamaan (3.27) dan (3.28) diubah ke dalam persamaan yang lebih sederhana, menjadi

$$\bar{x}(k + 1) = \bar{A} \cdot \bar{x}(k) + \bar{B} \cdot \bar{u}(k) + \bar{F} \bar{f}(k) \quad (3.29)$$

$$\bar{y}(k) = \bar{C} \cdot \bar{x}(k) \quad (3.30)$$

$$\hat{\bar{x}}(k + 1) = \hat{\bar{A}} \cdot \hat{\bar{x}}(k) + \hat{\bar{B}} \cdot u(k) + \hat{\bar{K}}_e [\hat{\bar{y}}(k) - \hat{\bar{y}}(k)] \quad (3.31)$$

$$\hat{\bar{y}}(k) = \hat{\bar{C}} \cdot \hat{\bar{x}}(k) \quad (3.32)$$

Dengan demikian diketahui nilai matriks seperti berikut ini.

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -0.5000 & 0 & 0 \\ 0.0013 & 0.9995 & -0.0004 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\bar{F} = [0.0013] \quad (3.35)$$

$$\bar{C} = [0 \quad 1 \quad 0] \quad (3.36)$$

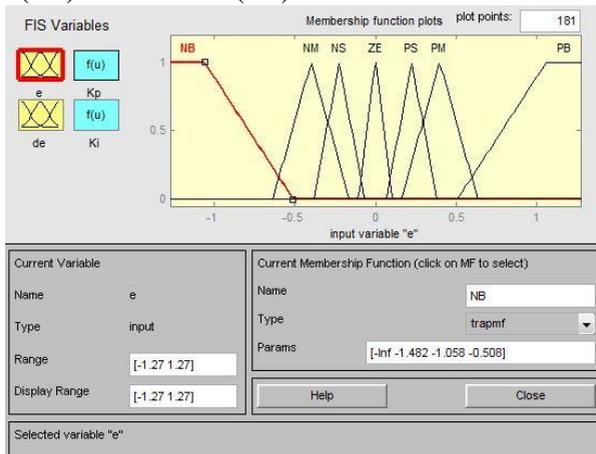
3.4 Perancangan *Fuzzy Control*

Setelah semua sudah selesai maka langkah terakhir adalah memasang *fuzzy control* sebagai *controller* untuk menggantikan *controller* sebelumnya yaitu berupa *P controller*. *Fuzzy control* yang digunakan adalah *PI* dimana yang digunakan adalah tipe diskrit. Untuk tugas akhir ini maka masukan dari fuzzifikasi dipilih sebagai *error* dan laju perubahan *error* dan outputnya adalah konstanta. Berikut adalah proses fuzzifikasi ditunjukkan pada persamaan (3.37) dan (3.38).

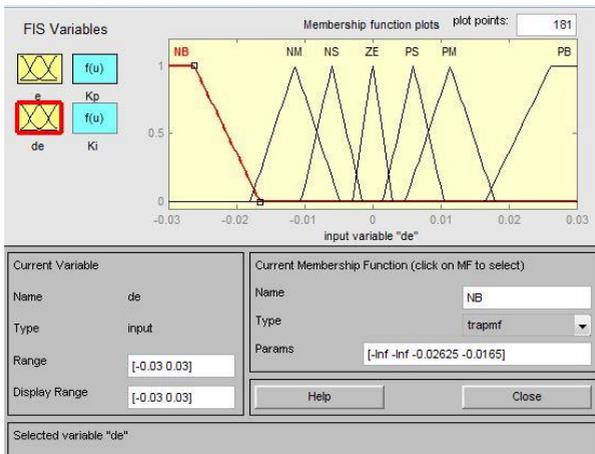
$$e(k) = \omega_{ref}(k) - \omega_r(k) \quad (3.37)$$

$$\Delta e = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (3.38)$$

Sedangkan dalam Simulink maka akan ditunjukkan pada Gambar (3.3) dan Gambar (3.4)



Gambar 3. 3 Gambar error pada *Fuzzy Inference System* (FIS)



Gambar 3. 4 Gambar delta error pada *Fuzzy Inference System* (FIS)

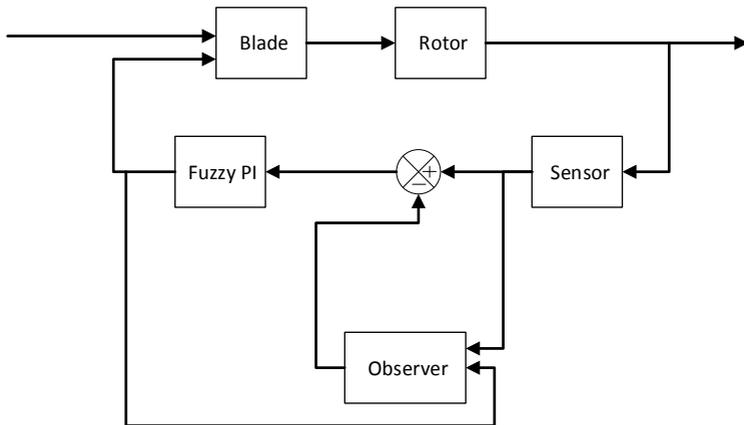
Setelah tahap fuzifikasi $e(k)$ dan $\Delta e(k)$ dikonversikan ke dalam bentuk variabel *fuzzy* yang dapat diidentifikasi oleh fungsi membership. Lalu untuk pengambilan keputusan maka menggunakan tabel 3.3

Tabel 3. 3 Tabel pengambilan keputusan (Kp, Ki)

Δe							
NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
Na3, B	Na1, B	Na2, B	Na2, M	Na3, B	Na3, B	Na3, B	PB
Na2, M	Id, Id	Na1, M	Na1, M	Na2, M	Na3, B	Na3, B	PM
Na1, M	Id, M	Id, Id	Na1, Id	Na1, M	Na2, M	Na3, B	PS
T, S	Id, Id	Id, Id	Id, Id	Id, Id	Na1, M	Id, Id	ZE
St, S	T, S	Id, S	Id, Id	Id, Id	Id, Id	St, S	NS
St, S	St, S	T, S	T, S	T, S	Id, Id	St, S	NM
St, S	St, S	St, S	T, S	St, B	St, B	St, M	NB

Dalam proses terakhir yaitu defuzifikasi bahwa nilai keanggotaan resultan dari aturan aktif menentukan bobot rangkaian *fuzzy* pada ΔKp dan ΔKi . Hasil tersebut akan menjadi keluaran dari *fuzzy logic controller* untuk proses selanjutnya.

3.5 Perancangan *Fault Tolerance Fuzzy Control*



Gambar 3. 5 Skema *Fault Tolerance Fuzzy Control*

Fault Tolerance Fuzzy Control merupakan kumpulan dari beberapa sistem yaitu sistem turbin angin, sistem FTC dan sistem controller. Sistem turbin angin yaitu blade dan rotor dimana diawali dengan input blade yaitu kecepatan angin, kecepatan angin itu akan menggerakkan blade yang menghasilkan sebuah torsi dan menggerakkan rotor yang akan menghasilkan kecepatan rotor.

Kecepatan rotor tersebut akan diukur oleh sensor yang sudah termasuk dalam sistem FTC. Jika terdapat kesalahan pada sensor maka informasi tersebut akan diketahui oleh observer sehingga observer tersebutlah yang akan melakukan proses *reconfigurable control* sehingga informasi yang dihasilkan oleh sensor akan diakumulasi oleh informasi hasil dari observer sehingga menghasilkan error yang seminimal mungkin.

Error yang dihasilkan tersebut akan dilanjutkan pada sistem controller dimana error tersebut akan menjadi input dari proses fuzifikasi sehingga beserta proses selanjutnya yaitu delta error untuk bias menentukan rule base dan menghasilkan nilai Kp dan Ki dari output defuzifikasi.

3.6 Kesalahan pada Sensor

Turbin angin menggunakan sensor tachometer MT-190W dengan spesifikasi ditunjukkan pada tabel 3.4. Penggunaan sensor yang terlalu lama maka akan terjadi longgarnya kabel, *ground* yang buruk, bahkan sampai kabel rusak. Maka pembacaan akan menjadi salah sehingga disebut juga kesalahan *bias* dan hal itu juga bisa didasari jika kita bisa melakukan perhitungan secara kasar. (moparmaniac59, 2012)

Tabel 3. 4 Spesifikasi sensor MT-190W (Sagrillo, 2002)

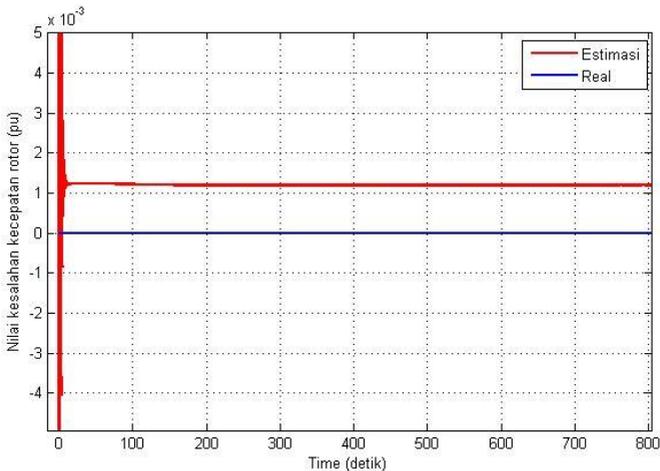
Operating distance	2.5 mm – 6.35 mm
Speed range	1-99999 RPM
Operating temperature	-73°C– 107°C
Power required	3.3 – 24 VDC
Standard cable	2.4 m
Dimensions	50 x 16 mm

BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan simulasi perancangan sistem *fault tolerance fuzzy control* pada turbin angin maka dibawah ini akan dijelaskan proses dimulai dari linearisasi sampai kompensasi daro kesalahan yang diberikan.

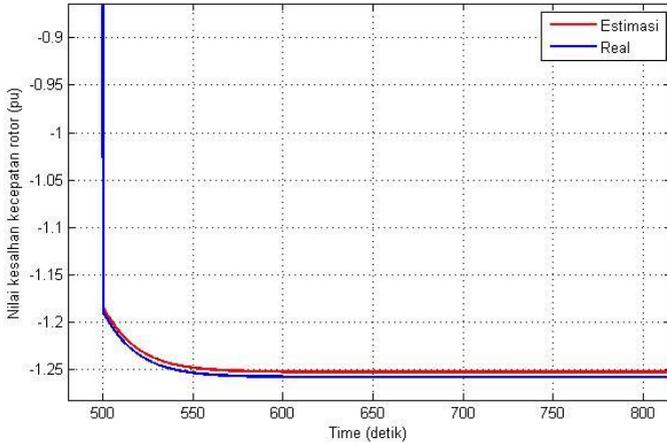
4.1 Analisa Hasil

Dibawah ini adalah hasil simulasi dari turbin angin dimana proses dimulai dari pembuatan model turbin angin di matlab 2009a sekaligus inisiasi mfile pada turbin angin untuk menjalankannya. Kecepatan rotor adalah tempat dimana terdapat sensor sehingga sensor tersebutlah yang akan diberi kesalahan. Terdapat dua jenis kesalahan yang akan dilakukan yaitu kesalahan bias dan kesalahan sensitivitas. Dimana pada Gambar 4.1 sampai dengan Gambar 4.5 menunjukkan besar nilai kesalahan bias dalam satuan pu untuk kesalahan 0% (tanpa kesalahan), 1%, 5%, 10% dan 20%.



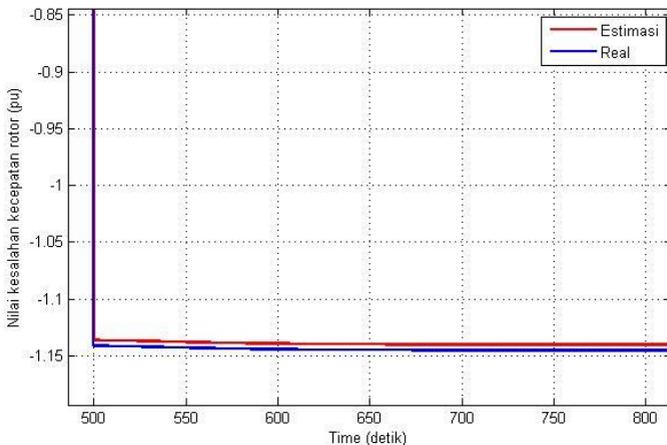
Gambar 4. 1 Grafik observer tanpa kesalahan

Gambar 4.1 menggambarkan kesalahan dari pembuatan model dibandingkan turbin angin yang memiliki nilai sekitar 1.2×10^{-3} dan kesalahan tersebut sudah seharusnya memang mendekati nol.



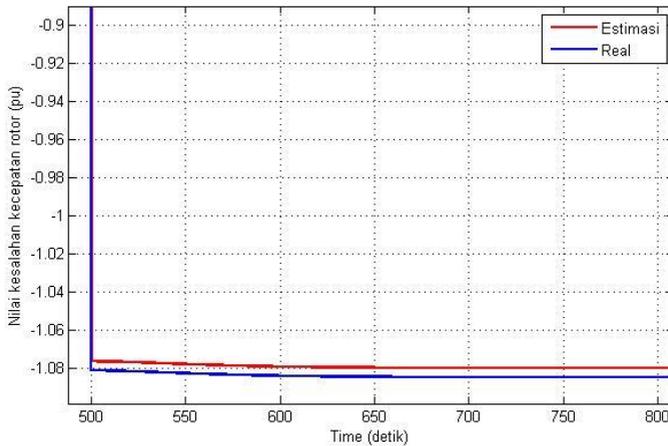
Gambar 4. 2 Grafik observer dengan kesalahan bias 1%

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa ada informasi kesalahan pada detik ke-500 dengan nilai kesalahan sebesar -1.25 pu



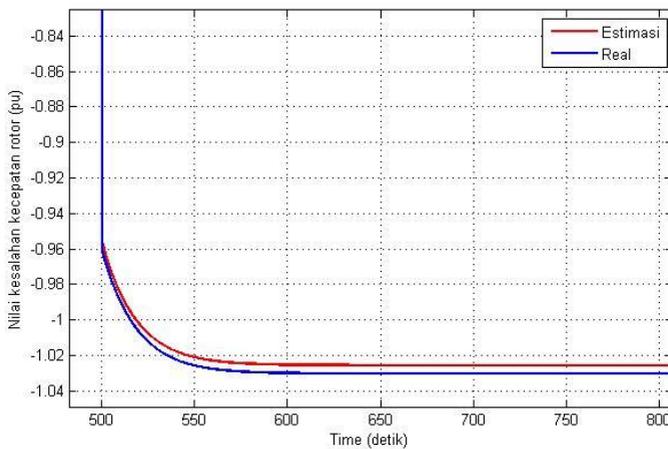
Gambar 4. 3 Grafik observer dengan kesalahan bias 5%

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa ada informasi kesalahan pada detik ke-500 dengan nilai kesalahan sebesar -1.14 pu



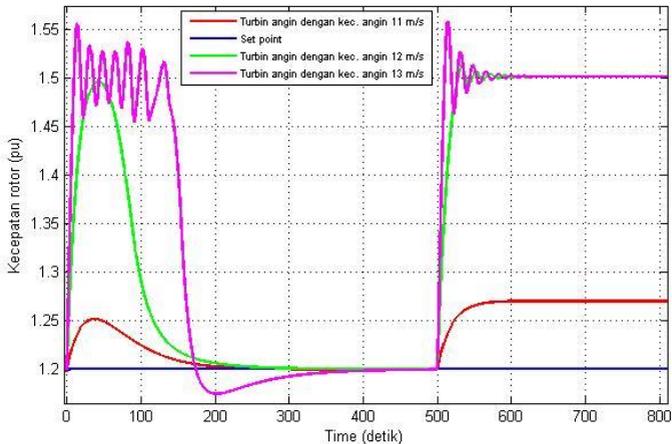
Gambar 4. 4 Grafik observer dengan kesalahan bias 10%

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa ada informasi kesalahan pada detik ke-500 dengan nilai kesalahan sebesar -1.08 pu



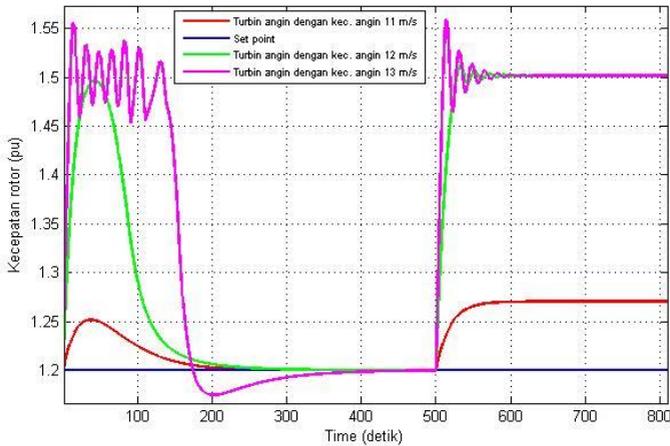
Gambar 4. 5 Grafik observer dengan kesalahan bias 20%

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa ada informasi kesalahan pada detik ke-500 dengan nilai kesalahan sebesar -1.02 pu. Gambar 4.2-4.5 menunjukkan nilai kesalahan yaitu kesalahan *bias* sebesar 1%, 5%, 10% dan 20% pada detik 500. Sehingga kecepatan rotor juga akan berubah dan akan ditunjukkan pada Gambar 4.6-4.9.



Gambar 4. 6 Kecepatan rotor akibat variasi kecepatan angin dengan kesalahan bias 1%

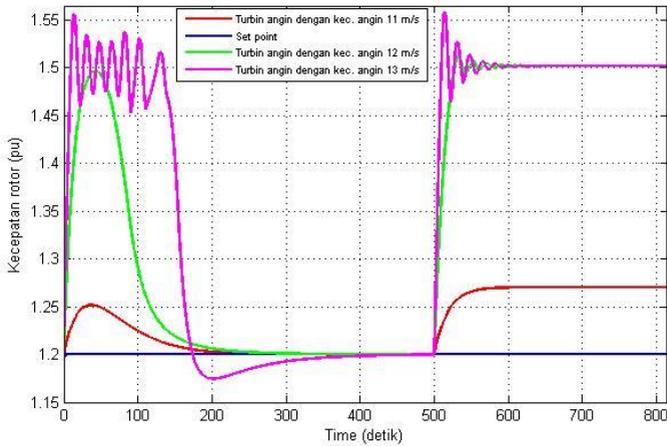
Pada Gambar 4.6 telah ditunjukkan bahwa kecepatan rotor akan berubah ketika ada kesalahan. Kecepatan rotor diberikan kesalahan bias pada detik ke-500. Kecepatan rotor juga memiliki karakteristik sistem yang berbeda akibat kecepatan angin yang bervariasi yaitu sebesar 11 m/s, 12 m/s dan 13 m/s. Kecepatan rotor akibat kecepatan angin 11 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 5.85% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Untuk kecepatan rotor akibat kecepatan angin 12 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 26% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Untuk kecepatan rotor akibat kecepatan angin 13 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 29.83% serta tidak memiliki *maximum undershoot*.



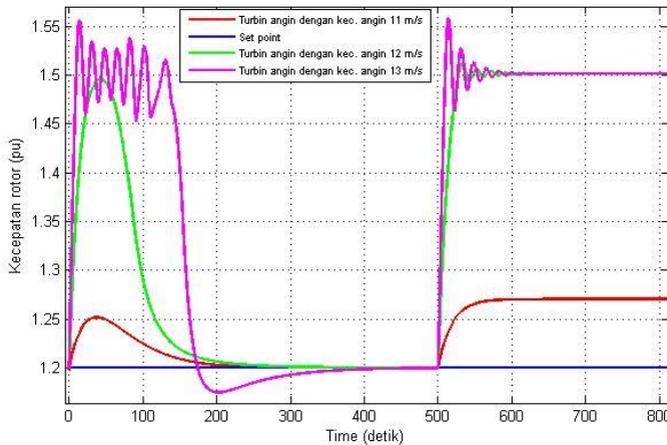
Gambar 4. 7 Kecepatan rotor akibat variasi kecepatan angin dengan kesalahan bias 5%

Pada Gambar 4.7 ditunjukkan bahwa kecepatan rotor akibat kecepatan angin 11 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 5.85% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Untuk kecepatan rotor akibat kecepatan angin 12 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 26% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Untuk kecepatan rotor akibat kecepatan angin 13 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 29.83% serta tidak memiliki *maximum undershoot*.

Pada Gambar 4.8 ditunjukkan bahwa kecepatan rotor akibat kecepatan angin 11 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 5.85% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Untuk kecepatan rotor akibat kecepatan angin 12 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 26% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Untuk kecepatan rotor akibat kecepatan angin 13 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 29.83% serta tidak memiliki *maximum undershoot*.



Gambar 4. 8 Kecepatan rotor akibat variasi kecepatan angin dengan kesalahan bias 10%



Gambar 4. 9 Kecepatan rotor akibat variasi kecepatan angin dengan kesalahan bias 20%

Pada Gambar 4.9 menunjukkan kecepatan rotor akibat kecepatan angin 11 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 5.85% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Untuk kecepatan rotor akibat kecepatan angin 12 m/s memiliki

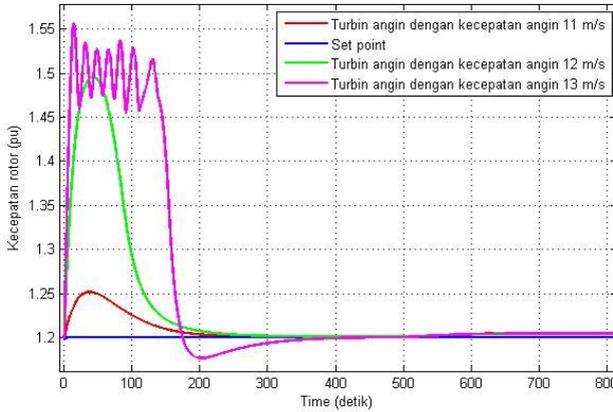
maximum overshoot sebesar 26% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Untuk kecepatan rotor akibad kecepatan angin 13 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 29.83% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Hasil dari penjelasan dari Gambar 4.6-4.9 dirangkum dan ditunjukkan oleh tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Karakteristik sistem akibad kesalahan bias

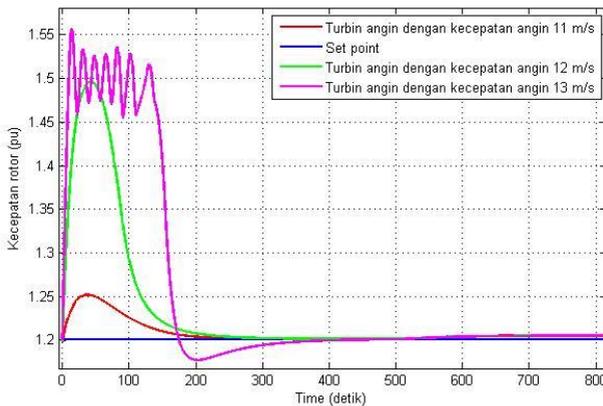
Karakteristik sistem		Kecepatan angin (m/s)	<i>Maximum Overshoot</i>	<i>Maximum Undershoot</i>	<i>Settling time</i> (detik)
Kesalahan sensor(bias)	1%	11	5.85%	-	~
		12	26%	-	~
		13	29.83%	-	~
	5%	11	5.85%	-	~
		12	26%	-	~
		13	29.83%	-	~
	10%	11	5.85%	-	~
		12	26.04%	-	~
		13	29.83%	-	~
	20%	11	5.85%	-	~
		12	26.04%	-	~
		13	29.83%	-	~

Sehingga observer akan mengkompensasi kesalahan seperti pada Gambar 4.10-4.13.

Pada Gambar 4.10 ditunjukkan bahwa algoritma AFTC mampu mengkompensasi kesalahan bias 1%. Karakteristik menunjukkan bahwa *maximum overshoot* sebesar 0.43% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Dengan *settling time* untuk kecepatan angin 11, 12 dan 13 m/s secara berurutan adalah sebesar 205, 250 dan 292 detik juga memiliki *error steady state* sebesar 0.43%.

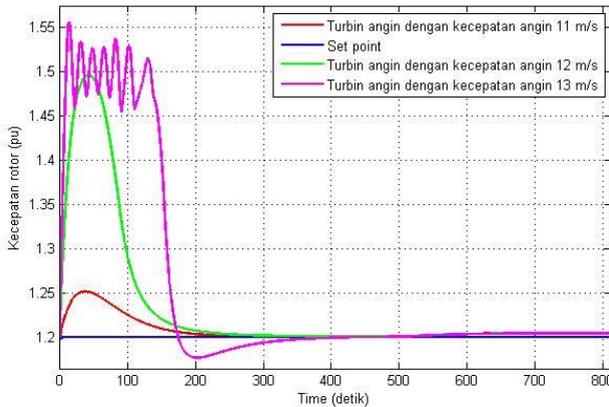


Gambar 4. 10 Grafik hasil kompensasi kesalahan bias 1%



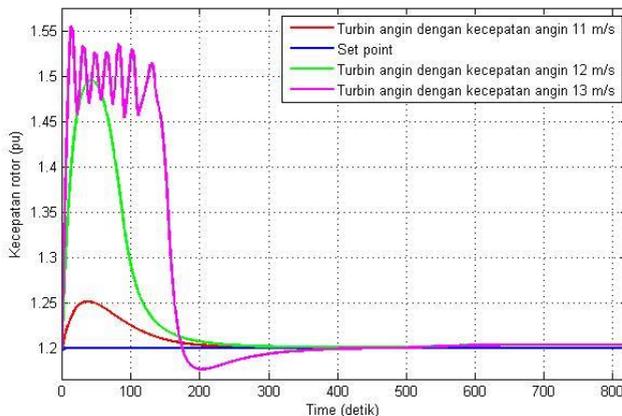
Gambar 4. 11 Grafik hasil kompensasi kesalahan bias 5%

Pada Gambar 4.11 ditunjukkan bahwa algoritma AFTC mampu mengkompensasi kesalahan bias 5%. Karakteristik menunjukkan bahwa *maximum overshoot* sebesar 0.42% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Dengan *settling time* untuk kecepatan angin 11, 12 dan 13 m/s secara berurutan adalah sebesar 144, 234 dan 272 detik juga memiliki *error steady state* sebesar 0.42%.



Gambar 4. 12 Grafik hasil kompensasi kesalahan bias 10%

Pada Gambar 4.12 ditunjukkan bahwa algoritma AFTC mampu mengkompensasi kesalahan bias 10%. Karakteristik menunjukkan bahwa *maximum overshoot* sebesar 0.4% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Dengan *settling time* untuk kecepatan angin 11, 12 dan 13 m/s secara berurutan adalah sebesar 140, 260 dan 283 detik juga memiliki *error steady state* sebesar 0.4%.



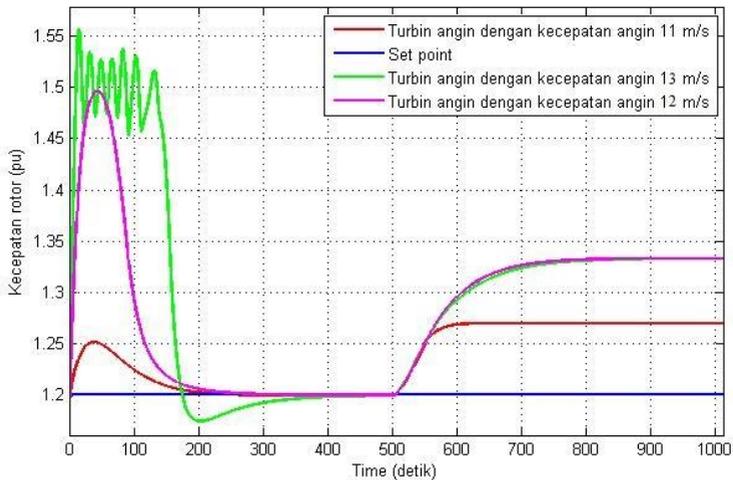
Gambar 4. 13 Grafik hasil kompensasi kesalahan bias 20%

Pada Gambar 4.13 ditunjukkan bahwa algoritma AFTC mampu mengkompensasi kesalahan bias 20%. Karakteristik menunjukkan bahwa *maximum overshoot* sebesar 0.367% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Dengan *settling time* untuk kecepatan angin 11, 12 dan 13 m/s secara berurutan adalah sebesar 145, 240 dan 280 detik juga memiliki *error steady state* sebesar 0.367%. Dan dari Gambar 4.10-4.13 dirangkum dalam Tabel 4.2

Tabel 4. 2 Karakteristik sistem hasil kompensasi oleh observer

Karakterisitik sistem		Kecepatan angin (m/s)	<i>Maximum Overshoot</i>	<i>Maximum Undershoot</i>	<i>Settling time</i> (detik)	<i>Error Steady State</i> (%)
Kesalahan sensor (bias)	1%	11	0.43%	-	205	0.43%
		12	0.43%	-	250	0.43%
		13	0.43%	-	292	0.43%
	5%	11	0.42%	-	144	0.42%
		12	0.42%	-	234	0.42%
		13	0.42%	-	272	0.42%
	10%	11	0.4%	-	140	0.4%
		12	0.4%	-	260	0.4%
		13	0.4%	-	283	0.4%
	20%	11	0.367%	-	145	0.367%
		12	0.367%	-	240	0.367%
		13	0.367%	-	280	0.367%

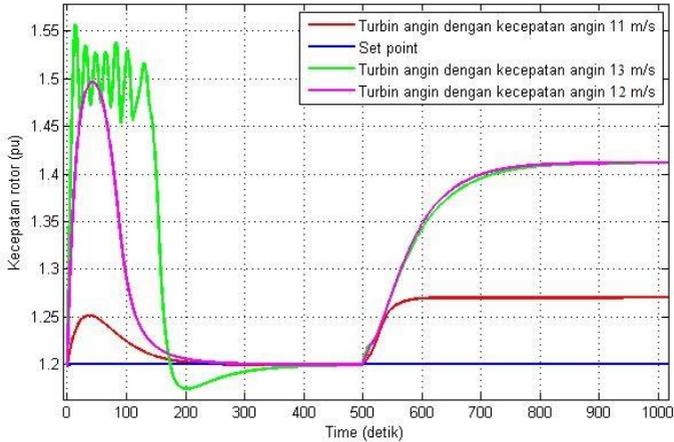
Untuk jenis kesalahan berikutnya adalah kesalahan sensitivitas sebesar 90%, 85% dan 80%. Hasilnya akan ditunjukkan pada Gambar 4.14-4.16.



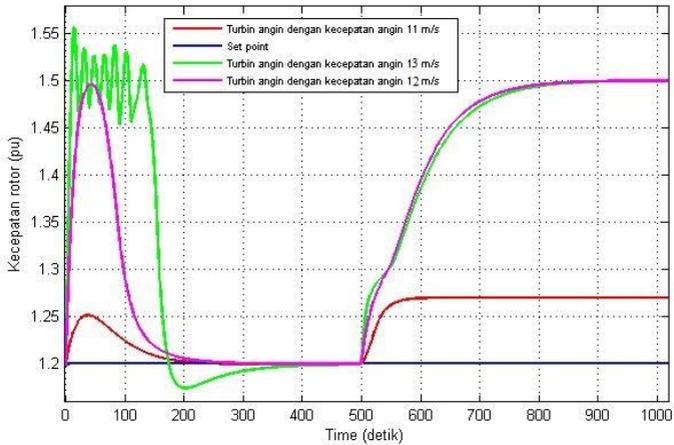
Gambar 4. 14 Grafik kecepatan rotor dengan kesalahan sensitivitas 90%

Pada Gambar 4.14 menunjukkan bahwa turbin angin diberi kesalahan pada detik ke-500 dan menunjukkan bahwa *maximum overshoot* sebesar 11.67% untuk kecepatan angin 12 dan 13 m/s sedangkan untuk kecepatan angin 11 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 5.85%.

Pada Gambar 4.15 menunjukkan bahwa turbin angin diberi kesalahan pada detik ke-500 dan menunjukkan bahwa *maximum overshoot* sebesar 18.33% untuk kecepatan angin 12 dan 13 m/s sedangkan untuk kecepatan angin 11 m/s memiliki *maximum overshoot* sebesar 5.85%.



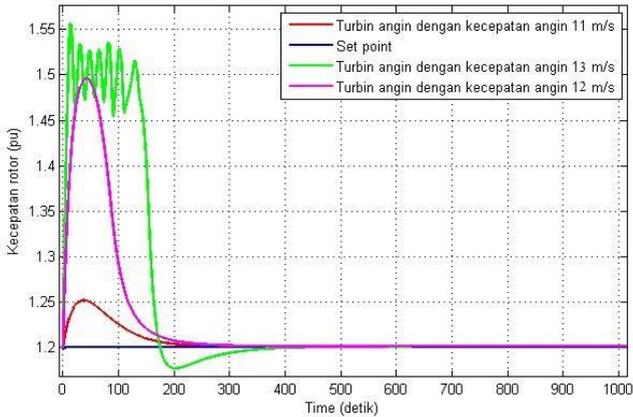
Gambar 4. 15 Grafik kecepatan rotor dengan kesalahan sensitivitas 85%



Gambar 4. 16 Grafik kecepatan rotor dengan kesalahan sensitivitas 80%

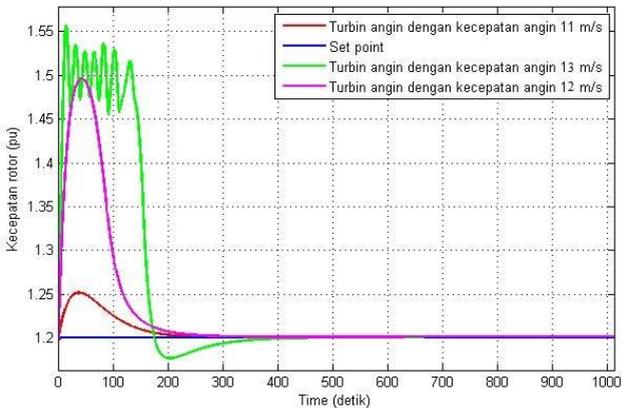
Pada Gambar 4.16 menunjukkan bahwa turbin angin diberi kesalahan pada detik ke-500 dan menunjukkan bahwa *maximum overshoot* sebesar 25.83% untuk kecepatan angin 12 dan 13 m/s sedangkan untuk kecepatan angin 11 m/s memiliki

maximum overshoot sebesar 5.85%. Dengan adanya kesalahan sensitivitas maka akan dilakukan kompensasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.17-4.19



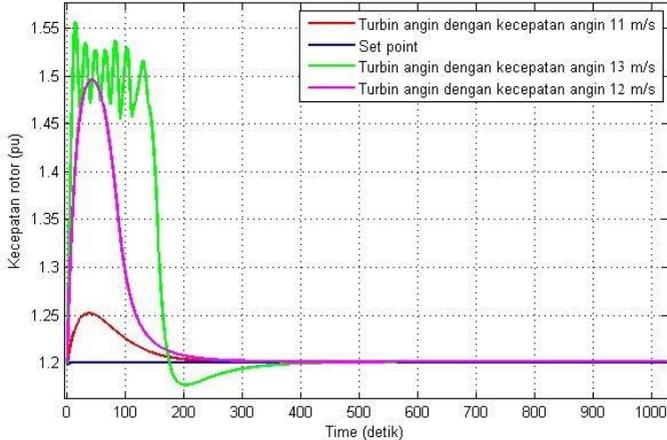
Gambar 4. 17 Hasil kompensasi kesalahan sensitivitas 90%

Pada Gambar 4.17 menunjukkan bahwa turbin angin diberi kesalahan pada detik ke-500 dan menunjukkan bahwa *maximum overshoot* sebesar 0.15% untuk kecepatan angin 11, 12 dan 13 m/s.



Gambar 4. 18 Hasil kompensasi kesalahan sensitivitas 85%

Pada Gambar 4.18 menunjukkan bahwa turbin angin diberi kesalahan pada detik ke-500 dan menunjukkan bahwa *maximum overshoot* sebesar 0.15% untuk kecepatan angin 11, 12 dan 13 m/s.



Gambar 4. 19 Hasil kompensasi kesalahan sensitivitas 80%

Pada Gambar 4.19 menunjukkan bahwa turbin angin diberi kesalahan pada detik ke-500 dan menunjukkan bahwa *maximum overshoot* sebesar 0.15% untuk kecepatan angin 11, 12 dan 13 m/s

4.2 Pembahasan

Pada tugas akhir ini dirancang sistem *fault tolerance fuzzy control* pada turbin angin dengan kesalahan sensor. Kesalahan tersebut nantinya akan diketahui oleh observer karena pada dasarnya pada perusahaann, plant tidak dapat mendeteksi adanya kesalahan yang terjadi di dalamnya. Maka dari itu dilakukan pembuatan model turbin angin karena dengan adanya model turbin angin maka observer akan mendeteksi kesalahan dengan mendapat informasi dari model tersebut sehingga jika ada kesalahan bisa kembali dalam kondisi awal ketika belum adanya kesalahan. Pada plant diatas sensor terletak pada kecepatan rotor yang memiliki kecepatan sebesar 1.2 power unit (pu).

Pada tugas akhir ini juga diberi dua jenis kesalahan yaitu bias dan sensitivitas. Pada kesalahan bias, ketika adanya kesalahan pada sensor maka kecepatan rotor akan berubah sesuai dengan besar kesalahan, maka di hasil simulasi diberi kesalahan sebesar 1%, 5%, 10% dan 20% sehingga kecepatan rotor di plant berubah dan dikompensasi dengan baik sehingga plant tersebut akan kembali pada bentuk sebelum terjadinya kesalahan sehingga rotor plant kembali bergerak pada kecepatan sekitar 1.2 pu kembali. Untuk kesalahan sensitivitas dilakukan pada kesalahan sebesar 90%, 85% dan 80% dan kecepatan rotor juga berubah. Ketika diberi kompensasi maka kecepatan rotor juga berubah kembali seperti awal sebelum ada kesalahan.

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada tugas akhir ini terdapat rumusan masalah sebelumnya untuk mengatasi kesalahan sensor pada turbin angin salah satunya yaitu menggunakan metode *Fault Tolerance Control* (FTC) dengan *fuzzy PI* sebagai *controller*. Kesimpulan dari tugas akhir ini :

- a. Kecepatan rotor diberikan kesalahan bias 1%, 5%, 10% dan 20% pada detik ke-500. Kecepatan rotor juga memiliki karakteristik sistem yang berbeda akibat kecepatan angin yang bervariasi yaitu sebesar 11 m/s, 12 m/s dan 13 m/s. Kecepatan rotor akibat kecepatan angin 11 m/s memiliki rata-rata *maximum overshoot* sebesar 5.85% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Untuk kecepatan rotor akibat kecepatan angin 12 m/s memiliki rata-rata *maximum overshoot* sebesar 26% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Untuk kecepatan rotor akibat kecepatan angin 13 m/s memiliki rata-rata *maximum overshoot* sebesar 29.83% serta tidak memiliki *maximum undershoot*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kesalahan bias tersebut berhasil dikompensasi dengan baik
- b. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kesalahan sensitivitas 90%, 85% dan 80% juga berhasil dikompensasi dengan baik disaat diberi kesalahan pada detik ke-500 dan menunjukkan bahwa rata-rata *maximum overshoot* sebesar 18.61% untuk kecepatan angin 12 dan 13 m/s sedangkan untuk kecepatan angin 11 m/s memiliki rata-rata *maximum overshoot* sebesar 5.85%.

5.2 Saran

Penulis memberikan saran untuk pengembangan penelitian lebih lanjut sebagai berikut:

- a. Linearisasi untuk turbin angin pada matlab 2009a cukup sulit maka perlu linearisasi secara manual untuk bisa menyelesaikannya.

- b. *Fuzzy* PI hanya berlaku pada kondisi kecepatan angin tertentu dan non linear sehingga lebih baik untuk menggunakan beberapa *fuzzy* PI dengan menggunakan switching agar bisa melakukan simulasi pada kecepatan angin apapun.

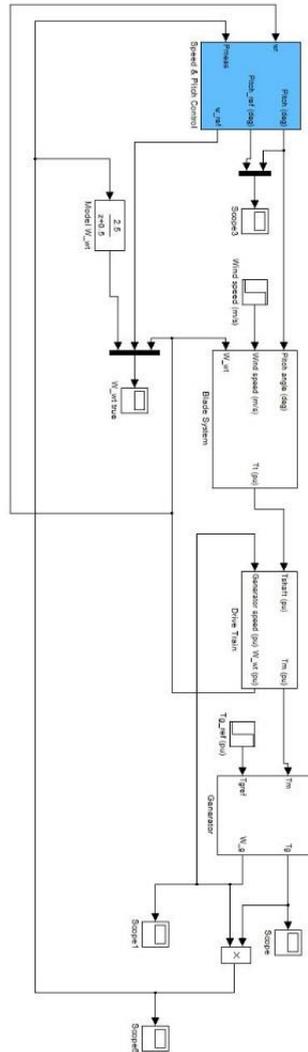
DAFTAR PUSTAKA

- Darmawan, H., & Ibnu Kahfi Bachtiar ST, M. (2014). PERANCANGAN TURBIN ANGIN TIPE SAVONIUS L SUMBU VERTIKAL.
- HotSpark. (2012). *Fixes for 12V Signal Style Tachometers*. Diambil kembali dari Hot-spark Web site: www.hot-spark.com/tachometer-fix.pdf
- I, S. M. (2012, December). *Informasi Data Pokok Kota Surabaya Tahun 2012*. Diambil kembali dari Surabaya Web Site: www.surabaya.go.id/uploads/attachments/files/doc_2063.pdf
- Indriawati, K., Agustinah, T., & Jazidie, A. (2013). Reconfigurable Fault-Tolerant Control of Linear System with Actuator and Sensor Faults. 2-4.
- Jantzen, J. (1998). *Design Of Fuzzy Controllers*. Lyngby: Technical University of Denmark, Department of Automation.
- Jiang, J. (2005). Fault Tolerance Control System - An introduction overview. *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 1-14.
- Manwell, J. G. (2009). *Wind Energy Explained* (2nd ed.). Chicester, USA: John Wiley & Sons Ltd.
- Marnoto, T. (2011). Peningkatan Efisiensi Kincir Angin Poros Vertikal Melalui Sistem Buka-Tutup Sirip Pada 3 Sudut.
- Miller, N. W., Price, W. W., & Sanchez-Gasca, J. J. (2003). *Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine-Generators*. USA: GE Power Systems.
- moparmaniac59. (2012, July 29). Diambil kembali dari Barracuda Challenger Community: <http://www.cuda-challenger.com/cc/index.php?topic=86460.0>

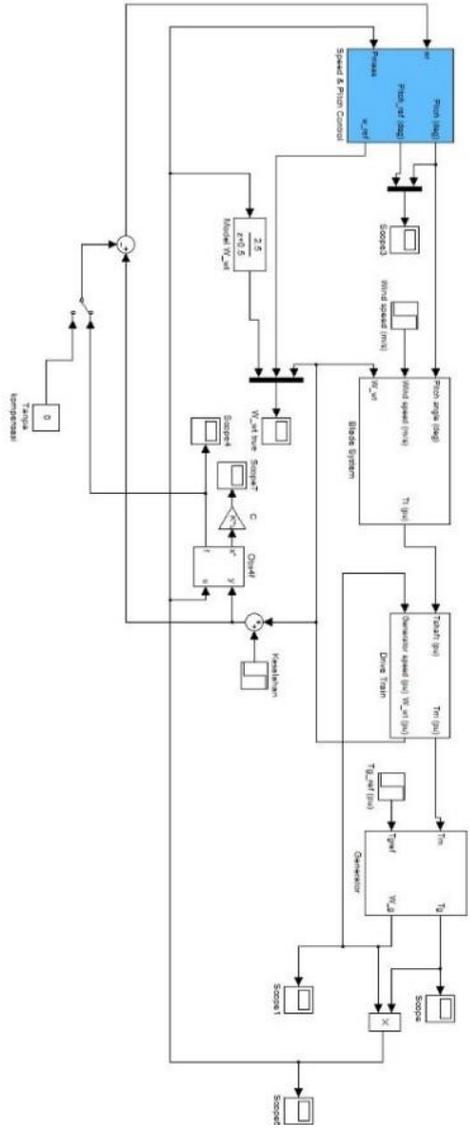
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*. Pearson Education, Inc.
- Sagrillo, M. (2002). *Choosing a Home-Sized Wind Generator*. California.
- Shaker, M. S. (2012). Active Fault-Tolerant Control of Nonlinear Systems with Wind Turbine Application. 188.
- Zhang, Y., & Jiang, J. (2008). Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. 1-2.

LAMPIRAN A SIMULINK WIND TURBINE PADA MATLAB 2009a

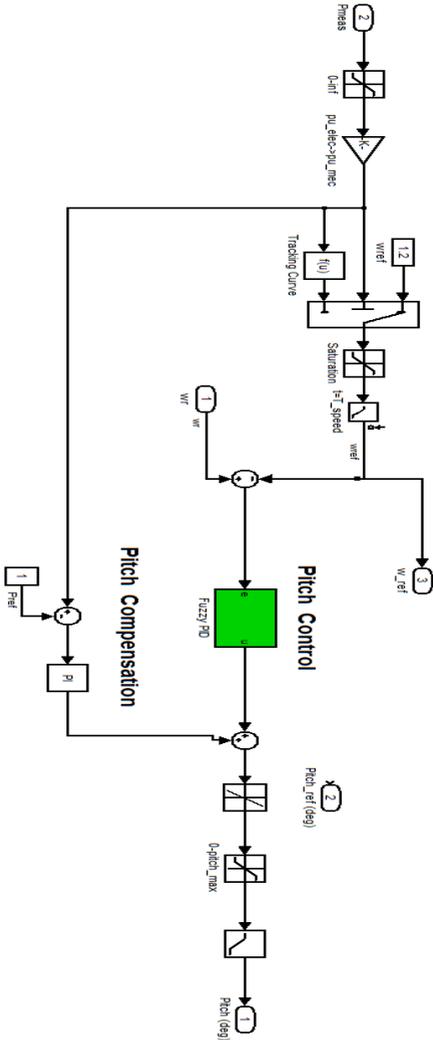
A. Plant dari wind turbine



C. Plant, observer, kesalahan dan kompensasi

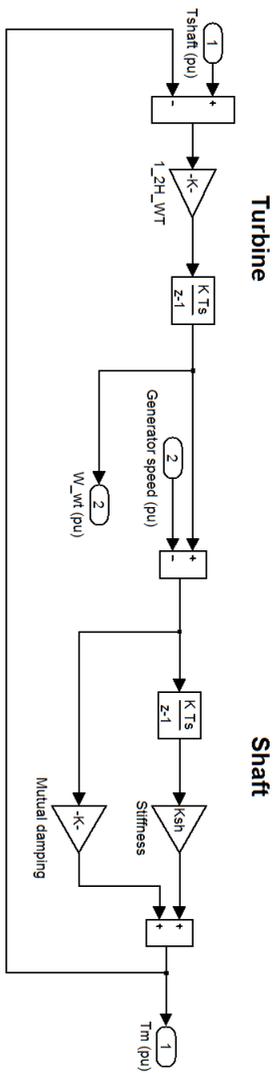


D. Speed and Pitch Control system

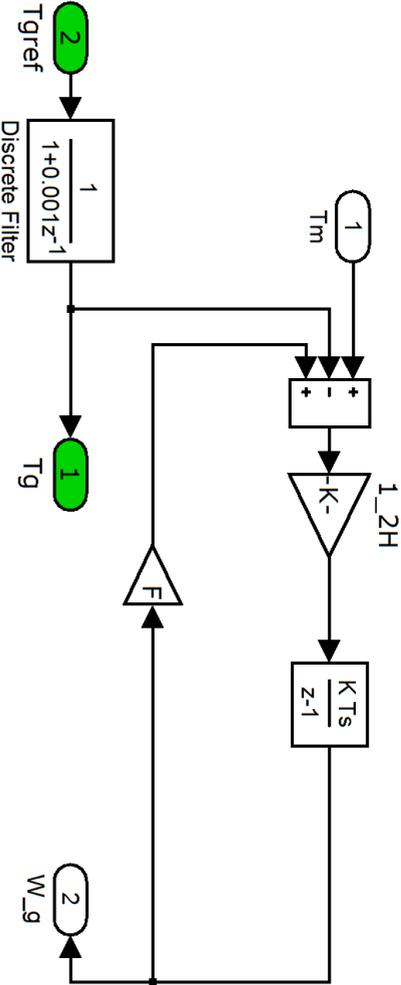


Speed Regulator
(Torque control)

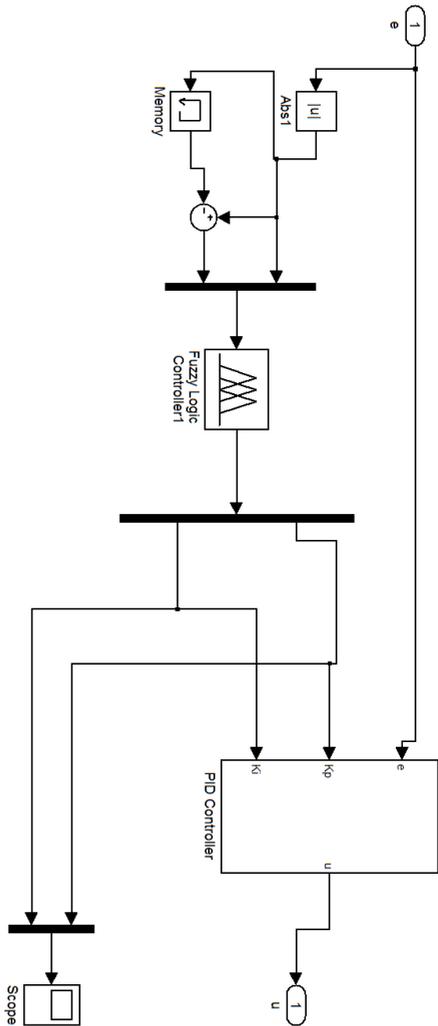
F. Drive train



G. Generator



H. Fuzzy PI



LAMPIRAN B

M-FILE DARI WIND TURBINE PADA MATLAB 2009a

A. Data Turbin Angin

```
% Wind turbine data
Pnom = 1.5e6/0.9;
Pmec1 = 1.5e6;
Pmec=Pmec1*1;
wind0 = 11; % (m/s)
wind_speed_CpMax = 11; % (m/s)
Ts = 5e-4;
c1 = 0.6450;
c2 = 116;
c3 = .4;
c4 = 5;
c5 = 21;
c6 = .00912; % Set Pmin in stall condition
           (does not vary with wind_speed_Pmax)
c7 = .08;
c8 = .035;
theta=0;
CpMax=.5;
lambda_CpMax=9.9495;

c1_c8=[c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8];

% Drive train data
H_WT = 4.32; % (s)
Ksh = 80.27; % (pu of nominal mechanical
            torque/rad)
D_mutual = 1.5; % (pu of nominal mechanical
            torque/pu dw)
w_wt0 = 1.2; % (pu of nominal speed)
torque0 = 0.83; % (pu of nominal mechanical
            torque)

% Reference rotor speed (wref) data
Speed_max=1.2; % (pu)
Speed_min=0.7; % (pu)
```

```

T_speed = 5; %s

% Speed regulator data
Kp_speed = 3;
Ki_speed = 0.6;
Max_speed_reg=1; %Maximum output value for PI
speed regulator (pu)

% Pitch control data
Kp_pitch = 150;
pitch_max = 27; % (deg)
pitch_rate = 10; % (deg/s)
Pitch_time_constant=0.01; % (s)

% Pitch compensation data
Kp_compensation = 3;
Ki_compensation = 30;

% Generator data
H = 0.685; % Inertia constant (s)
F = 0.01; % Friction factor (pu)
wmo = 1.2; % (pu of nominal speed)
init = -0.2;

```

B. Program Observer

```

%cara memanggil hasil linearisasi
[A,B,C,D]=tf2ss(2.5,[1 0.5]);

%observer
n = length(A);
p = size(C,1);
m = size(B,2);
Fs = -0.00043;
fs = size(Fs,2); %Jumlah Baris Fs menunjukan
state
Abar = 1;
Aa = [A zeros(n,p); Ts*Abar*C (1-
Ts*Abar)*eye(p)];

```

```
Ba = [B; zeros(p,m)];
Ea = [zeros(n,fs);Abar*Fs];
Ca = [zeros(p,n) eye(p)];
Atild = [Aa Ea; zeros(fs,n+p) zeros(fs)];
Btild = [Ba; zeros(fs,m)];
Ctild = [Ca zeros(p,fs)];
p1 = 0.4;
p2 = 0.3;
p3 = 0.5;
Ktild = place(Atild',Ctild',1*[p1 p2 p3])
```

“Halaman ini memang dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Nama penulis Alief Ghazi dilahirkan di Probolinggo, tanggal 1 Mei 1995 dari bapak yang bernama Hakam Abubakar dan ibu bernama Ardayati Ratna. Saat ini penulis tinggal di Jalan Mawar Merah no 3, Probolinggo, Provinsi Jawa Timur. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN Sukabumi X pada tahun 2007, pendidikan di SMPN 1 Probolinggo pada tahun 2010, pendidikan di SMAN 1 Probolinggo pada tahun 2013 dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang.

Pada bulan Juli 2017 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Perancangan Sistem Fault Tolerance Fuzzy Control Pada Turbin Angin Dengan Kesalahan Pada Sensor**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui *email* : aliefghazi@gmail.com

