



TUGAS AKHIR - TF 141581

MONITORING KEANDALAN *REAL-TIME* PADA SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN ANGIN BERDASARKAN ESTIMASI KESALAHAN

**SARWENDA KUSUMA WARDHANI
NRP. 0231144000041**

**Dosen Pembimbing:
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
Ir. Ya'umar, M.T.**

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT - TF 141581

**REAL-TIME RELIABILITY MONITORING FOR
WIND TURBINES SPEED CONTROL SYSTEMS
BASED ON FAULT ESTIMATION**

SARWENDA KUSUMA WARDHANI
NRP. 0231144000041

Supervisor:
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
Ir. Ya'umar, M.T.

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Sarwenda Kusuma Wardhani
NRP : 023114410000041
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 "Monitoring Keandalan *Real-Time* Pada Sistem Pengendalian Kecepatan Turbin Angin Berdasarkan Estimasi Kesalahan" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 22 Juni 2018
Yang membuat pernyataan,



Sarwenda Kusuma Wardhani
NRP. 02311440000041

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**LEMBAR PENGESAHAN I
TUGAS AKHIR**

**MONITORING KEANDALAN *REAL-TIME* PADA
SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN
ANGIN BERDASARKAN ESTIMASI KESALAHAN**

Oleh:

Sarwenda Kusuma Wardhani
NRP. 0231144000041

Surabaya, 22 Juni 2018

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
NIPN. 19760523 200012 2 001

Ir. Ya'umar, M.T.
NIPN. 19540406 198103 1 003

Mengetahui,

**Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS**



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 19780907 200312 1 002

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**MONITORING KEANDALAN *REAL-TIME* PADA
SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN
ANGIN BERDASARKAN ESTIMASI KESALAHAN**

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:

SARWENDA KUSUMA WARDHANI
NRP. 0231144000041

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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

SURABAYA
JUNI, 2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

MONITORING KEANDALAN *REAL-TIME* PADA SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN ANGIN BERDASARKAN ESTIMASI KESALAHAN

Nama : Sarwenda Kusuma Wardhani
NRP : 02311440000041
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
Ir. Ya'umar, M.T.

ABSTRAK

Kegagalan turbin angin seringkali memberikan dampak yang buruk bagi industri tenaga angin. Hal ini dikarenakan biaya perawatan saat turbin angin mengalami kegagalan jauh lebih besar dibanding biaya perawatan saat turbin angin belum mengalami kegagalan. Kegagalan pada turbin angin ini dapat diminimalisir dengan melakukan monitoring keandalan turbin angin *real-time*. Pada makalah ini dilakukan perancangan monitoring keandalan *real-time* pada turbin angin berdasarkan estimasi kesalahan. Langkah-langkah yang perlu dilakukan adalah studi spesifikasi turbin angin, pemodelan turbin angin, perancangan dan uji algoritma *observer* serta algoritma monitoring keandalan *real-time*. Uji *observer* dan uji monitoring keandalan dilakukan dengan terlebih dahulu memberikan kesalahan sensitivitas pada sensor, sebesar 5%; 7,5%; 10%; dan 12,5%. Berdasarkan hasil uji telah dilakukan, pada kesalahan sensitivitas diberikan pada sensor kecepatan sebesar 5%, 7,5%, 10% dan 12,5%, masing-masing mampu mengestimasi kesalahan yang telah disimulasikan pada detik ke-1300; 1350; 1400; dan 1450. Berdasarkan hasil uji monitoring keandalan *real-time*, didapatkan bahwa pada kesalahan sensitivitas sensor sebesar 5%; 7,5%; 10%; dan 12,5%, masing-masing nilai keandalan mulai mengalami penurunan pada detik ke-532,6; 532,8; 533,2; dan 533,7.

kata kunci - turbin angin, sensor, keandalan *real-time*, *observer*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**REAL-TIME RELIABILITY MONITORING FOR WIND
TURBINES SPEED CONTROL SYSTEMS BASED ON
FAULT ESTIMATION**

Name : Sarwenda Kusuma Wardhani
NRP : 0231144000041
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisors : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
Ir. Ya'umar, M.T.

ABSTRACT

Failure of wind turbines often has a devastating impact on the wind power industry. This is because the cost of maintenance when the wind turbine failure is much greater than the cost of maintenance when wind turbines have not failed. Failure of this wind turbine can be minimized by monitoring the reliability of real-time wind turbines. In this paper the design of real-time reliability monitoring on wind turbines is based on error estimation. The steps that need to be done are wind turbine specification studies, wind turbine modeling, design and observer test algorithm and real-time reliability monitoring algorithm. The observer test and reliability test are performed by first giving sensitivity error to the sensor, at 5%; 7.5%; 10%; and 12.5%. Based on the test results, the sensitivity error was given at 5%, 7.5%, 10% and 12.5% velocity sensors, each capable of estimating simulated errors at 1300 seconds; 1350; 1400; and 1450. Based on real-time reliability test result, it was found that at sensor sensitivity error of 5%; 7.5%; 10%; and 12.5%, each reliability value starts to decrease at 532.6 seconds; 532.8; 533.2; and 533.7.

keyword - wind turbine, sensor, real-time reliability, observer.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga dapat terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **“Monitoring Keandalan *Real-Time* Pada Sistem Pengendalian Kecepatan Turbin Angin Berdasarkan Estimasi Kesalahan”**.

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Satawi dan Ibu Rukoya, selaku kedua orang tua penulis yang tanpa lelah memberikan segala cinta, kasih sayang, do'a, perhatian, serta dukungan moril dan materil.
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T dan Bapak Ir. Ya'umar, MT., selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu serta bimbingan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Seluruh dosen Teknik Fisika ITS, atas segala ilmu, bimbingan, petunjuk, dan nasihat yang sangat bermanfaat.
4. Seluruh anggota asisten Laboratorium Pengukuran Fisis Teknik Fisika ITS, atas segala dukungan, bantuan, kerjasama, hiburan serta fasilitasnya.
5. Seluruh teman–teman Departemen Teknik Fisika ITS, teman-teman Teknik Fisika ITS angkatan 2014 dan seluruh teman seperjuangan dalam tugas akhir, terima kasih untuk semuanya.
6. Annisa Marlina Fitria, selaku teman seperjuangan tugas akhir saya yang selalu menemani dalam suka dan duka pada proses pengerjaan tugas akhir ini, terima kasih untuk kerjasama, dukungan serta bantuannya.
7. Seluruh karyawan dan civitas akademika Teknik Fisika ITS, terima kasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Namun, semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika ITS khususnya, dan civitas akademika ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa lainnya.

Surabaya, 22 Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
COVER PAGE	
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	
LEMBAR PENGESAHAN I	
LEMBAR PENGESAHAN II	
ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR NOTASI	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TEORI PENUNJANG	5
2.1 Turbin Angin	5
2.1.1 Komponen Turbin Angin	5
2.2 Pemodelan Turbin Angin	8
2.3 Sistem Kendali PI	12
2.4 <i>Observer</i>	13
2.5 Keandalan	16
2.6 Keandalan <i>Real-Time</i>	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Studi Spesifikasi Turbin Angin	19
3.2 Pemodelan Sistem Turbin Angin	23
3.3 Perancangan Sistem Kendali PI	25
3.4 Perancangan Algoritma <i>Observer</i>	26
3.5 Perancangan Uji Kesalahan Sensor	33
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Uji <i>Observer</i>	35
4.2 Uji Algoritma Monitoring Keandalan <i>Real-Time</i>	39

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran	45
DAFTAR PUSTAKA.....	47
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Bagian-bagian turbin angin (Thomas, 2017)	8
Gambar 2. 2 Blok diagram pemodelan turbin angin (Sloth, 2011)	9
Gambar 2. 3 Ilustrasi koefisien daya, C_p (Sloth, 2011).....	11
Gambar 2. 4 Diagram blok sistem pengendalian tertutup	12
Gambar 2. 5 <i>Observer</i> (Ogata, 1987).....	15
Gambar 2. 6 Kestabilan <i>pole placement</i> sistem diskrit.....	15
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir.....	21
Gambar 3. 2 (Lanjutan).....	22
Gambar 3. 3 Diagram blok sistem pengendalian kecepatan turbin angin.....	26
Gambar 3. 4 Diagram blok sistem pengendalian yang telah terintegrasi dengan <i>observer</i>	33
Gambar 4. 1 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 5%.....	35
Gambar 4. 2 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 5% (perbesaran Gambar 4.1)	36
Gambar 4. 3 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 7,5%	36
Gambar 4. 4 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 7,5% (perbesaran Gambar 4.3)	37
Gambar 4. 5 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 10%	38
Gambar 4. 6 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 10% (perbesaran Gambar 4.5)	38
Gambar 4. 7 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 12,5%	39
Gambar 4. 8 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 12,5% (perbesaran Gambar 4.7).....	39
Gambar 4. 9 Hasil uji monitoring keandalan <i>real-time</i> dengan kesalahan sensitivitas 5%	40
Gambar 4. 10 Hasil uji monitoring keandalan <i>real-time</i> dengan kesalahan sensitivitas 7,5%	41

Gambar 4. 11 Hasil uji monitoring keandalan *real-time* dengan kesalahan sensitivitas 10% 42

Gambar 4. 12 Hasil uji monitoring keandalan *real-time* dengan kesalahan sensitivitas 12,5% 43

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Turbin Angin Pada Simulasi (J. F. Manwell & J. G. McGowan, 2009)	19
Tabel 3. 2 Parameter – parameter pada pemodelan turbin angin (Nicholas, dkk. 2003).....	20
Tabel 4. 1 Hasil uji monitoring keandalan <i>real-time</i> dengan kesalahan sensitivitas 5%.....	40
Tabel 4. 2 Hasil uji monitoring keandalan <i>real-time</i> dengan kesalahan sensitivitas 7,5%	41
Tabel 4. 3 Hasil uji monitoring keandalan <i>real-time</i> dengan kesalahan sensitivitas 10%	42
Tabel 4. 4 Hasil uji monitoring keandalan <i>real-time</i> dengan kesalahan sensitivitas 12.5%	43

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR NOTASI

P	=	<i>daya, watt</i>
R	=	<i>jari-jari, m</i>
\dot{m}	=	<i>mass rate, kg/s</i>
g	=	<i>percepatan gravitasi, m/s²</i>
ρ	=	<i>massa jenis udara, kg/m³</i>
A	=	<i>luas permukaan, m²</i>
n	=	<i>faktor pengali</i>
v_w	=	<i>kecepatan angin, m/s</i>
C_p	=	<i>koefisien daya</i>
β	=	<i>fungsi sudut pitch pada baling-baling turbin</i>
λ	=	<i>rasio antara kecepatan baling-baling dan kecepatan angin</i>
T_a	=	<i>torsi aerodinamik, Nm</i>
T_g	=	<i>torsi generator, Nm</i>
\dot{T}_g	=	<i>turunan T_g, Nm/s</i>
$T_{g,ref}$	=	<i>torsi generator referensi, Nm</i>
T_m	=	<i>torsi mekanik generator, Nm</i>
K_p	=	<i>gain proportional</i>
K_e	=	<i>gain observer</i>
$P(z)$	=	<i>pengendali P dalam bentuk transformasi z</i>
$e(z)$	=	<i>sinyal error dalam bentuk transformasi z</i>
τ_i	=	<i>konstanta waktu integral</i>
τ_g	=	<i>waktu konstan, detik</i>
T_s	=	<i>waktu cuplik, detik</i>
H_{wt}	=	<i>konstanta inersia poros berkecepatan tinggi</i>
H	=	<i>konstanta inersia poros berkecepatan rendah</i>
K_{sh}	=	<i>konstanta pegas pada rotor</i>
D_{mutual}	=	<i>konstanta redaman pada motor</i>
F	=	<i>konstanta redaman luar generator</i>
ω_r	=	<i>kecepatan sudut rotor, rad/s</i>
$\dot{\omega}_r$	=	<i>turunan ω_r, rad/s²</i>
ω_g	=	<i>kecepatan sudut generator, rad/s</i>
$\dot{\omega}_g$	=	<i>turunan ω_g, rad/s²</i>

n_g	=	<i>rasio gigi</i>
J_g	=	<i>inersia generator, kg.m²</i>
θ_Δ	=	<i>sudut torsi</i>
$\dot{\theta}_\Delta$	=	<i>sudut torsi θ_Δ</i>
A	=	<i>matriks keadaan (state)</i>
B	=	<i>matriks masukan/matriks kendali</i>
C	=	<i>matriks keluaran</i>
D	=	<i>matriks gangguan</i>
$u(k)$	=	<i>masukan kendali</i>
$u(k + 1)$	=	<i>turunan vektor keadaan</i>
$y(k)$	=	<i>vektor keluaran</i>
$\hat{y}(k)$	=	<i>estimasi state $y(k)$</i>
$x(k)$	=	<i>vektor keadaan (state)</i>
$\hat{x}(k)$	=	<i>estimasi state $x(k)$</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri tenaga angin secara global menghadapi tantangan berat dalam meningkatkan keandalan dan mengurangi biaya perawatan. Kondisi cuaca dapat mempengaruhi keandalan turbin angin secara substansial. Terjadinya cuaca buruk seperti badai dan hembusan angin yang kencang akan menghasilkan tekanan pada komponen turbin dan mengurangi *lifetime* komponen (Eunshi, 2013). Pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, analisis data lapangan menunjukkan bahwa turbin angin di Denmark dan Jerman mengalami kegagalan tiap periode 12 bulan. Hal ini bertepatan dengan datangnya musim hujan tahunan. Sehingga dapat diketahui bahwa terdapat hubungan yang kuat antara jumlah kegagalan dengan tingkat kecepatan angin (Tavner, 2006). Meskipun lebih banyak daya yang dapat dihasilkan selama musim dengan angin kencang, turbin angin rentan terhadap kegagalan selama kondisi cuaca tersebut. Perbaikan yang dilakukan pun akan sulit dilakukan serta membutuhkan biaya yang relatif mahal. Monitoring keandalan yang akurat, strategi operasi dan pemeliharaan dengan biaya yang sedikit sangat dibutuhkan oleh industri tenaga angin saat ini (Byon, 2013).

Keandalan suatu sistem ditentukan secara keseluruhan ketika sistem itu dibuat. Namun, keandalan sistem tersebut akan menurun selama penggunaan karena degradasi komponen dan pengaruh eksternal sistem. Semakin besar kemungkinan sistem akan mengalami kegagalan, semakin rendah tingkat keandalan sistem tersebut. Oleh karena itu, keandalan suatu sistem terkait erat dengan *lifetime* sistem. Jembatan yang menghubungkan kendalan dengan *lifetime* sistem adalah evaluasi dan monitoring keandalan *real-time*. Penelitian mengenai monitoring keandalan *real-time* ini telah berkembang sejak awal 1990an. Analisis keandalan *real-time* biasanya mempertimbangkan penurunan performansi, yang ditandai oleh beberapa variabel kinerja. Variabel kinerja tersebut diukur *real-time* dan sistem atau komponen dianggap gagal saat

variabel kinerja mencapai beberapa ambang batas yang telah ditentukan sebelumnya (Xu, 2009).

Pada penelitian sebelumnya telah diperkenalkan sebuah metode baru dalam memonitoring keandalan *real-time* untuk sistem dinamik yang digabungkan dengan algoritma estimasi kesalahan. Faktor yang dapat mengurangi keandalan sistem dinamik tersebut dimodelkan sebagai sebuah masukan kesalahan tambahan pada sistem, dan kesalahan diasumsikan *linear* terhadap waktu (Xu dkk, 2009). Algoritma estimasi kesalahan *real-time* dapat dinyatakan dalam sebuah *observer*. Sebelumnya (Ghazi, 2017) dan (Helmi, 2018) telah dilakukan penelitian mengenai penggunaan *observer* pada perancangan *Fault Tolerant Control* untuk mengakomodasi kesalahan pada sensor dan aktuator pada sistem pengendalian kecepatan turbin angin.

Oleh karena itu, penelitian ini merancang monitoring keandalan *real-time* pada sistem pengendalian kecepatan turbin angin berdasarkan estimasi kesalahan, yang diharapkan mampu menghasilkan nilai keandalan *real-time* yang akurat.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka didapatkan permasalahan dalam tugas akhir ini sebagai berikut:

- Bagaimana merancang *observer* yang dapat digunakan untuk mendapatkan estimasi kesalahan sensor pada sistem pengendalian kecepatan turbin angin?
- Bagaimana merancang sistem monitoring keandalan *real-time* menggunakan hasil estimasi kesalahan sensor pada sistem pengendalian kecepatan turbin angin?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini dalam tugas akhir ini sebagai berikut:

- Merancang *observer* pada sistem pengendalian kecepatan turbin angin yang dapat digunakan untuk mendapatkan estimasi kesalahan sensor.

- Merancang sistem monitoring keandalan *real-time* pada sistem pengendalian kecepatan turbin angin berdasarkan hasil estimasi kesalahan sensor pada sistem pengendalian kecepatan turbin angin.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- Variabel yang diukur adalah kecepatan generator dengan kesalahan pada sensor.
- Algoritma pengendalian yang digunakan pada penelitian ini yaitu jenis pengendalian PI.
- Jenis turbin angin adalah *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dengan daya nominal 400 Watt.
- Keandalan yang dimaksud pada penelitian ini adalah keandalan *real-time*, bukan keandalan yang diperoleh dari data *maintenance*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 Turbin Angin

Sistem pembangkit dengan menggunakan tenaga turbin angin bekerja dengan cara sederhana. Pada mulanya angin akan memutar bilah turbin, dimana terjadi perputaran poros (*crank shaft*) pada turbin angin secara lambat. Gerakan poros tersebut akan diperkuat oleh *gearbox*, sebelum diteruskan pada generator yang berputar secara cepat. Generator akan menghasilkan tenaga, yang kemudian dipergunakan oleh *slip ring* dan ditarik keluar oleh *carbon brushes* yang terpasang di dekat *slip ring*. Daya yang dihasilkan akan dibawa menuju *grid* (Russell, 2015).

Konfigurasi berbeda pada turbin angin dengan menggunakan teknologi inovatif telah dikembangkan selama beberapa dekade terakhir. Tujuan utamanya yaitu untuk meningkatkan daya yang dihasilkan oleh turbin angin. Konfigurasi yang paling umum adalah sumbu horizontal turbin angin dengan tiga *blade*, dimana kombinasi yang berbeda pada kecepatan rotasi, kontrol daya, konfigurasi *drive train* dan generator yang digunakan (Jesús dkk, 2013).

Jenis turbin angin dibedakan berdasarkan arah orientasi porosnya, yaitu *vertical axis wind turbine* (VAWT) dan *horizontal axis wind turbine* (HAWT). Kedua jenis turbin angin tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. VAWT secara umum banyak digunakan pada daerah yang memiliki kecepatan angin rata-rata rendah atau kurang dari 5 m/detik. Turbin angin tipe VAWT memiliki bentuk lebih sederhana dibanding dengan sistem HAWT. Daerah kerja turbin angin tipe HAWT memiliki rentang penggunaan pada daerah operasi yang sangat luas (kecepatan angin rendah sampai kecepatan tinggi) dengan ukuran dari skala kecil sampai skala besar.

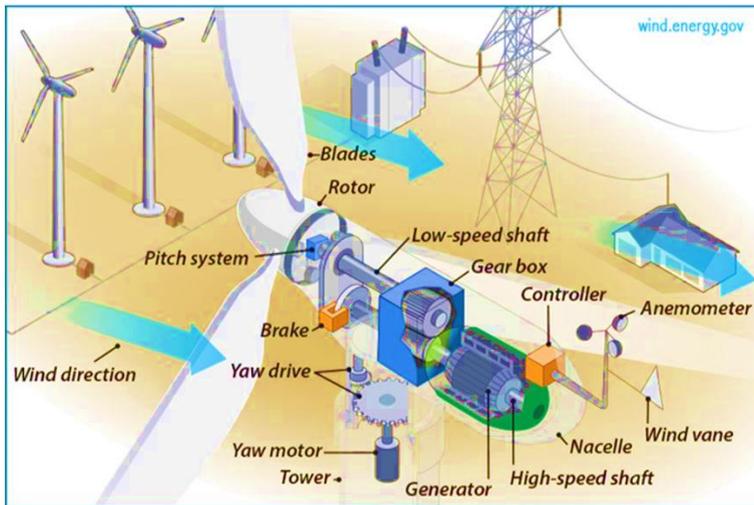
2.1.1 Komponen Turbin Angin

Pada turbin angin terdapat komponen-komponen yang memiliki fungsi berbeda-beda, antara lain yaitu:

- *Gear Box*
Alat ini berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi. Biasanya *gearbox* yang digunakan sekitar 1:60.
- *Brake System*
Alat ini digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah *gearbox* agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya. Generator ini akan menghasilkan energi listrik maksimal pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Kehadiran angin diluar diguaan akan menyebabkan putaran yang cukup cepat pada poros generator, sehingga jika tidak di atasi maka putaran ini dapat merusak generator.
- Generator
Generator adalah salah satu komponen terpenting dalam pembuatan sistem turbin angin. Generator ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC (*alternating current*) yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih sinusoidal.
- Penyimpanan Energi
Keterbatasan ketersediaan akan energi angin (tidak sepanjang hari angin akan selalu tersedia) menyebabkan ketersediaan listrik tidak menentu. Oleh karena itu digunakan alat penyimpan energi yang berfungsi sebagai *back-up* energi listrik. Penyimpanan energi ini diakomodasi dengan menggunakan alat penyimpan energi. Contoh sederhana yang dapat dijadikan referensi sebagai alat penyimpan energi listrik adalah aki mobil.
- *Rectifier-Inverter*
Rectifier berarti penyearah. *Rectifier* dapat menyearahkan gelombang sinusoidal (AC) yang dihasilkan oleh generator menjadi gelombang DC. *Inverter* berarti pembalik. Ketika dibutuhkan daya dari penyimpan energi (aki/lainnya) maka catu yang dihasilkan oleh aki akan berbentuk gelombang

DC. Karena kebanyakan kebutuhan rumah tangga menggunakan catu daya AC, maka diperlukan *inverter* untuk mengubah gelombang DC yang dikeluarkan oleh aki menjadi gelombang AC, agar dapat digunakan oleh rumah tangga.

- Anemometer yaitu alat ukur kecepatan angin dan berfungsi mengirimkan data angin ke alat pengontrol.
- *Blades* yaitu bilah kipas yang menyebabkan turbin berputar.
- *Brake* (rem) untuk menghentikan rotor saat keadaan darurat.
- *Controller* (alat pengontrol) untuk mengendalikan turbin angin agar bekerja pada *range* nilai kecepatan angin yang ditentukan.
- *Gearbox* (roda gigi) untuk meningkatkan kecepatan putar generator dari 30-60 rpm menjadi 1000-1800 rpm (nilai kecepatan putar minimal yang mampu memutar generator listrik).
- Generator yaitu sebagai pembangkit listrik (disebut juga alternator arus bolak-balik).
- *High-speed shaft* (poros putaran tinggi) berfungsi untuk menggerakkan generator pada putaran tinggi.
- *Low-speed shaft* (poros putaran rendah) yaitu poros turbin yang berputar kira-kira 30-60 rpm.
- *Nacelle* (rumah mesin) yang terletak di atas menara. Di dalamnya berisi *gear-box*, poros putaran tinggi/rendah, generator, alat pengontrol, dan alat pengereman.
- Sudut *pitch* (sudut bilah kipas), yang memiliki pengaruh pada pengaturan kecepatan rotor yang diinginkan (bergantung pada nilai kecepatan angin).
- Rotor yaitu bilah kipas bersama porosnya.
- *Tower* (menara), yang terbuat dari pipa baja, beton, dan rangka besi. Dengan adanya menara yang semakin tinggi, maka kecepatan angin akan semakin kencang sehingga akan didapatkan tenaga (daya) yang semakin besar pula.
- *Wind direction* (arah angin)

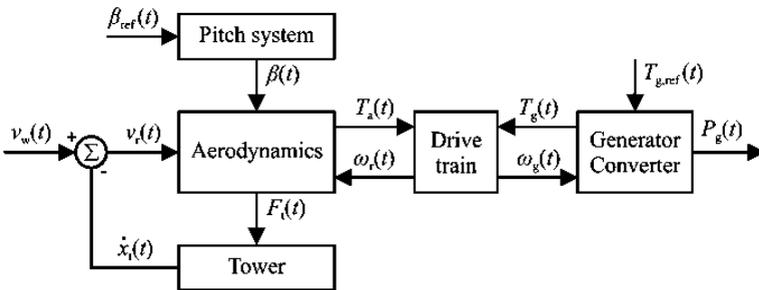


Gambar 2. 1 Bagian-bagian turbin angin (Thomas, 2017)

- *Wind vane* (tebeng angin) untuk mengukur arah angin, yang terhubung dengan *yaw drive* agar arah turbin sesuai dengan arah angin.
- *Yaw drive* (penggerak arah) untuk memutar turbin ke arah angin. Untuk desain turbin yang mendapat hembusan angin dari belakang tak memerlukan alat ini.
- *Yaw motor* (motor penggerak arah) yaitu motor listrik yang menggerakkan penggerak arah.

2.2 Pemodelan Turbin Angin

Suatu sistem disusun dari bermacam-macam komponen yang saling berhubungan dalam menjalankan suatu aksi untuk mencapai tujuan yang diinginkan. Suatu prasyarat dasar pada kebanyakan strategi yang dipergunakan dalam membangun suatu sistem kendali adalah kemampuan dalam memodelkan secara matematika dari sistem yang akan dikendalikan. Model matematika dari suatu sistem dapat berupa persamaan diferensial, fungsi alih atau persamaan ruang keadaan (Ogata,1987).



Gambar 2. 2 Blok diagram pemodelan turbin angin (Sloth, 2011)

Daya yang dihasilkan oleh turbin angin (P) dipengaruhi oleh mass rate (\dot{m}), kecepatan angin (v), gaya gravitasi (g), massa jenis udara (ρ), dan luas area yang dilalui angin (A), yang dirumuskan sebagai berikut :

$$P = \dot{m} \frac{v_w^2}{2g} \quad (2.1)$$

$$\dot{m} = \rho A v_w \quad (2.2)$$

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

$$P = \frac{1}{2g} \rho A v_w^3 \quad (2.3)$$

Berdasarkan hukum mekanika rotasi, daya turbin angin dipengaruhi oleh nilai torsi generator (T) dan kecepatan rotor (ω). Secara sistematis, dituliskan seperti persamaan (2.4).

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

Sedangkan daya yang dapat dikonversi oleh turbin angin dari energi angin, dapat dirumuskan pada persamaan (2.5).

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v_w^3 \quad (2.5)$$

dengan nilai luasan (A) yang dilalui angin berupa lingkaran, maka nilai tersebut bergantung pada jari-jarinya (R).

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

Rotor pada turbin angin mengkonversi energi kinetik dari angin menjadi energi untuk memutar bilah rotor dan poros, berputar pada kecepatan ω_r . Daya pada angin bergantung pada kecepatan angin, v_r , massa jenis udara, ρ , dan luas permukaan, A . Dari daya yang tersedia, daya yang didistribusikan menuju rotor bergantung pada nilai $C_p(\lambda, \beta)$, dimana β adalah fungsi sudut *pitch* pada baling-baling turbin, dan λ merupakan rasio antara kecepatan ujung baling-baling dan kecepatan angin. Persamaan torsi aerodinamik pada rotor, yaitu pada persamaan (2.7).

$$T_a = \frac{1}{2\omega_r} \rho A v_r^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.7)$$

Selain rotor, salah satu komponen yang berperan penting pada sistem kerja turbin angin yaitu generator. Generator juga merupakan komponen turbin angin yang tidak terhubung secara langsung dengan turbin angin melainkan dengan *gearbox*. Penggunaan *gearbox* ini dikarenakan generator membutuhkan kecepatan putar yang jauh lebih besar dari kecepatan rotor turbin angin, sehingga dibutuhkan faktor pengali agar kecepatan putar generator bisa lebih tinggi. Pengaruh dari *gearbox* dengan faktor pengali n terhadap persamaan sistem dirumuskan pada persamaan (2.9) dan (2.10).

$$T_g = \frac{T_m}{n} \quad (2.9)$$

$$\omega_g = \omega_r n \quad (2.10)$$

Dengan,

T_g : Torsi generator

ω_g : Kecepatan generator

T_m : Torsi mekanik generator

n : Faktor pengali

Sehingga model matematis dari percepatan generator dapat dirumuskan pada persamaan (2.11).

$$2H \cdot \dot{\omega}_g = \theta_{\Delta} \cdot K_{sh} - (\omega_r - \omega_g)D_{mutual} - T_g - F \cdot \omega_g \quad (2.11)$$

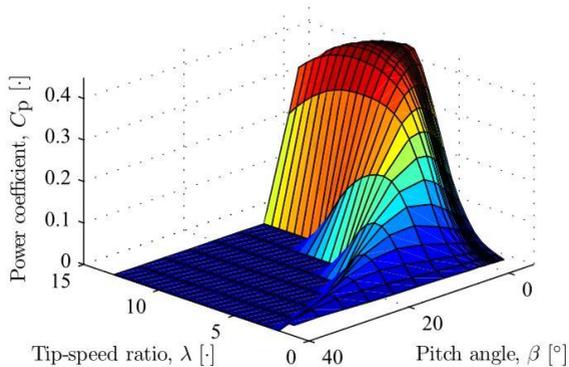
Dengan,

F : *Friction factor* generator

H : Konstanta inersia poros berkecepatan rendah

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 energi kinetik menjadi energi mekanik rotor. Di dalam persamaan (2.5) terdapat satu variabel yang memiliki peran penting dalam perhitungan daya maupun torsi yaitu dimana memiliki nilai bervariasi salah satunya terhadap *tip speed ratio* (TSR) yang akan ditunjukkan pada Gambar 2.3 dan persamaannya ditunjukkan pada persamaan (2.12).

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (2.12)$$



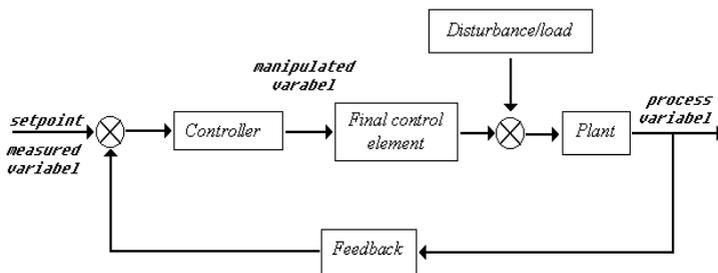
Gambar 2.3 Ilustrasi koefisien daya, C_p (Sloth, 2011)

2.3 Sistem Kendali PI

Sistem pengendalian adalah gabungan dari kerja suatu komponen yang digunakan untuk mempertahankan variabel yang dikendalikan (*process variable*) pada suatu nilai tertentu (*set point*) sehingga sistem dapat dikatakan stabil. Seiring perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi suatu sistem pengendalian sudah memakai unit kendali otomatis seperti pada Gambar 2.4.

Algoritma pengendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) hingga saat ini dapat dikatakan sebagai algoritma pengendali terbaik karena keefektifannya, sederhana dalam implementasi dan luas penggunaannya. Karakteristik pengendali PID sangat dipengaruhi oleh kontribusi besaran dari ketiga parameter P, I dan D. Penyetelan konstanta K_p , T_i dan T_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing – masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat diatur lebih menonjol dibandingkan dengan yang lain, konstanta yang menonjol itulah yang akan memberikan pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan.

Pengendali PI merupakan penggabungan antara dua macam pengendali, yaitu P (*Propotional*) dan I (*Integral*). Pengendali PI merupakan jenis pengendali untuk menentukan suatu kestabilan atau kepresisian sistem instrumentasi dengan adanya *feedback* atau umpan balik pada sistem tersebut. Perancangan sistem kendali PI bertujuan untuk mengetahui respon dari sistem jika ditambahkan dengan pengendali yang telah didapatkan nilai *gain*nya serta untuk mengetahui kesesuaian kerja sistem secara keseluruhan.



Gambar 2. 4 Diagram blok sistem pengendalian tertutup (Basilio, 2002)

Persamaan untuk pengendali PI adalah sebagai berikut :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{K_i} \int edt \quad (2.17)$$

dengan,

- $u(t)$: input pengendali
- K_p : konstanta proposional
- $e(t)$: sinyal error
- K_i : konstanta integral

2.4 Observer

Observer adalah suatu algoritma yang digunakan untuk mengestimasi keadaan (*state*) dari variabel yang tidak terukur berdasarkan model matematis sistem, sehingga observer juga dapat digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada suatu sistem jika kesalahan tersebut masuk dalam pemodelan. Suatu sistem umumnya dimodelkan dalam bentuk *state space*, yang dapat didefinisikan secara umum seperti persamaan sistem dalam bentuk diskrit dibawah ini (Ogata, 1987) :

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2.18)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (2.19)$$

dengan,

- A : Matriks keadaan (*state*)
- B : Matriks kendali
- C : Matriks keluaran
- D : Matriks gangguan
- $u(k)$: Masukan kendali
- $x(k+1)$: Turunan vektor keadaan
- $y(k)$: Vektor keluaran
- $x(k)$: Vektor keadaan (*state*)

Model matematis dari *observer* sama seperti model matematis pada sistem dengan ditambahkan K_e (*observer gain matrix*) menjadi persamaan sebagai berikut :

$$\hat{x}(k + 1) = A \cdot \hat{x}(k) + B \cdot u(k) + K_e (y(k) - \hat{y}(k)) \quad (2.20)$$

$$\hat{y}(k) = C\hat{x}(k) \quad (2.21)$$

dengan,

$\hat{x}(k + 1)$: Estimasi *state* $x(k + 1)$

K_e : *Gain Observer*

$\hat{x}(k)$: Estimasi *state* $x(k)$

$\hat{y}(k)$: Estimasi $y(k)$

$y(k)$ pada persamaan (2.19) dan $\hat{y}(k)$ pada (2.21) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.20), maka diperoleh persamaan (2.22) berikut.

$$\hat{x}(k + 1) = A \cdot \hat{x}(k) + B \cdot u(k) + K_e (Cx(k) - C\hat{x}(k)) \quad (2.22)$$

persamaan *error observer* atau ($e(k + 1)$) didapatkan dari hasil pengurangan persamaan (2.22) dengan persamaan (2.18).

$$e(k + 1) = x(k + 1) - \hat{x}(k + 1) \quad (2.23)$$

$$e(k + 1) = Ax(k) - A\hat{x}(k) - K_e (Cx(k) - C\hat{x}(k)) \quad (2.24)$$

$$e(k + 1) = (A - K_e C)(x(k) - \hat{x}(k)) \quad (2.25)$$

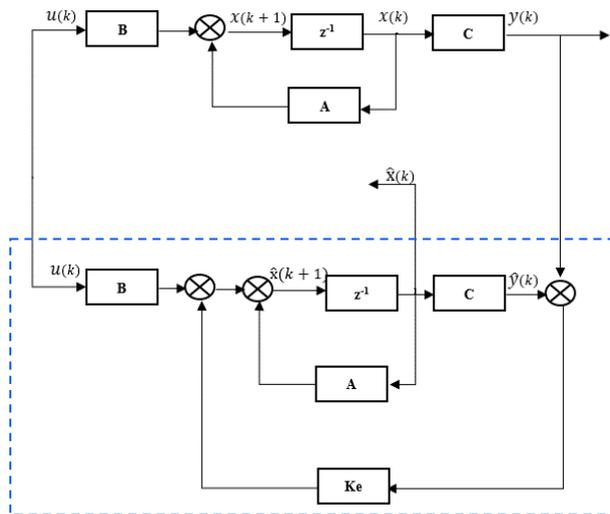
$$e(k + 1) = (A - K_e C)e(k) \quad (2.26)$$

Berdasarkan Gambar 2.5, *observer* mengandung nilai *gain observer* atau K_e . *Gain observer* merupakan matriks untuk mengoreksi perbedaan antara keluaran y aktual dan y estimasi sehingga dapat digunakan untuk mengestimasi *state* yang tidak terukur (Ogata, 1970). Nilai K_e diperoleh berdasarkan persamaan (2.26), dengan :

$$e(k) = (x(k) - \hat{x}(k)) \quad (2.27)$$

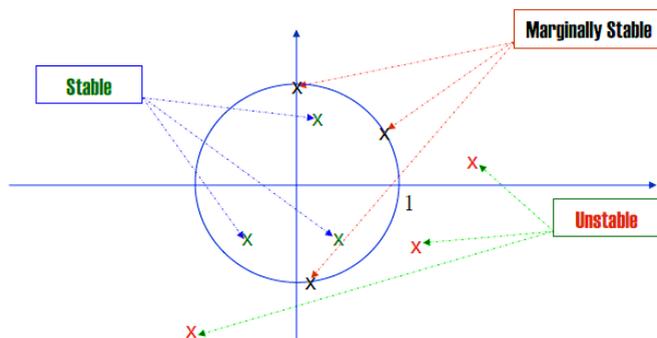
Kemudian dari persamaan (2.26) menjadi persamaan karakteristik *observer* yang dituliskan seperti persamaan (2.28).

$$|zI - A + K_e C| = 0 \quad (2.28)$$



Gambar 2. 5 *Observer* (Ogata, 1987)

Dengan menentukan nilai p atau posisi *pole*, diperoleh persamaan karakteristik yang diinginkan, maka nilai K_e diperoleh dari mensterakan persamaan (2.28) = persamaan karakteristik yang diinginkan. (Ogata, 1987)



Gambar 2. 6 Kestabilan *pole placement* sistem diskrit (M. Chen, 2016)

2.5 Keandalan

Keandalan merupakan kemungkinan dari suatu komponen atau sistem untuk dapat beroperasi atau melaksanakan fungsinya (Ebeling, 1997). Fungsi tersebut telah ditetapkan pada kondisi pengoperasian tertentu dan dalam lingkungan tertentu untuk periode waktu yang telah ditentukan pula. Jadi, keandalan adalah kemungkinan untuk tidak mengalami kegagalan atau dapat melaksanakan fungsinya selama periode waktu (t) atau lebih. Keandalan komponen, subsistem atau sistem produksi merupakan salah satu aspek yang dapat mempengaruhi kesuksesan proses produksi. Evaluasi keandalan dapat membantu dalam memperkirakan peluang sebuah sistem atau komponen untuk dapat melaksanakan fungsinya dalam jangka waktu tertentu dan dalam kondisi tertentu pula. Sistem atau komponen masih dapat beroperasi walaupun tidak dapat memenuhi fungsinya secara maksimal (Dhillon, 2005).

Nilai fungsi *reliability* merupakan nilai probabilitas, maka nilai fungsi *reliability* (R) bernilai $0 \leq R \leq 1$ (Ebeling, 1997). Kegagalan pada turbin angin terjadi ketika fungsi yang dimaksudkan dari komponen turbin angin tidak dapat bekerja dengan baik. Keandalan sistem turbin angin dipengaruhi oleh keandalan subsistemnya, termasuk perangkat keras dan perangkat lunak, dan bagaimana komponen-komponen tersebut terhubung. Keandalan turbin angin juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti kondisi angin dan gelombang di pembangkit angin lepas pantai (Sheng, 2017).

2.6 Keandalan *Real-Time*

Penelitian mengenai keandalan *real-time* atau yang biasanya disebut juga dengan keandalan *on-line* ini mulai berkembang sejak tahun 1990-an. Pada tahun 1992, Kim dan rekannya meneliti mengenai prediksi kendalan *real-time* kondisional berdasarkan data kinerja alat. Sedangkan pada 1999, Chinnman melakukan penelitian mengenai estimasi keandalan *on-line* dari masing-masing komponen menggunakan sinyal degradasi.

Penelitian terus berkembang pada tahun 2000-an. Pada 2002, Chinnman kembali melanjutkan penelitiannya dengan mengambil topik berupa estimasi keandalan *on-line* dari sistem fisik menggunakan jaringan saraf. Penelitian tersebut terus berkembang hingga pada tahun 2009, Xu dan rekannya memperkenalkan penelitiannya mengenai sebuah metode baru dalam memonitoring keandalan *real-time* untuk sistem dinamik yang digabungkan dengan algoritma estimasi kesalahan

Setelah kesalahan dimonitoring, keandalan pada sistem dinamik untuk beberapa waktu kedepan dapat dimonitoring. Untuk memonitoring keandalan sistem, ada beberapa hal penting yang harus diperhatikan. Pertama, selain dari definisi kegagalan sebagai nilai kesalahan yang telah mencapai batas, kegagalan sistem juga didefinisikan sebagai keadaan sistem yang telah memasuki area terlarang \mathcal{M}_1 .

Secara umum, proses kesalahan yang sama memiliki dampak yang berbeda pada sifat sistem untuk sistem yang berbeda. Keadaan sistem merupakan hal yang krusial, dikarenakan berhubungan langsung dengan performansi atau keamanan dari sebuah sistem. Kedua, keadaan sistem tidak dapat diukur secara langsung, harus melalui estimasi dikarenakan kegagalan sistem didefinisikan dalam sebuah keadaan. Keadaan diestimasi menggunakan algoritma OTK-SIR. Pada tugas akhir ini, penulis tidak menggunakan algoritma OTK-SIR, namun menggunakan algoritma *observer*. Ketiga, kunci dari monitoring keandalan adalah estimasi kesalahan, sehingga algoritma FP (*Fault Prediction*) yang berdasar pada algoritma *observer* adalah basis untuk monitoring keandalan.

$$R(nT, (n+r)T) = \Pr(x_{n+r} \in \mathcal{M}_0 | x_n \in \mathcal{M}_0) \quad (2.29)$$

$$\begin{cases} x_n = f(x_{n-1}) + w_n \\ y_n = x_n + v_n \end{cases} \quad (2.30)$$

Penjelasan mengenai algoritma RP (*Reability Prediction*) adalah sebagai berikut :

- Step inisialisasi : l yang telah dinotasikan pada algoritma FP dijadikan $l = 1$. Inisial partikel menjadi $\bar{X}_{n+l-1|n}^{(i)} = \bar{X}_{n+0|n}^{(i)} = \hat{X}_{n|n}^{(i)}$, $i = 1, \dots, N$.
- Step estimasi kesalahan : Jalankan algoritma FP dengan prediction step(s) l untuk menghitung estimasi kesalahan $\tilde{\alpha}_{n+l}$.
- Step monitoring partikel : untuk $i = 1, \dots, N$, hitung partikel baru $\bar{X}_{n+l-1|n}^{(i)}$ dari sistem persamaan $\bar{X}_{n+l-1|n}^{(i)} = f(\bar{X}_{n+l-1|n}^{(i)}) + \Gamma \tilde{\alpha}_{n+l} + W_{n+l}^{(i)}$ dimana $W_{n+l}^{(i)}$ adalah realisasi dari w_{n+l} untuk partikel ke- i .
- Step pemilihan partikel : jika $l < r$, maka $l = l + 1$, dan kembali ke step 2, jika sebaliknya lanjut pada step 5.
- Step perhitungan monitoring keandalan : hitung jumlah partikel dari himpunan $\{\bar{X}_{n+r|n}^{(i)}\} (i = 1, \dots, N)$ yang jatuh pada \mathcal{M}_0 dan dinotasikan oleh N_0 . Maka sistem monitoring keandalan selama $(nT, (n+r)T|$ dihitung oleh N_0/N .

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan untuk mendapatkan monitoring keandalan *real-time* berdasarkan estimasi kesalahan dilakukan sesuai dengan diagram alir penelitian pada Gambar 3.1.

Pada bab ini akan diuraikan langkah-langkah simulasi turbin angin pada MATLAB R2014a.

3.1 Studi Spesifikasi Turbin Angin

Langkah pertama dalam pengerjaan tugas akhir ini yaitu melakukan penentuan spesifikasi turbin angin. Spesifikasi turbin angin akan ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Turbin Angin Pada Simulasi (J. F. Manwell & J. G. McGowan, 2009)

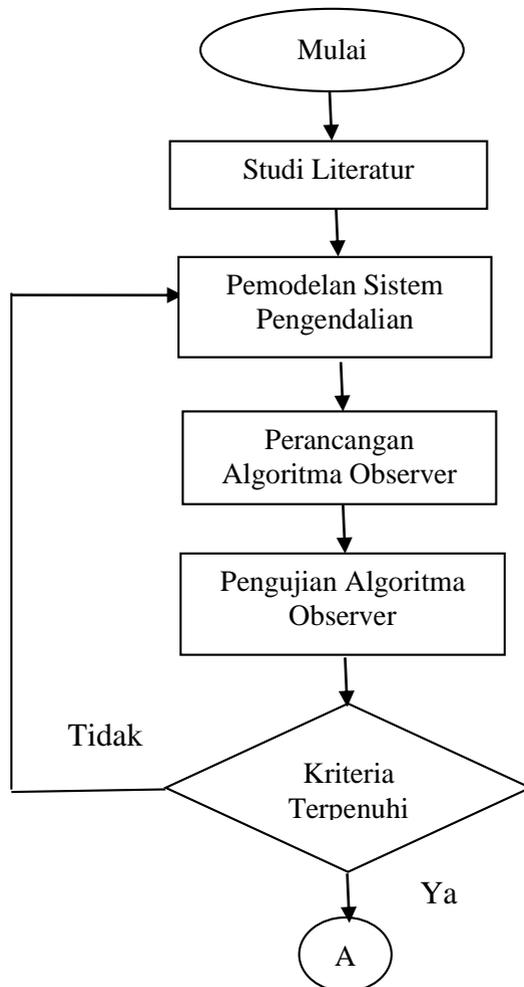
<i>Model</i>	<i>Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)</i>
<i>Diameter rotor (m)</i>	2.56
<i>Swept area (m²)</i>	5.15
<i>Rated wind speed (m/s)</i>	11
<i>Output Power (watt)</i>	400
<i>Maximum design wind speed (pu/rad)</i>	80.27
<i>Blade Material</i>	Polypropylene
<i>Battery System Voltages (Volt)</i>	12, 24 or 48

Pada tugas akhir ini, model sistem turbin angin yang digunakan adalah dalam satuan per unit (pu). Nilai satuan pu adalah nilai yang terkait dengan jumlah dasar. Dalam analisis sistem tenaga, nilai satuan pu umum digunakan untuk menganalisis dan mengkomunikasikan nilai voltase, arus, daya dan impedansi. Jumlah satuan pu ini dinormalisasi atau diskalakan pada basis yang dipilih, seperti yang ditunjukkan pada persamaan (3.1) yang memungkinkan para insinyur menyederhanakan perhitungan sistem tenaga dengan beberapa transformasi tegangan. Parameter-parameter yang digunakan dalam pemodelan turbin angin ini

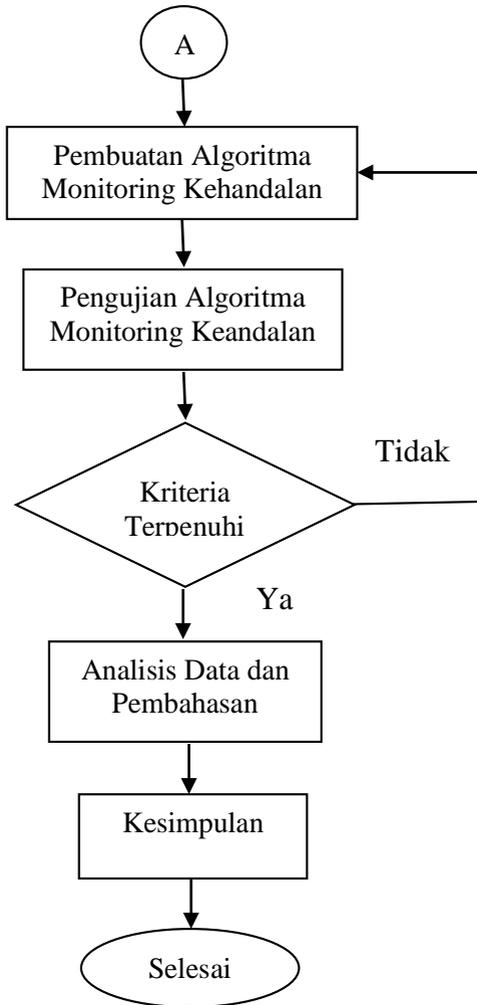
mengacu pada (Nicholas, dkk. 2003). Nilai-nilai parameter tersebut dapat kita lihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 2 Parameter – parameter pada pemodelan turbin angin
(Nicholas, dkk. 2003)

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Sudut blade pitch maksimum (β_{max})</i>	27	<i>deg</i>
<i>Sudut blade pitch minimum (β_{min})</i>	0	<i>deg</i>
<i>Pitch rate β/detik (deg/detik)</i>	10	<i>deg/detik</i>
<i>Tip speed ratio maksimum (λ_{max})</i>	9.95	-
<i>Coefficient of power maksimum ($C_{p_{max}}$)</i>	0.5	-
<i>Torsi mula-mula (T_0)</i>	0.83	pu
<i>Koefisien kekakuan (K_{sh})</i>	80.27	pu/rad
<i>Friction factor of generator (F)</i>	0.01	pu
<i>Kecepatan putar maksimum (ω_{max})</i>	1.2	pu
<i>Kecepatan putar minimum (ω_{min})</i>	0.5	pu
<i>Konstanta inersia inersia poros berkecepatan tinggi (H_{wt})</i>	4.32	detik
<i>Konstanta inersia poros berkecepatan rendah (H)</i>	0.685	detik
<i>Konstanta Redaman (D_{mutual})</i>	1.5	pu



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir



Gambar 3. 2 (Lanjutan)

3.2 Pemodelan Sistem Turbin Angin

Langkah selanjutnya dalam pembuatan tugas akhir ini yaitu pembuatan model turbin angin agar dapat disimulasikan. Sebelum melakukan pemodelan, dilakukan studi literatur terlebih dahulu mengenai bentuk plant dari turbin angin. Untuk mendefinisikan nilai C_p yang bervariasi dari C_1 sampai dengan C_8 , maka digunakan nilai yang telah didapatkan pada (Nicholas,dkk. 2003) sebagai berikut :

$$C_1 = 0.645$$

$$C_2 = 116$$

$$C_3 = 0.4$$

$$C_4 = 5$$

$$C_5 = 21$$

$$C_6 = 0.00912$$

$$C_7 = 0.08$$

$$C_8 = 0.035$$

Pemodelan *drive train* pada turbin angin mencakup percepatan rotor $\dot{\omega}_r$ dan sudut torsi $\dot{\theta}_\Delta$. Persamaan turunan sudut torsi $\dot{\theta}_\Delta$ ditunjukkan pada persamaan (3.2).

$$\text{Nilai per unit} = \frac{\text{Nilai sebenarnya (actual quality)}}{\text{Nilai dasar nominal (base quality)}} \quad (3.1)$$

$$\dot{\theta}_\Delta = \omega_r - \omega_g \quad (3.2)$$

Turbin angin dikarakteristikan berdasarkan perilaku nonlinearnya dan ketergantungannya pada kekuatan angin stokastik yang tak terkendali sebagai sinyal penggerak. Pada umumnya, pemodelan turbin angin dilakukan dengan menggabungkan model subsistem turbin angin sehingga bersama-sama membentuk dinamika pemodelan turbin angin secara keseluruhan. Pemodelan turbin angin dalam satuan pu dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan persamaan berikut :

- Pemodelan Penggerak (*Drive Train*)
Penggerak pada turbin angin terdiri dari poros berkecepatan tinggi dan poros berkecepatan rendah, dimana memiliki inersia

H_{wt} dan H . Selain itu juga terdapat konstanta pegas, K_{sh} , dan konstanta redaman, D_{mutual} . Poros-poros yang saling berhubungan melalui transmisi memiliki rasio gigi n_g , dikombinasikan dengan nilai sudut torsi, θ_{Δ} , dan torsi generator, T_g , pada kecepatan ω_g . Persamaan rotor dalam satuan pu dapat dituliskan seperti pada persamaan (3.3).

$$\dot{\omega}_r = \frac{T_a - T_m}{2H_{wt}} \quad (3.3)$$

dengan,

H_{wt} : Konstanta inersia inersia poros berkecepatan tinggi

Torsi mekanik rotor, T_m selanjutnya dimodelkan pada persamaan (3.4).

$$T_m = \theta_{\Delta} \cdot K_{sh} + (\omega_r - \omega_g) D_{mutual} \quad (3.4)$$

dengan,

K_{sh} : Koefisien kekakuan

D_{mutual} : Konstanta redaman

Persamaan (3.4) disubstitusikan kedalam persamaan (3.3), sehingga didapatkan persamaan (3.5) berikut.

$$\dot{\omega}_r = \frac{T_a - (\omega_r - \omega_g) D_{mutual} - \theta_{\Delta} \cdot K_{sh}}{2H_{wt}} \quad (3.5)$$

Sedangkan persamaan generator dalam satuan pu dapat dituliskan seperti pada persamaan (3.6).

$$\dot{\omega}_g = \frac{\theta_{\Delta} \cdot K_{sh} - (\omega_r - \omega_g) D_{mutual} - T_g - F \cdot \omega_g}{2H} \quad (3.6)$$

dengan,

F : *Friction factor* generator

H : Konstanta inersia poros berkecepatan rendah

Persamaan sudut torsi dalam satuan pu dapat dituliskan seperti pada persamaan (3.7).

$$\dot{\theta}_{\Delta} = \omega_r - \frac{\omega_g}{n_g} \quad (3.7)$$

dengan,

n_g : Rasio gigi

- **Pemodelan Generator dan Konverter**
Tahap berikutnya yaitu memodelkan *actuator* yang akan digunakan. Aktuator berupa *converter*. Generator dimodelkan hanya berupa model mekanik, maka diasumsikan konverter memiliki *controller* internal sehingga konverter membebani generator dengan torsi tertentu. Sehingga model yang disederhanakan dari *converter* dapat didekati dengan sistem orde satu. Torsi generator pada persamaan (3.8) dikontrol oleh torsi referensi, $T_{g,ref}$. Dinamika konverter diestimasi oleh sistem melalui sistem orde pertama dengan waktu konstan τ_g . Sehingga didapatkan persamaan berikut :

$$\dot{T}_g = -\frac{1}{\tau_g} T_g + \frac{1}{\tau_g} T_{g,ref} \quad (3.8)$$

dengan,

T_g : Torsi generator

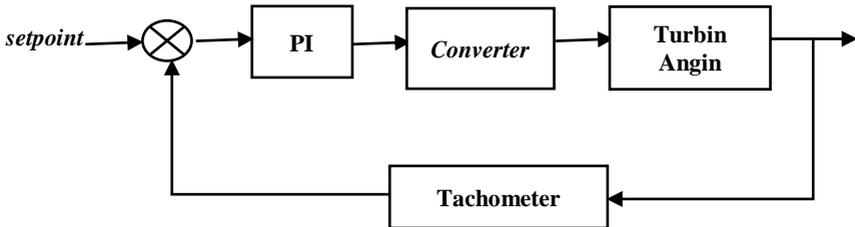
$T_{g,ref}$: Torsi referensi

τ_g : Waktu konstan

3.3 Perancangan Sistem Kendali PI

Karakteristik pengendali PI sangat dipengaruhi oleh kontribusi besaran dari ketiga parameter P, dan I. Penyetelan konstanta K_p dan T_i akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing – masing

elemen. Diagram blok sistem pengendalian kecepatan turbin angin ditunjukkan oleh Gambar 3.3. Dalam pengendalian kecepatan turbin angin dilakukan perancangan sistem kendali PI. Nilai K_p , K_i didapatkan secara eksperimen dengan metode *Ziegler–Nichols* untuk perancangan secara simulasi dengan *simulink* pada perangkat lunak matlab R2104a. Simulasi dilakukan sampai sistem kendali dapat bekerja dengan baik.



Gambar 3. 3 Diagram blok sistem pengendalian kecepatan turbin angin

Perancangan sistem kendali PI bertujuan untuk mengetahui respon dari sistem jika ditambahkan dengan pengendali yang telah didapatkan nilai *gain*nya serta untuk mengetahui kesesuaian kerja sistem secara keseluruhan. Sistem yang dirancang telah bekerja dengan baik jika respon sistem dapat mencapai nilai *setpoint* yang telah diberikan. Perancangan pengendali PI dengan menggunakan *simulink* pada perangkat lunak matlab R2014a dapat dilihat pada lampiran.

3.4 Perancangan Algoritma *Observer*

Perancangan *observer* digunakan untuk mengestimasi kesalahann yang ada dengan cara mengembangkan persamaan ruang keadaan sistem. Persamaan untuk perancangan *observer* diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan (Indriawati, dkk, 2015), tetapi perubahan dilakukan dari betuk domain kontinyu ke dalam bentuk domain diskrit. Berdasarkan persamaan (2.18) maka disusunlah persamaan matriks turbin angin dalam bentuk berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_g \\ \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{\theta}_\Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_g} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D_m}{2H_{wt}} & \frac{D_m}{2H_{wt}} & -\frac{K_{sh}}{2H_{wt}} \\ -\frac{1}{2H} & \frac{D_m}{n_g \cdot 2H} & -\frac{(D_m+F)}{n_g^2 \cdot 2H} & \frac{K_{sh}}{n_g^2 \cdot 2H} \\ 0 & 1 & -\frac{1}{n_g} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_g \\ \omega_r \\ \omega_g \\ \theta_\Delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\tau_g} \\ \frac{1}{2H_{wt}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ T_{g,ref} \end{bmatrix}$$

dengan,

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \begin{bmatrix} \dot{T}_g \\ \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{\theta}_\Delta \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_g} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D_m}{2H_{wt}} & \frac{D_m}{2H_{wt}} & -\frac{K_{sh}}{2H_{wt}} \\ -\frac{1}{2H} & \frac{D_m}{n_g \cdot 2H} & -\frac{(D_m+F)}{n_g^2 \cdot 2H} & \frac{K_{sh}}{n_g^2 \cdot 2H} \\ 0 & 1 & -\frac{1}{n_g} & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{x}(k) &= \begin{bmatrix} T_g \\ \omega_r \\ \omega_g \\ \theta_\Delta \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\tau_g} \\ \frac{1}{2H_{wt}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} T_a \\ T_{g,ref} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan (2.19) maka disusunlah persamaan matriks turbin angin dalam bentuk berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_g \\ \dot{\omega}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_g \\ \omega_r \\ \omega_g \\ \theta_\Delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ T_{g,ref} \end{bmatrix}$$

dengan,

$$\mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} \dot{T}_g \\ \dot{\omega}_g \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya parameter-parameter turbin angin pada Tabel 3.2 dimasukkan ke dalam matriks tersebut. Sehingga nilai matriks ruang keadaan untuk perancangan *observer* diperoleh dari pemodelan sistem turbin angin adalah sebagai berikut.

$$A = \begin{bmatrix} 0.3678 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0012 & 0.9433 & 0.0566 & -0.7771 \\ -0.0382 & 0.3570 & 0.6423 & 4.8993 \\ 0.0024 & 0.0836 & -0.0836 & 0.6924 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0.6321 \\ 0.0113 & -0.0003 \\ 0.0016 & -0.0244 \\ 0.0005 & 0.0008 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; F_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Persamaan ruang keadaan yang mengandung kesalahan sensor dituliskan sebagai berikut :

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3.9)$$

$$y(k) = Cx(k) + F_s \cdot f_s(k) \quad (3.10)$$

Dengan, $x(k) \in R^n$, $u(k) \in R^m$, $y(k) \in R^p$, $f_s(k) \in R^n$ berturut-turut adalah keadaan (*state*), masukan, keluaran, dan kesalahan sensor. Sedangkan A, B, C, F_s adalah matriks keadaan, masukan, keluaran dan kesalahan sensor.

Kemudian *state* baru $z(k+1)$ ditambahkan untuk memindahkan kesalahan sensor dari persamaan keluaran ke persamaan keadaan

$$z(k+1) = A_z T_s (y(k) - z(k)) + z(k) \quad (3.11)$$

dimana persamaan (3.10) disubstitusi ke dalam persamaan (3.11), sehingga diperoleh persamaan :

$$z(k+1) = -A_z T_s z(k) + A_z T_s (Cx(k) + F_s \cdot f_s(k)) + z(k) \quad (3.12)$$

persamaan (3.9), (3.12) diubah ke dalam bentuk persamaan yang lebih kompak menjadi sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ z(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z C & -A_z T_s + I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & A_z T_s F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a(k) \\ f_s(k) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$y(k) = [0 \quad I] \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

dengan nilai :

$$A_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T_s = 0.1$$

Kemudian bentuk ruang keadaan dirubah kedalam bentuk persamaan keadaan dan persamaan keluaran sistem yang diperluas (mengandung kesalahan) sebagai berikut.

$$\bar{x}(k+1) = \bar{A} \cdot \bar{x}(k) + \bar{B} \cdot u(k) + \bar{F} \bar{f}(k) \quad (3.25)$$

$$z(k) = \bar{y}(k) = \bar{C} \bar{x}(k) \quad (3.26)$$

dengan demikian diperoleh nilai matriks sebagai berikut.

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0.3679 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0013 & 0.9434 & 0.0566 & -0.7772 & 0 & 0 \\ -0.0328 & 0.3570 & 0.6423 & 4.8994 & 0 & 0 \\ -0.0024 & 0.0837 & -0.0836 & 0.6924 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6321 & & & & \end{bmatrix}; \bar{B} = \begin{bmatrix} 0.0113 & -0.0004 \\ 0.0016 & -0.0245 \\ 0.0005 & 0.0009 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \bar{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Setelah nilai-nilai matriks didapatkan, persamaan keadaan dan persamaan keluaran yang mengandung sensor digunakan untuk merancang persamaan *observer* yang dituliskan:

$$\hat{x}(k+1) = \bar{A} \cdot \hat{x} + \bar{B} \cdot u(k) + \bar{F} \hat{f}(k) + K_e(\bar{y}(k) - \hat{y}(k)) \quad (3.27)$$

$$\hat{y}(k) = \bar{C} \hat{x}(k) \quad (3.28)$$

Kemudian ditambahkan *state* yang mengandung gain untuk mengestimasi kesalahan sensor (L),

$$\hat{f}(k+1) = T_s L_e(k) + \hat{f}(k) \quad (3.29)$$

Sehingga dari persamaan (3.28) dan (3.30) jika diubah kedalam bentuk yang lebih kompak, menjadi sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1) \\ \hat{f}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{F} \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{f}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B} \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} K \\ LT_s \end{bmatrix} e(k) \quad (3.30)$$

$$\hat{y}(k) = [\bar{C} \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{f}(k) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

dari bentuk (3.30) dan (3.31) dapat dirubah menjadi persamaan keadaan dan persamaan keluaran *observer*, sebagai berikut :

$$\hat{\tilde{x}}(k+1) = \tilde{A} \cdot \hat{\tilde{x}}(k) + \tilde{B} \cdot u(k) + \tilde{K}_e(\tilde{y}(k) - \hat{y}(k)) \quad (3.32)$$

$$\hat{y}(k) = \tilde{C} \cdot \hat{\tilde{x}}(k) \quad (3.33)$$

dengan memasukan nilai matriks $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{F}, I, Ts$ maka, diperoleh nilai matriks sebagai berikut :

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0.3679 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0013 & 0.9434 & 0.0566 & -0.7772 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0328 & 0.3570 & 0.6423 & 4.8994 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0024 & 0.0837 & -0.0836 & 0.6924 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0.6321 \\ 0.0113 & -0.0004 \\ 0.0016 & -0.0245 \\ 0.0005 & 0.0009 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Sehingga dari persamaan *observer* yang telah diperoleh, untuk menentukan nilai *error observer* sebagai berikut.

$$e(k+1) = \tilde{x}(k+1) - \hat{\tilde{x}}(k+1) \quad (3.34)$$

$$e(k+1) = \left(\tilde{A}\tilde{x}(k) + \tilde{B}u(k) \right) - \left(\tilde{A}.\hat{\tilde{x}}(k) + \tilde{B}.u(k) + \tilde{K}_e \left(\tilde{y}(k) - \hat{\tilde{y}}(k) \right) \right) \quad (3.35)$$

$$e(k+1) = \tilde{A}\tilde{x}(k) - \tilde{A}.\hat{\tilde{x}}(k) - \tilde{K}_e \left(\tilde{C}.\tilde{x}(k) - \tilde{C}.\hat{\tilde{x}}(k) \right) \quad (3.36)$$

$$e(k+1) = \left(\tilde{A} - \tilde{K}_e \tilde{C} \right) \left(\tilde{x}(k) - \hat{\tilde{x}}(k) \right) \quad (3.37)$$

dengan,

$$e(k) = \tilde{x}(k) - \hat{\tilde{x}}(k) \quad (3.38)$$

sehingga,

$$e(k + 1) = (\tilde{A} - \tilde{K}_e \tilde{C})e(k) \quad (3.39)$$

Langkah selanjutnya, Untuk memperoleh nilai gain *observer* (\tilde{K}_e) Ktild digunakan metode *pole-placement*. Nilai pole yang diinginkan ditentukan dengan metode *trial-and-error*, dengan berdasarkan ilmu kestabilan berdasarkan letak *pole*, diketahui bahwa sebuah sistem diskrit didefinisikan stabil jikalau seluruh akar-akar karakteristik bagian riil atau imajiner bernilai tidak lebih dari 1 atau -1. Sehingga dengan metode *trial-and-error* diperoleh 7 pole yaitu 0,92; 0,91; 0,9388763; 0,94; 0,919; 0,95 dan 0,93.

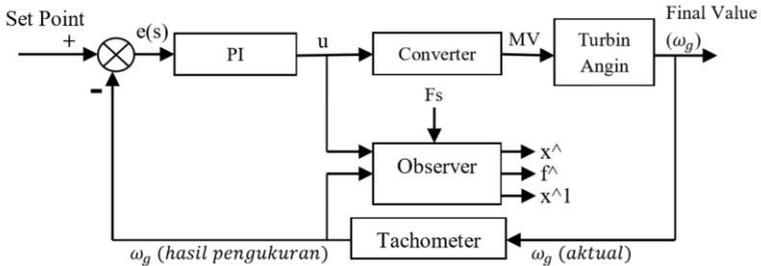
Selanjutnya nilai matriks gain *observer* didapatkan dengan menggunakan program perangkat lunak matlab R2014a dengan *command* sebagai berikut:

```
p1 = 0.92;
p2 = 0.91;
p3 = 0.9388763;
p4 = 0.94;
p5 = 0.919;
p6 = 0.95;
p7 = 0.93;
Ktild = place(Atild', Ctild', [p1 p2 p3 p4 p5 p6
p7])
K = Ktild(:, 1:n+p)
L = Ktild(:, n+p+1:n+p+fs)
```

Sehingga diperoleh matriks Ktild atau Ke sebagai berikut :

$$K_e = \begin{bmatrix} 0.3157 & 0.0029 & 0.0032 & -0.0062 & -1.4911 & 0.0441 & 2.04 \times 10^{-4} \\ -3.04 \times 10^{-7} & 0.0373 & -0.2352 & 0.0740 & 5.55 \times 10^{-7} & -1.4809 & 5.8 \times 10^{-5} \end{bmatrix}$$

Setelah dilakukan perancangan *observer* secara simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB R2014a, dan *observer* dapat mengestimasi kesalahan dengan benar. Gambar 3.3 berikut ini adalah gambar diagram blok sistem pengendalian yang telah diintegrasikan dengan *observer*.



Gambar 3. 4 Diagram blok sistem pengendalian yang telah terintegrasi dengan *observer*

3.5 Perancangan Uji Kesalahan Sensor

Uji kesalahan sensor bertujuan untuk mengetahui kesalahan sensor yang telah dibuat dapat berjalan dengan benar atau tidak. Uji kesalahan sensor pada penelitian ini yaitu menggunakan kesalahan sensitivitas, yaitu sebesar 5%; 7,5%; 10%; dan 12,5%. Persamaan yang menyatakan hubungan kesalahan sensitivitas dengan kecepatan setelah diberi kesalahan dapat dilihat pada persamaan (3.40) berikut.

$$y_m = yk \quad (3.40)$$

dimana y_m adalah kecepatan setelah diberi kesalahan, y adalah kecepatan sebelum diberi kesalahan, dan k adalah nilai kesalahan sensitivitas.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

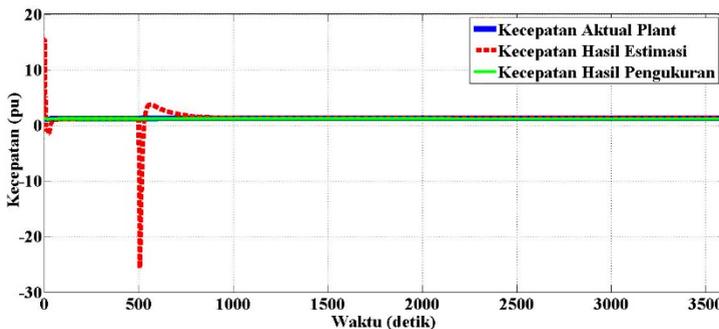
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Uji *Observer*

Uji *observer* merupakan suatu tahapan yang perlu dilakukan setelah tahap perancangan *observer*. Tujuan dari uji *observer* ini yaitu untuk mengetahui kemampuan *observer* dalam mengestimasi kecepatan turbin angin. Pada tugas akhir ini dilakukan uji *observer* dengan menambahkan kesalahan sensitivitas pada sensor, dengan variabel yang dimanipulasi yaitu besaran kesalahan sensitivitas sensor. Kesalahan sensitivitas sensor yang diberikan yaitu sebesar 5%; 7,5%; 10%; dan 12,5%. Kesalahan diberikan pada detik ke-500, sedangkan turbin dijalankan selama 3600 detik. Persamaan untuk kesalahan dapat dilihat pada persamaan (3.40). Garis berwarna biru menunjukkan kecepatan aktual yang berlangsung di *plant*, garis berwarna merah menunjukkan kecepatan hasil estimasi oleh *observer*, sedangkan garis berwarna hijau menunjukkan kecepatan hasil pengukuran.

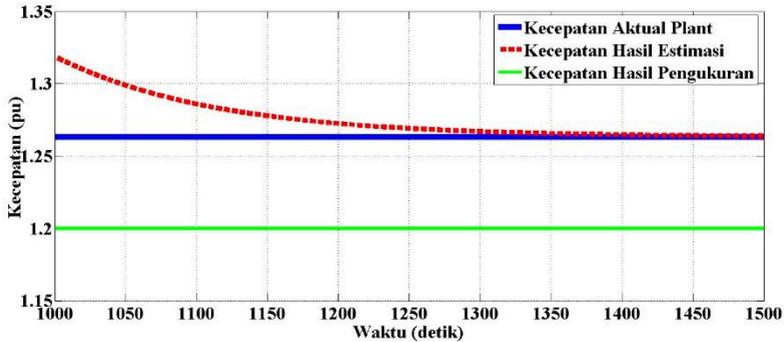
- Kesalahan sensitivitas 5%

Pada uji *observer* dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 5%, didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.1. Pada Gambar 4.1 terlihat bahwa pada detik ke-500 mulai terjadi kesalahan berupa penurunan nilai kecepatan hasil estimasi.



Gambar 4. 1 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 5%

Apabila Gambar 4.1 diperbesar, maka diperoleh Gambar 4.2.

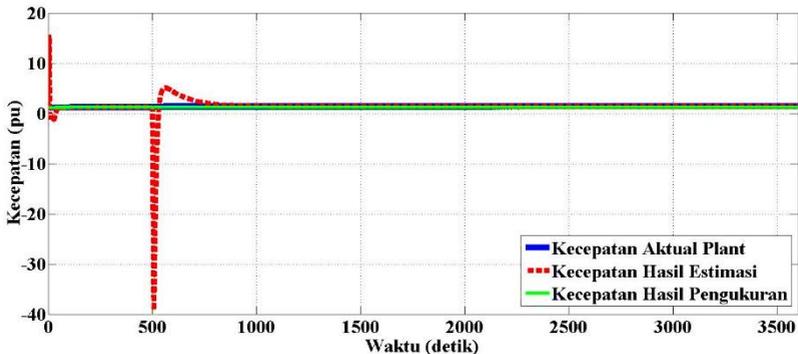


Gambar 4. 2 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 5% (perbesaran Gambar 4.1)

Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa setelah mengalami kesalahan, pada sekitar detik ke-1300 garis berwarna merah dapat mengikuti garis berwarna biru. Hal itu menunjukkan bahwa *observer* telah mampu mengetimasi kesalahan yang telah disimulasi dalam rentang waktu detik ke-500 hingga detik ke-1300.

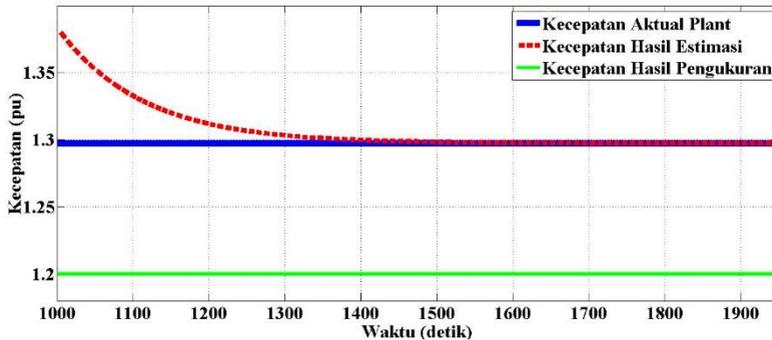
- Kesalahan sensitivitas 7,5%

Pada uji *observer* dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 7,5%, didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 7,5%

Pada Gambar 4.3 terlihat bahwa pada detik ke-500 mulai terjadi kesalahan berupa penurunan nilai kecepatan hasil estimasi. Apabila Gambar 4.3 diperbesar, maka diperoleh Gambar 4.4.



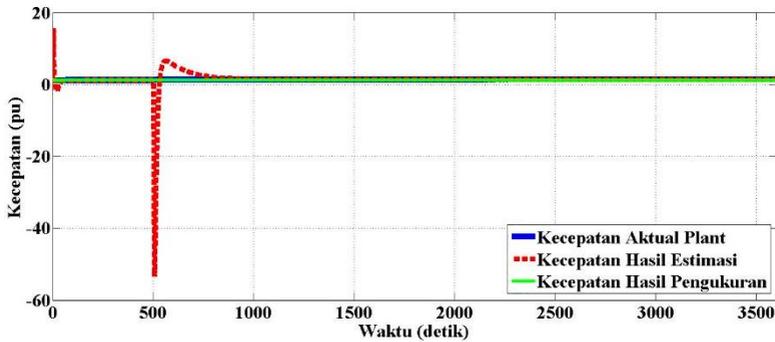
Gambar 4. 4 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 7,5% (perbesaran Gambar 4.3)

Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa setelah mengalami kesalahan, pada sekitar detik ke-1350 garis berwarna merah dapat mengikuti garis berwarna biru. Hal itu menunjukkan bahwa *observer* telah mampu mengetimasi kesalahan yang telah disimulasi dalam rentang waktu detik ke-500 hingga detik ke-1350.

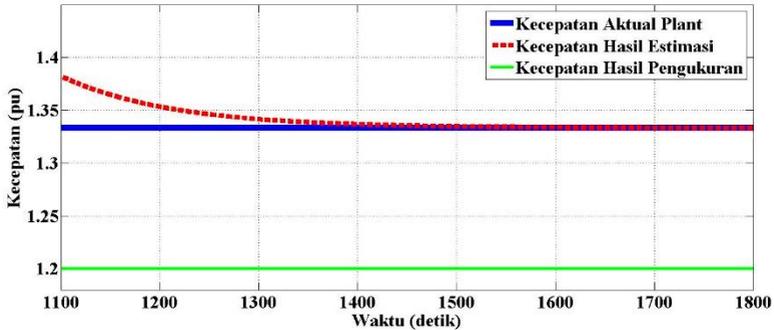
- Kesalahan sensitivitas 10%

Pada uji *observer* dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 10%, didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.5. Pada Gambar 4.5 terlihat bahwa pada detik ke-500 mulai terjadi kesalahan berupa penurunan nilai kecepatan hasil estimasi. Apabila Gambar 4.5 diperbesar, maka diperoleh Gambar 4.6. Pada Gambar 4.6 terlihat bahwa setelah mengalami kesalahan, pada sekitar detik ke-1400 garis berwarna merah dapat mengikuti garis berwarna biru.

Hal itu menunjukkan bahwa *observer* telah mampu mengetimasi kesalahan yang telah disimulasi dalam rentang waktu detik ke-500 hingga detik ke-1400.



Gambar 4. 5 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 10%

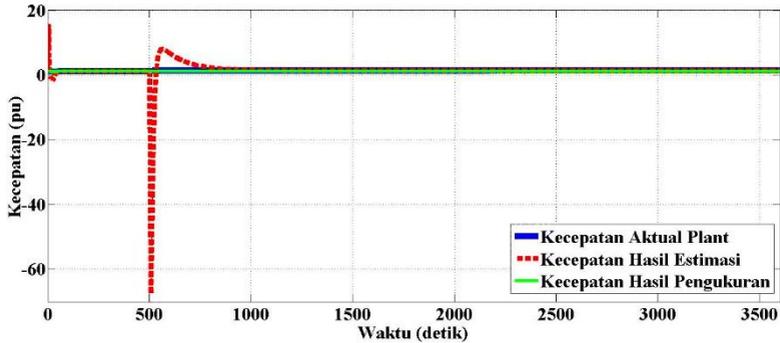


Gambar 4. 6 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 10% (perbesaran Gambar 4.5)

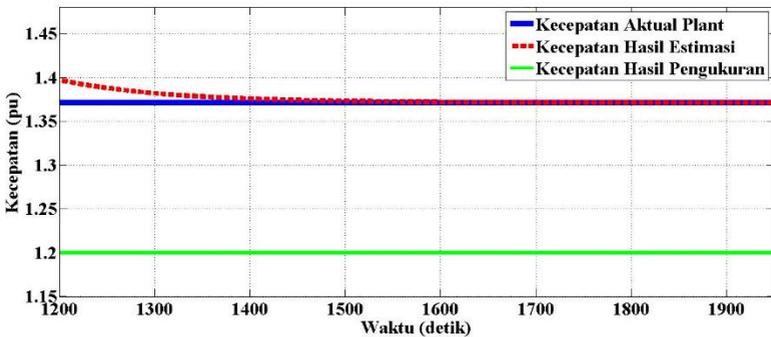
- Kesalahan sensitivitas 12,5%

Pada uji *observer* dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 12,5%, didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.7. Pada Gambar 4.7 terlihat bahwa pada detik ke-500 mulai terjadi kesalahan berupa penurunan nilai kecepatan hasil estimasi. Apabila Gambar 4.7 diperbesar, maka diperoleh Gambar 4.8. Pada Gambar 4.8 terlihat bahwa setelah mengalami kesalahan, pada sekitar detik ke-1450 garis berwarna merah dapat mengikuti garis berwarna biru.

Hal itu menunjukkan bahwa *observer* telah mampu menyetimasi kesalahan yang telah disimulasi dalam rentang waktu detik ke-500 hingga detik ke-1450.



Gambar 4. 7 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 12,5%



Gambar 4. 8 Grafik kecepatan dengan kesalahan sensitivitas 12,5% (perbesaran Gambar 4.7)

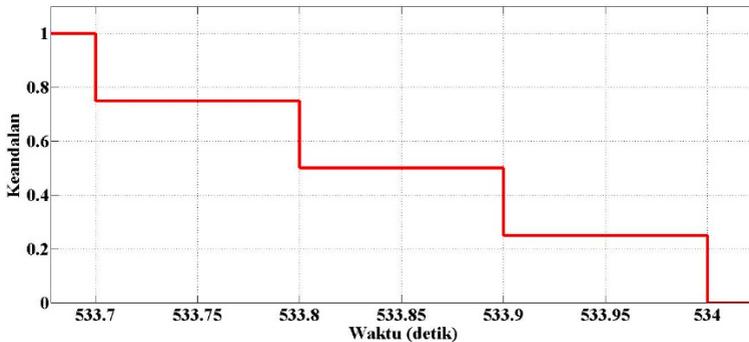
4.2 Uji Algoritma Monitoring Keandalan *Real-Time*

Setelah dilakukan pengujian algoritma *observer*, tahap selanjutnya yaitu melakukan pengujian algoritma monitoring keandalan *real-time*. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan variasi kesalahan sensitivitas sensor sebesar 5%; 7,5% ; 10%; dan 12,5%.

Berikut merupakan grafik dan tabel hasil pengujian algoritma monitoring keandalan.

- Kesalahan sensitivitas 5%

Pada uji monitoring keandalan dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 5%, didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Hasil uji monitoring keandalan *real-time* dengan kesalahan sensitivitas 5%

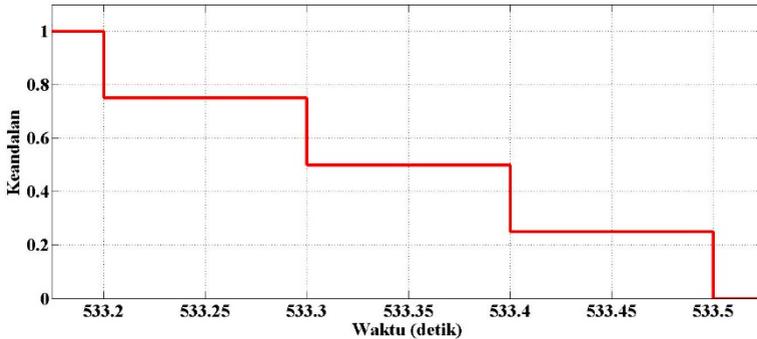
Pada Gambar 4.9 terlihat bahwa nilai keandalan mulai mengalami penurunan pada detik ke-533,7. Lalu nilai keandalan bernilai nol (mengalami kegagalan) pada detik ke 534. Apabila Gambar 4.9 dinyatakan dalam bentuk tabel maka dapat dinyatakan sebagai Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1 Hasil uji monitoring keandalan *real-time* dengan kesalahan sensitivitas 5%

Keandalan	Detik ke-
1	0 – 533.7
0.75	533.7– 533.8
0.5	533.8– 533.9
0.25	533.9 – 534
0	534 - 3600

- Kesalahan sensitivitas 7,5%

Pada uji monitoring keandalan dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 7,5%, didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Hasil uji monitoring keandalan *real-time* dengan kesalahan sensitivitas 7,5%

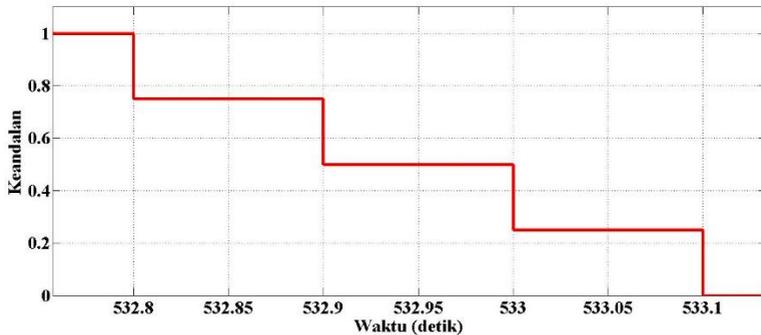
Pada Gambar 4.10 terlihat bahwa nilai keandalan mulai mengalami penurunan pada detik ke-533,2. Lalu nilai keandalan bernilai nol (mengalami kegagalan) pada detik ke 533,5. Apabila Gambar 4.10 dinyatakan dalam bentuk tabel maka dapat dinyatakan sebagai Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4. 2 Hasil uji monitoring keandalan *real-time* dengan kesalahan sensitivitas 7,5%

Keandalan	Detik ke-
1	0 – 533,2
0,75	533,2– 533,3
0,5	533,3– 533,4
0,25	533,4 – 533,5
0	533,5 - 3600

- Kesalahan sensitivitas 10%

Pada uji monitoring keandalan dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 10%, didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Hasil uji monitoring keandalan *real-time* dengan kesalahan sensitivitas 10%

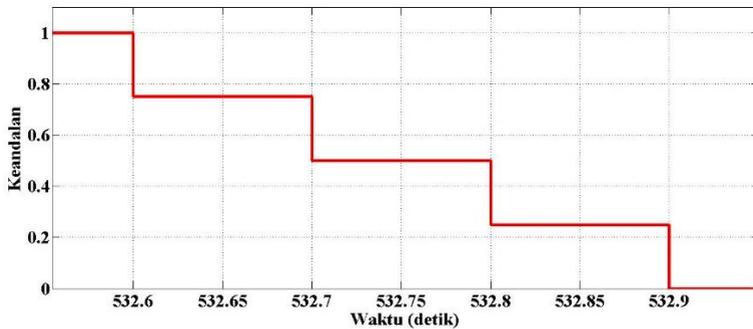
Pada Gambar 4.11 terlihat bahwa nilai keandalan mulai mengalami penurunan pada detik ke-532,8. Lalu nilai keandalan bernilai nol (mengalami kegagalan) pada detik ke 533,1. Apabila Gambar 4.11 dinyatakan dalam bentuk tabel maka dapat dinyatakan sebagai Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4. 3 Hasil uji monitoring keandalan *real-time* dengan kesalahan sensitivitas 10%

Keandalan	Detik ke-
1	0 – 532,8
0,75	532,8 – 532,9
0,5	532,9 – 533
0,25	533 – 533,1
0	533,1 - 3600

- Kesalahan sensitivitas 12,5%

Pada uji monitoring keandalan dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 12,5%, didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.12. Pada Gambar 4.12 terlihat bahwa nilai keandalan mulai mengalami penurunan pada detik ke-532,6. Lalu nilai keandalan bernilai nol (mengalami kegagalan) pada detik ke 532,9.



Gambar 4. 12 Hasil uji monitoring keandalan *real-time* dengan kesalahan sensitivitas 12,5%

Apabila Gambar 4.12 dinyatakan dalam bentuk tabel maka dapat dinyatakan sebagai Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4. 4 Hasil uji monitoring keandalan *real-time* dengan kesalahan sensitivitas 12.5%

Keandalan	Detik ke-
1	0 – 532,6
0,75	532,6 – 532,7
0,5	532,7 – 532,8
0,25	532,8 – 532,9
0	532,9 - 3600

Berdasarkan data pada Tabel 4.1 hingga Tabel 4.4, dapat disederhanakan menjadi Tabel 4.5 berikut.

Tabel 4. 5 Hubungan antara besar nilai kesalahan sensitivitas dengan waktu dimana nilai keandalan mulai menurun

Nilai Kesalahan sensitivitas Sensor	Keandalan Mulai Turun Detik ke-
5%	533,7
7,5%	533,2
10%	532,8
12,5%	532,6

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan dari tugas akhir mengenai monitoring keandalan *real-time* pada sistem pengendalian kecepatan turbin angin berdasarkan estimasi kesalahan adalah :

- Telah dilakukan perancangan *observer* untuk mendapatkan nilai estimasi kecepatan turbin angin. Berdasarkan hasil uji telah dilakukan, dengan pemberian kesalahan sensitivitas sebesar 5%; 7,5%; 10%; dan 12,5%, masing-masing mampu mengestimasi kesalahan yang telah disimulasikan pada detik ke-1300; 1350; 1400; dan 1450.
- Telah dilakukan perancangan monitoring keandalan *real-time* berdasarkan estimasi kesalahan. Berdasarkan hasil uji monitoring keandalan yang telah dilakukan, didapatkan bahwa semakin besar nilai kesalahan sensitivitas maka semakin cepat sistem akan mengalami kegagalan. Pada kesalahan sensitivitas sensor sebesar 5%; 7,5%; 10%; dan 12,5%, masing-masing nilai keandalan mulai mengalami penurunan pada detik ke-532,6; 532,8; 533,2; dan 533,7.

5.2 Saran

Berdasarkan tugas akhir yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya yaitu sebagai berikut :

- Apabila ingin melakukan penelitian mengenai estimasi kesalahann beberapa *step* kedepan maka disarankan untuk tidak menggunakan *observer*. Hal ini dikarenakan *observer* hanya dapat memestimasi kesalahan satu *step* kedepan saja.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Zhengguo Xu, Yindong Ji, dkk. (2011). A New Real-Time Reliability Prediction Method for Dynamic Systems Based on On-Line Fault Prediction. *IEEE*, vol. 58, no.3, pp. 523-538.
- Jesús María Pinar Pérez, Fausto Pedro García Márquez, dkk. (2013). Wind turbine reliability analysis. *ELSEVIER*, no. 23, pp. 463-472.
- J.F. Manwell & J. G. McGowan. (2009). Wind Energy Explained. Washington. USA
- Miller, Nicholas. (2003). Dynamic Modelling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine Generators. USA : General Electric International, Inc.
- Chen Zhang, Wei Gao, dkk. (2017). Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, based maintenance. *ELSEVIER*, no. 103, pp. 606-612.
- Daniel Chan & John Mo. (2017). Life cycle reliability and maintenance analyses of wind turbines. *ELSEVIER*, no. 110, pp. 328-333.
- Yonggang Lin, Le Tu, dkk. (2016). Fault analysis of wind turbines in China. *ELSEVIER*, no. 55, pp. 482-490.
- Peter Tavner, Clare Edward, dkk. (2006). Influence of Wind Speed on Wind Turbine Reliability. *Wind Engineering*, , vol. 30, no.1.
- Tallyen, Russel. (2015). Improving Wind Turbine Reliability. *Renewable Energy Focus*, vol. 16, no.4.
- Eunshin Byon, Lewis Ntamo, dkk. (2013). Wind Energy Facility Reliability and Maintenance. Berlin : Springer-Verlag.
- Gustavo de Novaes Pires Leite, dkk. (2018). Prognostic techniques applied to maintenance of wind turbines : a concise and specific review. *ELSEVIER*, no. 81, pp. 1917-1925.
- Indriawati, K., Agustinah, T., & Jazidie, A. (2015). Robust observer-based fault tolerant tracking control for linear

- systems with simultaneous actuator and sensor faults: Application to a DC motor system. *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 8 (4), 410-417.
- Christoffer Sloth, Thomas Esbensen, dkk. (2011). Robust and fault-tolerant linear parameter-varying control of wind turbines. *ELSEVIER*, no. 21, pp. 645-659.
- Montadher Sami & Ron J. Patton. (2012). An FTC Approach to Wind Turbine Power Maximisation via T-S Fuzzy Modelling and Control. In : *8th IFAC Symposium on Fault Detection*, pp. 349-354.
- Bress, Thomas J. (2017). Wind Turbine Reliability. In *Electrical Engineering and Computer Science Article*.
- Shuangwen Sheng & Ryan O'Connor. (2017). Reliability of Wind Turbines. In *Wind Energy Engineering Article*.


```
%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%
```

```
    % Operation at Cp max
```

```
%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%
```

```
rated_omegar=1.2;  
omegar = rated_omegar;
```

```
% Enforce boundaries on wind speed
```

```
% A warning could be displayed
```

```
if wind_speed_CpMax < 6
```

```
    wind_speed_CpMax=6;
```

```
    disp('Warning: Wind speed at nominal speed and at Cp  
max has been set to 6 m/s')
```

```
end
```

```
if wind_speed_CpMax > 30
```

```
    wind_speed_CpMax=30;
```

```
    disp('Warning: Wind speed at nominal speed and at Cp  
max has been set to 30 m/s')
```

```
end
```

```
K1=lambda_CpMax/omegar*wind_speed_CpMax;
```

```
% Calculation of K2 needed to get P equal to the requested  
value at
```

```
% Cp max for the requested wind speed
```

```
Prated=Pmec1*1;
```

```
P Rated_omegar_theta_zero=0.75;
```

```
K2 =
```

```
P Rated_omegar_theta_zero*Prated/(wind_speed_CpMax^3*Cp  
Max);
```

```
K1_K2=[K1 K2];
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
    % End of calculation for operation at Cp max
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Drive train data
```

```
H_WT = 4.32; % (s)
```

```
Ksh = 80.27; % (pu of nominal mechanical torque/rad)
```

```
F_WT = 0;
```

```
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=0.5; % (pu)
```

```
T_speed = 5; %s
```

```
% Speed regulator data
```

```
Kp_speed = 3;
```

```
Ki_speed = 0.1;
```

```
Max_speed_reg=1; %Maximum output value for PI speed  
regulator (pu)
```

```
% Pitch control data
```

```
Kp_pitch = 0.1;
```

```
Ki_pitch = 0.5;
```

```

pitch_max = 27; % (deg)
pitch_rate = 10; % (deg/s)
Pitch_time_constant=0.01; % (s)
wn = 1;
zeta = 1;

% 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;
taug = 0.1;
ng = 1;

% pitch = 0;
% beta0 = -0.9;
% R = K1;
% dTadB = 0;
% seperlamdai = 1/(lambda_CpMax + c7*(beta0 + pitch)) - c8/(1
+ (beta0 + pitch)^3);
% dCpdlamda = c1*c6 + c1*c2*exp(-c5*seperlamdai)-c5*c1*(-
c4 - c3*(beta0+pitch) + c2*seperlamdai)*exp(-c5*seperlamdai);
% dTadwr = K2*R*wind_speed_CpMax^2*dCpdlamda-
K2/w_wt0*wind_speed_CpMax^3*CpMax;
% dTadVw = -R*K2*w_wt0*wind_speed_CpMax*dCpdlamda +
3*K2*wind_speed_CpMax^2*CpMax;

Ac = [-1/taug 0 0 0;
0 -(D_mutual)/(2*H_WT) D_mutual/(2*H_WT) -
Ksh/(2*H_WT);

```

```

-1/(2*H) (D_mutual)/ng/(2*H) -(D_mutual+F)/ng^2/(2*H)
Ksh/ng/(2*H);
0 1 -1/ng 0];

```

```

Bc = [0 1/taug;
1/(2*H_WT) 0;
0 0;
0 0];

```

```

C = [1 0 0 0; 0 1 0 0];

```

```

D = [0 0; 0 0];
sys = ss (Ac,Bc,C,D);
Ts = 0.1;
[sysd,G]=c2d(sys,Ts,'zoh')
A = sysd.a
B = sysd.b

```

```

n = length(A);
p = size(C,1);
m = size(B,2);
%
% gg1 = [0 1];
[Add,Dd]=c2d(A,eye(n),Ts);
Dw = [0; 1]; % [1; 1];
Fs = Dw;

```

```

dw = size(Dw,2);
dd = size(Dd,2);
fs = size(Fs,2);

```

```

Abar = 10*eye(p);
Aa = [A zeros(n,p); Ts*Abar*C eye(p)-Ts*Abar];
Ba = [B; zeros(p,m)];
Ea = [zeros(n,fs); Ts*Abar*Fs];
Da =[Dd ;zeros(p,dd) ];

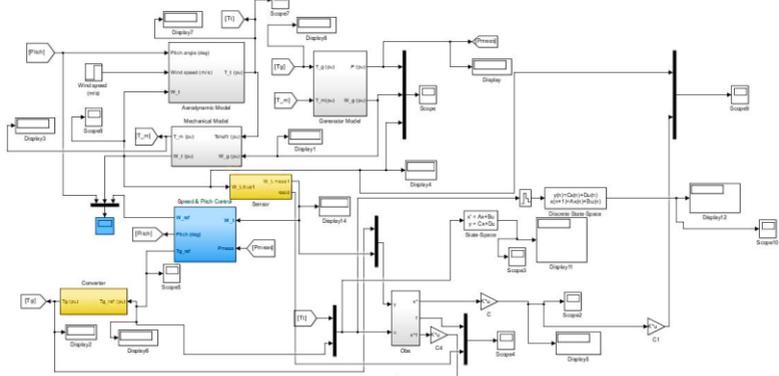
```

```
Ca = [zeros(p,n) eye(p)];  
Bo = [Da zeros(n+p,fs); zeros(fs,dd) eye(fs)];  
Atild = [Aa Ea; zeros(fs,n+p) eye(fs)];  
Btild = [Ba; zeros(fs,m)];  
Ctild = [Ca zeros(p,fs)];  
  
p1 = 0.92;  
p2 = 0.91;  
p3 = 0.938763;  
p4 = 0.94;  
p5 = 0.919;  
p6 = 0.9911;  
p7 = 0.99911;  
Ktild = place(Atild',Ctild',[p1 p2 p3 p4 p5 p6 p7])
```

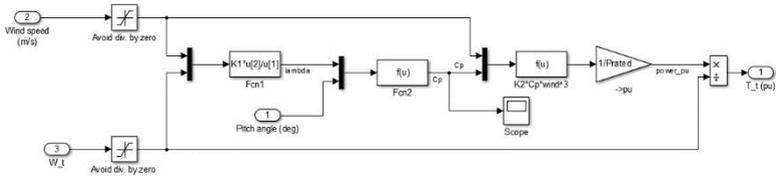
LAMPIRAN B

SIMULINK SISTEM TURBIN ANGIN PADA MATLAB R2014a

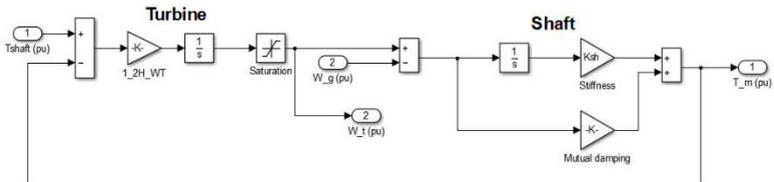
A.1 Sistem Turbin Angin



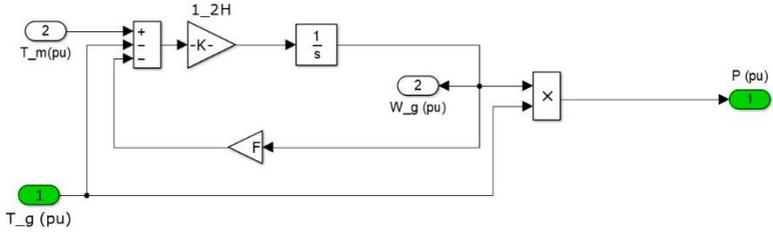
A.2 Model Aerodinamik dari Sistem Turbin Angin



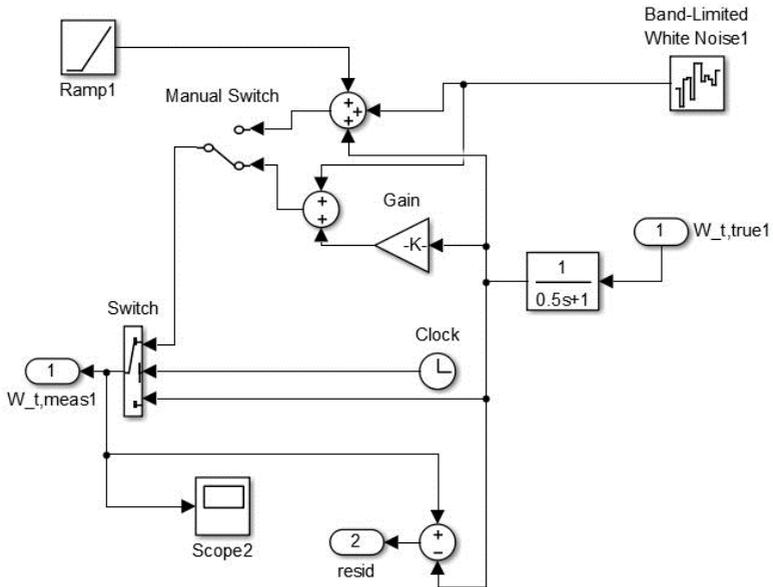
A.3 Model Mekanik dari Sistem Turbin Angin



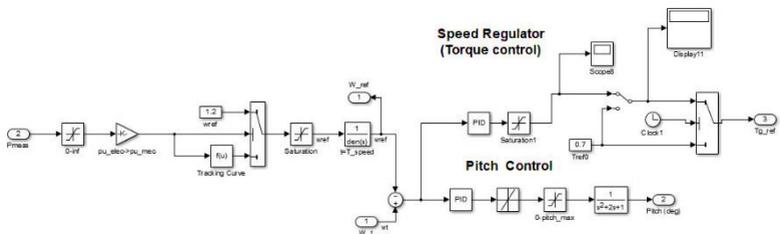
A.4 Model Generator dari Sistem Turbin Angin



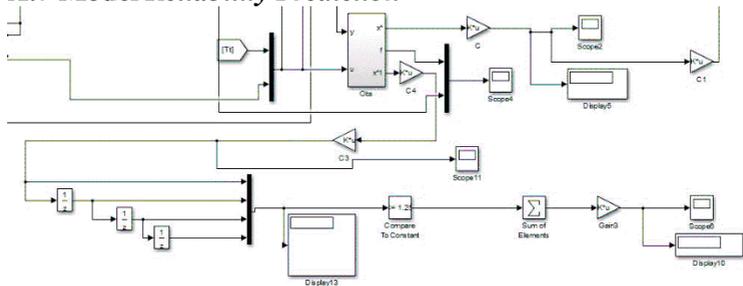
A.5 Model Sensor



A.6 Sistem Pengendalian Kecepatan Turbin Angin



A.7 Model Reliability Prediction



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Nama penulis Sarwenda Kusuma Wardhani dilahirkan di Malang, tanggal 12 Maret 1996. Saat ini penulis tinggal di Jalan Kertarejasa IIB/101 Singosari, Malang, Provinsi Jawa Timur. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN Candirenggo IV, SMPN 1 Singosari, SMAN 1 Lawang dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang.

Pada bulan Juli 2018 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Monitoring Keandalan *Real-Time* Pada Sistem Pengendalian Kecepatan Turbin Angin Berdasarkan Estimasi Kesalahan**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui *email*: sarwendakw@gmail.com.