



Disertasi TE 093099

**RANCANG BANGUN KONTROL LOGIKA FUZZY
PADA SUDUT ANGGUK TURBIN ANGIN
UNTUK OPTIMISASI DAYA LISTRIK
DI LADANG ANGIN JAWA TIMUR - INDONESIA**

ALI MUSYAFA'
NRP. 2208301009

Dosen Pembimbing
Prof.Dr.Ir. Imam Robandi, MT.
Dr.I. Made Yulistya Negara,ST. M Sc.

**PROGRAM DOKTOR
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2012**



Dissertation TE 093099

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF FUZZY LOGIC CONTROLLER
ON THE PITCH ANGLE OF THE WIND TURBINE
FOR ELECTRICAL POWER OPTIMIZATION
IN THE EAST JAVA WIND FARM - INDONESIA**

ALI MUSYAFA'
ID. 2208301009

Supervisor
Prof.Dr.Ir. Imam Robandi, MT.
Dr.I. Made Yulistya Negara, ST. M Sc.

PHD PROGRAM
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2012

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI TE-093099

Judul : Rancang Bangun Kontrol Logika Fuzzy Pada Sudut Angguk Turbin Angin Untuk Optimisasi Daya Listrik di Ladang Angin Jawa Timur-Indonesia

Oleh : Ali Musyafa'

NRP. : 2208301009

Telah diujikan pada :
Hari/Tanggal : Selasa / 17 Januari 2012

Tempat : Ruang Seminar Pascasarjana Jurusan Teknik Elektro ITS

Mengetahui / Menyetujui :

Dosen Penguji:

Dosen Pembimbing:

1. Prof.Dr.Ir.Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 196404051990021001

1. Prof.Dr.Ir.Imam Robandi, MT.
NIP. 196308171990031001

2. Prof.Ir.Mochamad Ashari, M Eng.PhD.
NIP. 196510121990031003

2. Dr.I.Made Yulistya Negara,ST.M Sc.
NIP. 197007121998021001

3. Prof.Ir.Rukmi Sari Hartati,MT.PhD.
NIP. 19530813 197903 2001



Direktur Program Pascasarjana

Prof.Dr.Ir.Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 196404051990021001

DAFTAR ISI

Judul	o
Lembar Pengesahan	i
Abstrak	ii
Abstract	iv
Kata Pengantar	vi
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	xi
Daftar Simbul.....	xii
Daftar Singkatan.....	xiii
Bab 1 Pendahuluan.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Turbin Angin.....	5
1.3. Logika Fuzzy	8
1.4. Peramalan Kecepatan dan Arah Angin.....	10
1.5. Sistematika Laporan.....	10
Bab 2 Plant dan Kontrol	11
2.1. Peramalan Dengan Jaring Saraf Tiruan	13
2.1.1. Peramalan Pada Plant-1	16
2.1.2. Peramalan Pada Plant-2	14
2.2. Turbin Angin.....	16
2.2.1. Blade Turbin Angin	18
2.2.2. Posisi Sudut Pitch Blade	19
2.2.3. Blade Turbin Angin Standard NACA.....	21
2.2.4. Blade Turbin Angin Standard NREL.....	21
2.2.5. Bahan Blade	22
2.2.6. Prinsip Kerja Turbin Angin	23
2.2.7. Prototipe Turbin Angin Plant-1 dan Plant-2	26
2.3. Kontrol Logika Fuzy.....	28
2.3.1. Prinsip Dasar Logika Fuzzy.....	29
2.2.2. Fuzzifikasi.....	31
2.2.3. Basis Aturan Logika Fuzzy.....	33
2.2.4. Logika Pengambilan Keputusan	34
2.2.5. Defuzzifikasi	34
2.2.6. Kontrol Logika Fuzzy	38
Bab 3 Desain Sistem.....	39
3.1. Metoda Pengukuran Data Cuaca (Kasus I)	41
3.2. Metoda Peramalan Kecepatan Angin (Kasus II)	42
3.3. Metoda Peramalan Kecepatan Angin dan Arah Angin (Kasus III)	43
3.4. Metoda Optimisasi Parameter Turbin Angin (Kasus IV)	45
3.5. Metoda Optimisasi Daya Angin (Kasus V)	47
3.6. Metoda Pengembangan Kontrol Logika Fuzzy Plant-1 (Kasus VI)	50
3.7. Metoda Pengembangan Kontrol Logika Fuzzy Plant-2 (Kasus VII).....	53
3.8. Instalasi Turbin Angin di Surabaya (Kasus VIII).....	57

Bab 4 . Hasil Dan Analisis	60
4.1. Pengukuran Data Cuaca (Kasus I)	60
4.2. Peramalan Kecepatan Angin (Kasus II)	63
4.3. Peramalan Kecepatan Angin dan Arah Angin (Kasus III)	65
4.4. Simulasi Optimisasi Daya Turbin Angin (Kasus IV)	70
4.5. Optimisasi Daya Prototipe Turbin Angin (Kasus V)	74
4.6. Kontrol Logika Fuzzy Plant-1 (Kasus VI)	78
4.7. Kontrol Logika Fuzzy Plant-2 (Kasus VII).	82
4.8. Instalasi Turbin Angin di Surabaya (Kasus VIII)	87
Bab 5. Kesimpulan	92
5.1 Kesimpulan	92
Daftar Lampiran	94
Daftar Pustaka	94
Daftar Index	94
Daftar Riwayat Hidup	97

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Spesifikasi Desain Airfoil NREL S83n	22
Tabel 2.2. Perbandingan Karakteristik Bahan Blade Turbin Angin	23
Tabel 3.1. Model Pengujian Turbin Angin Dengan Kecepatan Angin Variatif	47
Tabel 3.2. Hasil Percobaan Turbin Angin dengan variasi sudut blade dan kecepatan angin..	49
Tabel 3.3. Basis Aturan Kontrol Logika Fuzzy Plant-1.....	52
Tabel 3.4. Basis Aturan Kontrol Logika Fuzzy Plant-2.....	55
Tabel 4.1. Koordinat Geografis Dari daerah pengukuran data cuaca yang diteliti.....	59
Tabel 4.2. Ketidakpastian Pengukuran Data Cuaca Pada Tiga Lokasi	61
Tabel 4.3. Spesifikasi hasil pelatihan JST	64
Tabel 4.4. Spesifikasi hasil pengujian JST	64
Tabel 4.5. Spesifikasi hasil pelatihan JST untuk kecepatan angin dan arah angin.....	67
Tabel 4.6. Spesifikasi hasil pengujian JST untuk kecepatan angin dan arah angin.....	67
Tabel 4.7. Koefisien Daya Maksimum pada Setiap Posisi Sudut Pitch Blade	76
Tabel 4.8. Posisi Sudut Pitch Optimum dengan Variasi Kecepatan Angin.....	76
Tabel 4.9. Karakteristik Respon KLF-1a dan KLF-1b	80
Tabel 4.10. Karakteristik Respon Kontrol Logika Fuzzy Plant-2	83
Tabel 4.11. Karakteristik Respon FLC-3 Uji Traking	85
Tabel 4.12. Hubungan posisi sudut pitch blade dan koefisien daya turbin angin.....	85
Tabel 4.13. Produksi daya angin pada plant-1 dengan C_p variasi Tiap Bulan	89
Tabel 4.14. Produksi daya listrik pada plant-1 dengan C_p variasi Tiap Bulan.....	89
Tabel 4.15. Produksi daya angin pada plant-2 dengan C_p variasi Tiap Bulan.	89
Tabel 4.16. Produksi daya listrik pada plant-2 dengan C_p variasi Tiap Bulan.....	89

DAFTAR SIMBOL

A	Rotor swept area [m^2]
a ,	Faktor induksi aliran [pu]
C_p	Power coefficient [pu]
R	Maximum rotor radius (m)
P_{aero}	Aerodynamic power [W]
T_{rot}	Torsional rotation at the turbine's rotor [N.m]
T_a	Aerodynamic torque [N.m]
T_g	Torque generator [N.m]
T_{aux}	Torque auxiliary [N.m]
J_g	Generator inertia [kg/m^2]
J_t	Rotor inertia [kg/m^2]
γ	Aerodynamic damping coefficient [N.m.s/rad]
c_T	Torsion coefficient (-)
v_t	Wind speed (m/s)
ω_t	Rotational speed (rad/s)
T_o	Optimum torsion (N.m)
v_o	Optimum wind speed (m/s)
C_{op}	Optimum power coefficient (-)
B_t	Friction coefficient of turbine

Greek symbols

ω_{rot}	Angular speed of rotor
η	Efficiency (-)
λ	Tip speed ratio [pu.]
λ_o	Optimal tip speed ratio [pu.]
ρ	Air density (kg/m^3)
θ	Pitch angle blade ($^\circ$)
u	Hellman coefficient (-)

DAFTAR SINGKATAN

EBT	<i>Energi baru terbarukan</i>
BBM	<i>Bahan bakar minyak</i>
PLTA	<i>Pembangkit listrik tenaga air</i>
PLTB	<i>Pembangkit listrik tenaga bayu</i>
PLTM	<i>Pembangkit listrik tenaga matahari</i>
PLTP	<i>Pembangkit listrik panas bumi</i>
GW	<i>Giga watt</i>
kW	<i>Kilo watt</i>
SKEA	<i>Sistem konversi energi angin</i>
NSF	<i>The national science fundation</i>
LAPAN	<i>Lembaga antariksa dan penerbangan nasional</i>
ESDM	<i>Energi dan sumberdaya mineral</i>
BMG	<i>Badan meteorologi dan geofisika</i>
PI	<i>Proporsional integral</i>
BPPT	<i>Badan pengkajian dan penerapan teknologi</i>
ANN	<i>Artificial neural network</i>
JST	<i>Jaring saraf tiruan</i>
RSME	<i>Root mean square error</i>
VAF	<i>Variance accounted for</i>
HB	<i>Hibah bersaing</i>
IEEE	<i>The institute of electrical and electronic engineering</i>
VAWT	<i>Vertical axis wind turbine</i>
HAWT	<i>Horisontal axis wind turbine</i>
NACA	<i>National advisory commite for aeronautics</i>
NREL	<i>National renewable energy laboratory</i>
PPS	<i>Pulsa per sekon</i>
PID	<i>Proporsional integral derivtif</i>
LQG	<i>Linier quadratic gaussian</i>
FLC	<i>Fuzzy logic control</i>
FIS	<i>Fuzzy inference system</i>
RPS	<i>Rotasional per sekon</i>
ESS	<i>Error steady state</i>
ITAE	<i>Integral time absolute error</i>
BPPT	<i>Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi</i>
TSCF	<i>Terra square cubic feet</i>

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Arsitektur JST plant-1	14
Gambar 2.2. Arsitektur JST plant-2	15
Gambar 2.3. Gambar umum turbin angin	18
Gambar 2.4. Skema sistem turbin angin	18
Gambar 2.5. Vektor gaya pada blade dengan variabel sudut serang	19
Gambar 2.6. Posisi sudut pitch blade	20
Gambar 2.7. Blade Naca 0012	21
Gambar 2.8. Penampang blade NREL	22
Gambar 2.9. Vektor gaya pada blade dengan sudut serang berbeda	24
Gambar 2.10. Tube angin yang melewati turbin angin	25
Gambar 2.11. Desain prototipe turbin angin plant-1	26
Gambar 2.12. Desain prototipe turbin angin plant-2	27
Gambar 2.13. Level strata data pada logika fuzzy	30
Gambar 2.14. Struktur dasar logika fuzzy	31
Gambar 2.15. Bentuk fungsi keanggotaan Gaussian	32
Gambar 2.16. Bentuk fungsi keanggotaan segitiga	32
Gambar 2.17. Bentuk fungsi keanggotaan trapesium	33
Gambar 2.18. Input fuzzy dengan 3 fungsi keanggotaan	33
Gambar 2.19. Stuktur fuzzy murni	35
Gambar 2.20. Struktur fuzzy Mamdani	36
Gambar 2.21. Struktur fuzzy Takasi-Sugeno	37
Gambar 3.1. Diagram alir rancangan penelitian	38
Gambar 3.2. Produksi daya turbin angin pada sudut pitch tetap dan berubah	39
Gambar 3.3. Skema sistem turbin angin	39
Gambar 3.4. Diagram blok sistem pengukuran data cuaca	40
Gambar 3.5. Diagram alir evaluasi proses data cuaca	40
Gambar 3.6. Diagram blok sistem peramalan kecepatan angin	41
Gambar 3.7. Diagram alir pemodelan JST pada kasus II	42
Gambar 3.8. Diagram blok sistem peramalan kecepatan angin dan arah angin	43
Gambar 3.9. Diagram alir pemodelan JST pada kasus III	43
Gambar 3.10. Tabung pembatas untuk model fisis turbin angin Betz	44
Gambar 3.11. Koefisien daya terhadap faktor induksi aliran	45
Gambar 3.12. Sistem monitor aktivitas turbin angin	47
Gambar 3.13. Setting sudut pitch turbin angin melalui sistem monitoring	48
Gambar 3.14. Diagram blok sistem kontrol logika fuzzy plant-1	50
Gambar 3.15. Diagram alir sistem kontrol logika fuzzy plant-1	50
Gambar 3.16. Fungsi keanggotaan input error dan delta error plant-1	51
Gambar 3.17. Fungsi keanggotaan output error dan delta error plant-1	52
Gambar 3.18. Diagram blok sistem kontrol logika fuzzy plant-2	53
Gambar 3.19. Diagram alir kontrol logika fuzzy plant-2	53
Gambar 3.20. Fungsi keanggotaan input error plant-2	54
Gambar 3.21. Fungsi keanggotaan input delta error plant-2	55
Gambar 3.22. Surface view berdasar basis aturan yang dibangun plant-2	56
Gambar 3.23. Lokasi pengukuran kecepatan angin Surabaya.	56
Gambar 3.24. Pola kecepatan angin bulanan Surabaya	57
Gambar 3.25. Total frekuensi untuk masing-masing kecepatan angin	57

Gambar 3.26. Diagram blok percobaan turbin angin plant-1	58
Gambar 3.27. Diagram blok percobaan turbin angin plant-2	58
Gambar 4.1. Peta lokasi pengukuran kecepatan angin Jawa Timur	60
Gambar 4.2. Variasi kecepatan angin untuk waktu singkat.....	60
Gambar 4.3. Variasi kecepatan angin tiap jam per hari	60
Gambar 4.4. Variasi kecepatan angin untuk kurun waktu bulanan	61
Gambar 4.5. Data input pelatihan JST sebelum <i>scalling</i> untuk Kasus II	62
Gambar 4.6. Data input pelatihan JST setelah <i>scalling</i> untuk Kasus II.....	63
Gambar 4.7. Data output proses pelatihan Kasus II.....	63
Gambar 4.8. Data output proses pengujian Kasus II	63
Gambar 4.9. Data input pelatihan JST setelah <i>scalling</i> untuk Kasus III	65
Gambar 4.10. Data output pelatihan JST setelah <i>scalling</i> untuk Kasus III	65
Gambar 4.11. Proses pelatihan JST untuk kecepatan dan arah angin.....	66
Gambar 4.12. Proses pengujian JST untuk kecepatan dan arah angin.....	66
Gambar 4.13. <i>Windrose</i> arah angin 2008.....	67
Gambar 4.14. <i>Windrose</i> arah angin 2009.....	67
Gambar 4.15. <i>Windrose</i> arah angin 2010.....	68
Gambar 4.16. Distribusi frekuensi kecepatan angin 2008	68
Gambar 4.17. Distribusi frekuensi kecepatan angin 2009	68
Gambar 4.18. Distribusi frekuensi kecepatan angin 2010	69
Gambar 4.19. Hasil simulasi variasi koefisien daya C_p terhadap TSR	69
Gambar 4.20. Hubungan daya angin terhadap kecepatan rotasi dengan variasi v angin.....	70
Gambar 4.21. Hubungan kecepatan rotasi terhadap posisi sudut blade.....	70
Gambar 4.22. Hubungan daya terhadap posisi sudut blade prototipe turbin	71
Gambar 4.23. Hubungan koefisien daya terhadap TSR prototipe turbin.....	71
Gambar 4.24. Hubungan Perbandingan C_p terhadap TSR prototipe turbin	72
Gambar 4.25. Hubungan produksi daya angin terhadap TSR simulasi & prototipe turbin	72
Gambar 4.26. Hubungan posisi sudut pitch terhadap RPM prototipe plant-2	74
Gambar 4.27. Hubungan sudut pitch blade terhadap kecepatan angin setelah blade	74
Gambar 4.28. Hubungan kecepatan angin terhadap TSR	75
Gambar 4.29. Hubungan kecepatan angin terhadap koefisien daya	75
Gambar 4.30. Respon KLF plant-1a terhadap penurunan kecepatan (5-4)m/s	77
Gambar 4.31. Respon KLF plant-1a terhadap kenaikan kecepatan (4-5)m/s	78
Gambar 4.32. Respon KLF plant-1a terhadap kecepatan angin fluktuatif (3,5-5,5)m/s	78
Gambar 4.33. Respon KLF plant-1b terhadap kecepatan angin fluktuatif (3,5-5,5)m/s	79
Gambar 4.34. Respon KLF plant-1b terhadap kenaikan kecepatan (4-5)m/s	80
Gambar 4.35. Respon KLF plant-1b terhadap penurunan kecepatan (5-4)m/s	80
Gambar 4.36. Respon KLF plant-2 terhadap setpoint 10 PPS	82
Gambar 4.37. Respon KLF plant-2 terhadap setpoint 20 PPS	82
Gambar 4.38. Respon KLF plant-2 terhadap setpoint 30 PPS	83
Gambar 4.39. Respon KLF plant-2 terhadap setpoint 40 PPS	83
Gambar 4.40. Respon KLF plant-2 terhadap sistem tracking (20-30-20)PPS	84
Gambar 4.41. Hubungan kecepatan angin terhadap daya angin plant-2	85
Gambar 4.42. Kecepatan rotasi turbin angin terhadap kecepatan angin plant-1	86
Gambar 4.43. Koefisien daya terhadap posisi sudut blade plant-1	86
Gambar 4.44. Keluaran daya rerata terhadap posisi sudut blade plant-1	87
Gambar 4.45. Produksi daya angin bulanan plant-1 pada ladang angin Surabaya	87
Gambar 4.46. Produksi daya angin bulanan plant-2 pada ladang angin Surabaya	88

Daftar Lampiran :

Lam] :Dran-1.Spesiflkasi Pro10tipe TU!bin At-sin Plant-!	93
Lam] :Dran-2.Spesiflkasi Pro10tipe TU!bin At-sin PI Ard-2	94
Daftar Pustaka.....	95
Daftar Riwayat Hrlup	98
Indek.....	!OI

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puja dan puji penulis panjatkan kehadirat Allah SWT. yang maha Alim dan maha Bijaksana. Atas berkah, petunjuk dan karunia-Nya penulis memperoleh kesempatan dapat melaksanakan dan menyelesaikan disertasi dengan judul :

RANCANG BANGUN KONTROL LOGIKA FUZZY PADA SUDUT ANGGUK TURBIN ANGIN UNTUK OPTIMISASI DAYA LISTRIK DI LADANG ANGIN JAWA TIMUR - INDONESIA

Disertasi ini disusun sebagai salah satu syarat guna memenuhi persyaratan bagi seorang mahasiswa untuk memperoleh gelar Doktor pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dengan segala keterbatasan yang ada pada penulis dan menyadari bahwa disertasi ini masih jauh dari sempurna, namun penulis sangat berharap semoga disertasi ini dapat memberi manfaat bagi semua pihak dan memberikan kontribusi bagi pengembangan teknologi turbin angin di Indonesia.

Akhir kata, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya dan tak terhingga kepada :

1. Prof.Dr.Ir.Imam Robandi, MT. Dr.I.Made Yulistya Negara,ST, M Sc. selaku pembimbing dan co-pembimbing, beliau telah membimbing penulis dengan penuh kesabaran, memberi semangat dan motivasi pada penulis selama studi dan penyelesaian disertasi.
2. Bapak.Prof.Dr.Ir. Mochamand Ashari, M Eng., Bapak Prof.Dr.Ir. Adi Soeprijanto, MT, Ibu Prof.Dr.Ir. Rukmi Sari Hartati, MT. Dari Universitas Udayana Bali atas kesabaran dan motivasinya.
3. Dirjen DIKTI yang telah mendukung pendanaan BPPS.
4. Ibu Mertua, Istri tercinta Irawati Agustin, putra M.Bahrudin Majid dan Tajuddin Ahmad Rafi' dan adik-adik ku tercinta. Atas do'a dan dukungannya.
5. Terimakasih Kepada Bapak Sekartedjo,Ibu Apriani, Bapak Suwarso, Bapak Bambang, Bapak Totok, Bapak Heru dan seluruh teman-teman muda Teknik Fisika, Bang Olie,Gus Hatta,Cak Gun dan Mas Ridho, atas motivasinya.
6. Bapak dan Ibu dosen Teknik Elektro yang telah memberi banyak ilmu pengetahuan, sehingga penulis dapat menyelesaikan jenjang studi S-3.
7. Seluruh mahasiswa Teknik Elektro,terutama di Laboratorium PSOC, terima kasih atas kerjasama dan kekompakannya, semoga terus nyambung.
8. Semua pihak yang telah membantu penyelesaian disertasi ini.

Semoga Allah SWT membalas amal baik Ibu Bapak, Saudara sekalian dan memberi rahmah atas semuanya.

Surabaya, Januari 2012

Ali Musyafa'

RANCANG BANGUN KONTROL LOGIKA FUZZY PADA SUDUT ANGGUK TURBIN ANGIN UNTUK OPTIMISASI DAYA LISTRIK DI LADANG ANGIN JAWA TIMUR - INDONESIA

Nama : Ali Musyafa'
NRP : 2208 301 009
Pembimbing : Prof.Dr.Ir. Imam Robandi, MT.
Co-Pembimbing : Dr.I. Made Yulistya Negara,ST, M Sc.

ABSTRAK

Indonesia memiliki wilayah yang luas dan terdapat banyak pemukiman di kawasan-kawasan terpencil. Pemenuhan kebutuhan energi listrik pada kawasan tersebut belum memungkinkan melalui jaringan listrik nasional. Pemenuhan kebutuhan energi melalui potensi energi lokal dan sumber daya lokal serta pemanfaatan energi baru terbarukan adalah jawaban yang paling tepat. Salah satu sumber energi terbarukan yaitu energi angin perlu dimanfaatkan secara optimum untuk pemenuhan kebutuhan energi listrik di kawasan terpencil. Pada penelitian ini telah dilakukan kajian potensi angin di wilayah Jawa Timur, pengembangan prototipe turbin angin, dan penggunaan sistem kontrol cerdas berbasis fuzzy logic yang sesuai dengan karakteristik angin di Jawa Timur. Angin yang berada di ladang angin secara umum memiliki kecepatan fluktuasi, sehingga kajian ladang angin penting untuk dilakukan. Kajian ladang angin meliputi akusisi data yang dilakukan dengan pengukuran secara langsung maupun tidak langsung dengan cara mencuplik data cuaca dari stasiun cuaca. Selanjutnya data tersebut diolah dan dianalisis untuk mengetahui kecepatan angin rata-rata dan arah angin. Data tersebut berupa kecepatan angin rata-rata dalam kurun waktu singkat, kurun waktu menengah maupun kurun waktu panjang. Pada bagian lain data kecepatan angin juga diolah melalui teknik peramalan yang diikuti perhitungan terhadap nilai ketidakpastian pengukuran untuk mengetahui kualitas data yang dihasilkan. Informasi ladang angin tersebut merupakan data yang sangat penting untuk mengukur tingkat keberhasilan dalam instalasi turbin angin.

Pada penelitian dikembangkan dua unit prototipe turbin angin. Perbedaan spesifik dari keduanya terletak pada komponen *blade*-nya. Blade yang dibangun mengacu pada standar NACA dan standar NREL yang selanjutnya disebut turbin angin plant-1 dan turbin angin plant-2. Oleh karena produksi daya listrik turbin angin secara dominan didominasi oleh kinerja blade turbin angin, maka fokus dalam penelitian ini adalah melakukan pengendalian sudut *pitch* blade turbin angin. Pengendalian sudut *pitch* blade turbin angin dilakukan untuk menjaga kecepatan sudut yang stabil dan mampu mengekstraksi energi angin yang melintas secara optimum. Pengendalian sudut *pitch* blade turbin angin dirancang berbasis logika fuzzy untuk mengoptimisasi energi angin yang berada di ladang angin yang memiliki kecepatan rendah dengan variasi kecepatan 3-6 m/s mampu diekstrak secara penuh. Penerapan kontrol logika fuzzy pada sudut *pitch* blade diharapkan mampu memaksimalkan keluaran daya rata-rata turbin angin dibanding dengan turbin angin yang memiliki sudut *pitch* blade tetap.

Pengujian prototipe turbin angin pada turbin angin plant-1 dan plant-2, meliputi pengujian variasi kecepatan angin terhadap variasi posisi sudut blade terhadap produksi RPM turbin angin. Pengujian strategi kontrol logika fuzzy terhadap variasi kecepatan angin maupun perubahan beban dengan kecepatan angin osilasi naik dan turun. Pengujian turbin ketika dikopel dengan generator. Pengujian elektronika daya, pengujian produksi daya listrik terhadap perubahan sistem turbin angin. Diketahui bahwa turbin angin mampu bekerja secara optimum pada daerah kerja kecepatan angin dengan *cut-in* 2,8 m/s dan *cut-off* 10 m/s . Koefisien daya maksimum (daya angin yang mampu diekstrak turbin angin) yang dihasilkan oleh turbin angin plant-1 0,22 dan turbin angin plant-2 0,545.

Adapun daya maksimum yang mampu diproduksi oleh turbin angin plant-1 dengan diameter 1 meter sebesar 13,2 Watt ketika kecepatan angin 5 m/s dan daya maksimum yang mampu diproduksi oleh turbin angin tipe plant-2 dengan diameter 2 meter sebesar 416 Watt pada kecepatan angin 7,5 m/s. Prototipe yang telah dikembangkan dalam penelitian ini sangat potensial dapat diterapkan di berbagai kawasan daerah pantai, daratan maupun pegunungan di Indonesia. Dengan nilai $C_p=0,545$ pada turbin angin plant-2 dengan sistem kendali logika fuzzy, maka prototipe turbin angin ini mampu menghasilkan efisiensi daya yang tinggi. Sehingga turbin angin ini dapat memberikan harapan besar untuk pemenuhan kebutuhan energi listrik yang berasal dari energi bayu.

Kata kunci : Kecepatan angin , Sudut angguk, Turbin angin, Kontrol logika fuzzy, Koefisien daya.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF FUZZY LOGIC CONTROLLER ON THE PITCH ANGLE OF THE WIND TURBINE FOR ELECTRICAL POWER OPTIMIZATION IN THE EAST JAVA WIND FARM - INDONESIA

Name : Ali Musyafa'
Id. : 2208 301 009
Supervisor : Prof.Dr.Ir. Imam Robandi, MT.
Co-Supervisor : Dr.I. Made Yulistya Negara, ST. M Sc.

ABSTRACT

Indonesia has a vast territory and there are many settlements in remote areas. Electricity on the remote areas can not be fulfilled by through the national grid system. Ones of possible solutions is utilized by local energy source and renewable energy. A wind energy as renewable energy can be optimally used for the electricity energy consumption in the remote areas. In this research, it has been carried out of a wind potential energy assessment in East Java, the development of wind turbine prototype, and the use of intelligent control systems based on fuzzy logic in respect to the characteristics of the wind in East Java. In general, the wind velocity fluctuates whole day and night; therefore a study of the wind farms characteristics is important. The study of wind farm characteristics includes data acquisition from direct measurement and sampling data from the weather stations. The obtained data are processed and analyzed to determine its average velocity and its also direction. The data include the average wind speed in a short, a medium, and a long period of time. The data also are processed using a forecasting technique the uncertainty value of measurement. These data are important to determine a successful of the wind turbine installation.

Further successfully instalation of wind turbine strong depend on these data are also development two units prototype of wind turbines. The two prototypes of the wind turbine namely plant-1and plant-2 comply NACA and NREL standard, respectively. The wind turbine electrical power generation is predominantly dominated by the performance of wind turbine blade, therefore this researches concerned on the wind turbine blade pitch angle control. Pitch angle blade wind turbine is controller to maintain and stable angular velocity and then the extracting of energy optimum. The wind turbine blade pitch-angle control is designed based on a fuzzy logic controller. A wind velocity variation of 3-6 m / s can be extracted to achieve a maximum output power. The use of fuzzy logic control in blade pitch angle has a better performance compared to the wind turbine at a fixed blade pitch angle. Testing on the wind turbine prototype of type I and type II includes the testing of wind speed variation and the blade angle position variation to the production of rotation per minute (rpm) of the wind turbine. The fuzzy logic controller was used to control the pitch angle position with the variation of wind speeds and the load changes to the wind turbine. Coupling between the wind turbine and generator was also tested. It is obtained that the wind turbines are able to work at its optimum wind speed on the wind speed area with a cut-in of 2.8 m/s and a cut-off of 10 m/s with the coefficient of maximum power generated of 0.22 and 0.545 for plant-1 and plant-2, respectively.

The maximum power that can be generated by the wind turbines of 1 meter in diameter of plant-1 was 13.2 Watts at wind speed of 5 m/s and by the wind turbine that of 2 meter plant-2 was 426 Watts at the wind speed of 7.5 m / s. The prototype developed in this study can be applied potentially in different regions in the coastal areas, inland and mountains in Indonesia. With the value of C_p of 0.545 of wind turbine plant-2 and utilizing the fuzzy logic control system, the prototype wind turbine has a capability of a producing power efficiency. Therefore, the wind turbine can be used to fulfill the need of electrical energy derived from the wind energy.

Key words: wind speed, pitch angle, wind turbines, fuzzy logic control, power coefficient.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Isue polusi lingkungan global dan perhatian masyarakat dunia terhadap perubahan iklim saat ini telah mendorong berbagai pihak baik pemerintah maupun swasta di seluruh dunia untuk turut serta berusaha mengurangi penyebab polusi dan emisi karbon dioksida. Peningkatan kesadaran masyarakat dunia terhadap lingkungan [1,3]. Pencegahan polusi, efisiensi sumber daya, regulasi dan politik telah memberi tekanan agar masyarakat dunia menggeser penggunaan energi konvensional menuju energi terbarukan [4,55]. Usaha untuk mengurangi konsumsi sumber energi konvensional, isue efisiensi energi dan isue lingkungan telah disadari tidak saja oleh negara maju, akan tetapi juga telah disadari oleh banyak negara berkembang seperti Indonesia untuk turut serta secara aktif dalam pengalihan penggunaan energi konvensional. Cadangan energi konvensional Indonesia yang meliputi : minyak bumi hanya tinggal 7,7 milyar barel. Pada tahun 2009 minyak diperkirakan akan habis dalam kurun waktu 15 tahun ke depan. Cadangan gas bumi 165 *terra square cubic feet* (TSCF) akan habis untuk masa eksplorasi 55 tahun dan cadangan batubara dengan jumlah 18 milyar ton dengan kandungan energi rendah akan memberikan dampak polusi yang besar. Kondisi tersebut akhirnya menggeser kebijakan pemerintah dalam penggunaan energi konvensional ke energi baru terbarukan (EBT) yang sebelumnya direncanakan berjumlah 17 % menjadi 25 % terhadap total konsumsi energi nasional pada tahun 2025 [5].

Isue ekonomi telah menempatkan energi menjadi kebutuhan infrastruktur kunci pada perekonomian industri modern. Energi merupakan kebutuhan pokok utama bagi seluruh kegiatan manusia. Energi dipergunakan untuk kegiatan memasak, penyejuk ruang, pemanas air, penerangan, kesehatan, produksi pangan dan penggerak mesin untuk pembangunan ekonomi dan sosial. Tidak ada sebuah negara yang dapat berhasil mengembangkan sektor ekonominya tanpa didukung oleh penyediaan energi yang kuat. Setiap negara ingin memastikan bahwa akses terhadap energi bagi penduduk dan masyarakatnya dapat terlayani dengan baik. Secara historis, Indonesia telah menjadi negara penghasil minyak, gas dan batubara, sehingga Indonesia sangat bergantung pada bahan bakar fosil di samping bergantung pada tenaga air dan biomas sebagai pemasok utama energi. Oleh karena pembangunan di berbagai sektor telah berjalan dengan pesat, maka sektor ekonomi juga ikut tumbuh dan berkembang pesat. Keadaan ini berdampak terhadap ledakan penduduk (jumlah

penduduk pada tahun 2000 berjumlah 205 juta dan pada tahun 2010 telah tumbuh menjadi 238 juta) sehingga permintaan energi oleh masyarakat meningkat sangat tajam. Indonesia akan berada dalam keadaan bahaya ketika menghadapi defisit energi yang besar dan diperkirakan terjadi pada tahun mendatang 2030 seperti yang ditunjukkan oleh *energy outlook*, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). Tanda-tanda krisis pada saat ini telah tampak dan terganggunya pasokan energi primer sering tidak mampu dalam memenuhi permintaan pasar yang ada dan dalam jumlah yang cukup, di samping itu subsidi bahan bakar minyak (BBM) tetap selalu membengkak. Situasi tersebut telah mendorong negara Indonesia menghadapi era baru, yaitu era peningkatan penggunaan sumber energi baru dan terbarukan yang akan terus dikembangkan melalui penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi yang terkait dengan energi terbarukan. Indonesia telah membuat kebijakan mendasar tentang energi secara khusus energi angin telah dicanangkan sebagai sumber energi bersih dan sumber energi masa depan.

Isue geopolitik bagi Indonesia yang memiliki jumlah penduduk besar membuka peluang besar pengembangan turbin angin, terlebih dengan sebaran pulau yang jumlahnya sekitar 17.504, 6.000 di antaranya tidak berpenghuni tetap, menyebar di sekitar khatulistiwa dan memiliki cuaca tropis. Pulau dengan penduduk terpadat adalah pulau Jawa, dengan lebih dari setengah populasi (65%) penduduk Indonesia. Indonesia terdiri dari 5 pulau besar, yaitu Jawa, Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, Irian Jaya dan rangkaian pulau-pulau ini disebut pula sebagai kepulauan Nusantara [3]. Indonesia juga memiliki lebih dari 400 gunung berapi dan 130 di antaranya termasuk gunung berapi aktif. Sebagian dari gunung berapi terletak di dasar laut dan tidak terlihat dari permukaan. Indonesia merupakan tempat pertemuan dua rangkaian gunung berapi aktif (*Ring of Fire*). Indonesia mempunyai iklim tropik basah yang dipengaruhi oleh angin muson barat dan muson timur. Dari bulan nopember hingga mei, angin bertiup dari arah utara barat laut yang membawa banyak uap air dan hujan di kawasan Indonesia dan dari bulan juni hingga oktober angin bertiup dari selatan ke tenggara, kering dan membawa sedikit uap air. Temperatur udara di dataran rendah Indonesia berkisar antara 23 derajat Celsius sampai 28 derajat Celsius disepanjang tahun. Namun temperatur juga sangat bervariasi dari temperatur rata-rata mendekati 40 derajat Celsius pada musim kemarau di lembah Palu-Sulawesi dan di pulau Timor. Temperatur sampai di bawah 0 derajat Celsius berada di pegunungan Jayawijaya-Irian Jaya.

Isue energi baru terbarukan (EBT) pada awal milineum ketiga atau tepatnya tahun 2008 sangat penting, terutama ketika dunia dilanda krisis global yang meliputi: krisis energi, krisis keuangan dan krisis lingkungan, maka situasi tersebut telah mendorong semua pihak untuk melakukan usaha yang luar biasa untuk mencari alternatif dalam pemanfaatan energi, khususnya dalam pengembangan energi listrik konvensional menuju pada pembangkit listrik yang berbasis pada EBT. Usaha tersebut dilakukan secara serentak oleh masyarakat dunia untuk menjawab isue energi, isue lingkungan dan isue ekonomi. EBT adalah energi yang berasal dari sumber daya alam seperti sinar matahari, angin, panas bumi, air, pasang surut air laut dan lain-lain. Pada 2010 konsumsi energi akhir dunia energi baru terbarukan telah mencapai 16,2% dari total konsumsi energi global, dengan rincian 10 % berasal dari biomassa tradisional yang kebanyakan dipakai untuk pemanas, 3,4 % berasal dari pembangkit listrik tenaga air (PLTA) konvensional dan sisanya berasal dari EBT modern seperti mikrohidro, biomassa modern, pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB), Pembangkit listrik tenaga matahari (PLTM), pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) dan biofuel, yang jumlahnya telah mencapai 2,8%. Tahun 2009-2010 kapasitas terpasang EBT dunia telah tumbuh dari 250 Giga Watt (GW) menjadi 312 GW. Pertumbuhan EBT tertinggi ditempati oleh PLTB dengan jumlah 159 GW pada tahun 2009 menjadi 198 GW pada tahun 2010. PLTB telah menyumbang 2,5% dari total konsumsi energi dunia. Pertumbuhan PLTB ternyata paling fantastis dibanding dengan pertumbuhan EBT yang lain, pertumbuhan PLTB dunia telah tumbuh mencapai 31,7 % pada tahun 2009 dan 23,6 % pada tahun 2010. Untuk meningkatkan peran dan kontribusi PLTB agar memiliki peran yang semakin besar, maka usaha untuk memanfaatkan teknologi yang efisien menjadi penting. Peningkatan kemampuan teknologi untuk mengekstrak EBT menjadi tenaga listrik diusahakan oleh banyak pihak dengan teknologi yang telah ada yang selanjutnya terus dikembangkan agar lebih efisien, lebih handal, lebih ramah lingkungan dan harganya lebih terjangkau.

Denmark adalah negara pertama di dunia yang memanfaatkan angin untuk pembangkit tenaga listrik. Pada tahun 1890 telah dibangun turbin angin berdiameter sampai 23 m. Pada tahun 1910 beberapa ratus unit turbin angin yang memiliki kapasitas 5-25 kilo watt (kW) telah dioperasikan di Denmark. Sekitar tahun 1925 di Amerika Serikat pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang memiliki blade dua dan tiga telah dipasarkan secara komersial. Turbin angin yang paling terkenal saat itu adalah *Winchenger* yang memiliki kapasitas 200-1200 Watt dan disusul *Jacobs* dengan kapasitas 1500-3000 Watt. Setelah tahun 1940 biaya utilitas sistem konversi energi angin (SKEA) terus menurun sampai pada awal tahun 1970. Biaya utilitas SKEA turun sampai kurang dari 3 cents per kWh. Pada teknologi

turbin angin tersebut SKEA telah dibangun dalam skala besar dan telah efisien. Pada tahun 1974, The National Science Foundation (NSF) telah memsponsori pembangunan turbin angin dan berhasil merancang, membangun dan mengoperasikan turbin angin untuk tujuan penelitian seri MOD-0. Telah mengawali studi turbin angin untuk sarana dan prasarana dan membuat program dukungan penelitian dan pengembangan teknologi untuk turbin angin. Pada awal tahun 1980 MOD-0 telah diinstalasi di California, New Mexico, Puerto Rico, Rhode Island dan Hawaii. Turbin angin tersebut menggunakan blade dengan bahan aluminium dan balde komposit kayu. Pada tahun 2001 instalasi turbin angin sudah berkembang sangat pesat dan jumlah kapasitas terpasang di dunia telah mencapai 24.322 MW. Pada tahun 2010 sebanyak 83 negara di dunia telah memanfaatkan PLTB, dan sampai saat ini kapasitas terpasang diperkirakan telah mencapai 240.000 MW. atau meningkat sepuluh kali dalam kurun 10 tahun. Indonesia sebagai pengguna PLTB menempati urutan ke 70 dunia, dengan jumlah kapasitas terpasang sampai pada akhir 2010 sebesar 1,4 MW [5,25].

Sistem konversi energi angin (SKEA) merupakan sistem konversi energi tertua dan saat ini merupakan sistem konversi energi yang penting dan paling populer karena merupakan sistem energi yang bersih dan termasuk energi baru terbarukan, sumber energi yang ekonomis [1,6,8]. Sumber energi yang ramah, dapat diperbaiki dan merupakan sumber energi yang murah dan mengalami pertumbuhan paling besar 30% pada tahun 2009 [10]. SKEA tumbuh menjadi turbin angin yang modern hingga menghasilkan daya rata-rata mencapai 600 kW- 5 MW per unit yang diinstalasi di daerah sub tropis dengan kecepatan angin (4-50) m/s [9]. Kapasitas terpasang turbin angin dunia telah mencapai 198 GW pada tahun 2010 dan diyakini untuk jangka panjang penggunaan energi angin dapat mencapai lima kali produksi energi global saat ini atau 40 kali permintaan listrik dunia saat ini. Indonesia sebagai negara tropis dengan geografis yang luas dengan penduduk yang menyebar dari pantai, daratan dan pegunungan. Pada saat ini Indonesia telah menginstalasi turbin angin dengan kapasitas 1,4 MW dengan turbin berkapasitas 50 watt–10 kilowatt, dengan diameter blade 0,8-7,5 meter di daerah dengan kecepatan angin zone I (2,5-4,0) m/s, Zone II (4,0-5,0) m/s dan zona III (> 5) m/s. [11]. Pengembangan energi angin di Indonesia telah dicanangkan dapat mencapai 5 MW *on grid* dan 250 MW *off grid* antara tahun 2005-2025 [5, 25].

Pengembangan energi angin di Indonesia merupakan program energi nasional yang ditangani dan dikembangkan oleh LAPAN [5]. Pengadaan turbin angin dibuat sendiri dan dibeli dari negara Eropa, Cina, dan lain-lain. Turbin angin tersebut memiliki tipe *tradisional fixed-speed turbine* atau *stall regulation blade fix* [12]. Jenis turbin angin ini lebih cocok untuk zona yang memiliki kecepatan angin stabil dan range yang lebar, sedangkan untuk

kecepatan angin daerah tropis memiliki range sempit dan fluktuasi tinggi 4-6 m/s malam hari dan 3 m/s pagi hari sampai jam 10.00, Pada kecepatan angin kurang dari 3 m/s menjadi tantangan tersendiri untuk merancang turbin angin pada daerah cut-in rendah. Keadaan tersebut akan menurunkan produksi daya angin pada turbin [18]. Daerah kerja kecepatan angin rendah akan mempengaruhi kriteria optimisasi biaya pada turbin angin disamping akan berpengaruh terhadap biaya komponen turbin [9]. Saat ini telah terjadi tren bahwa pengembangan teknologi fixed-speed telah bergeser menuju variable-speed generator. Penelitian simulasi kontrol variabel speed generator skala kecil sampai besar telah banyak dilakukan [2,12,13,17]. Pengembangan prototipe dan pengujian turbine angin skala kecil sumbu horisontal tanpa kontrol telah dimulai [1]. Pengembangan prototipe turbin angin skala kecil dengan variable pitch angle control berbasis kontrol logika fuzzy (KLF) untuk kecepatan angin rata-rata rendah baru sampai pada tahap produksi daya angin [18-19]. Integrasi turbin angin dan generator listrik, perlu segera dikembangkan agar pemanfaatan energi angin dapat diperluas, sistem konversi energi angin diharapkan dapat mengekstrak energi maksimum dan turbin angin berada dalam keadaan mantap. Keadaan ini didasarkan pada koefisien daya terhadap tip-speed ratio [20]. Penerapan kontrol pada turbin angin telah dilakukan dengan strategi kontrol konvensional PI, dalam strategi kontrol ini diperlukan pengetahuan dinamika sistem yang rinci dan membutuhkan penurunan model matematika yang rumit [21]. Kesempurnaan kontrol konvensional sangat dipengaruhi oleh ketidak linier sistem dan multivariabel proses sistem yang memerlukan perintah multi objective. Pada sistem kontrol konvensional daerah kontrol dibagi dalam beberapa region-region yang menjadikan sistem rumit dan lambat [22]. Sehingga dikembangkan sistem kontrol cerdas yang mampu mengatasi kerumitan yang ada dan mampu menghasilkan daya listrik yang optimum [23-24].

1.2 Turbin Angin

Turbin angin atau sistem konversi energi angin (SKEA) berfungsi mengubah energi angin menjadi energi listrik. Oleh karena konversi energi tersebut masih belum banyak dimanfaatkan di Indonesia, maka hal ini sangat disayangkan, karena Indonesia memiliki daerah-daerah dengan potensi angin yang sangat memadai. Keterbatasan instalasi turbin angin di Indonesia, menyebabkan pengembangan desain dan rancang bangun turbin angin masih sangat kurang dan hanya sebatas pada desain konvensional yang belum melibatkan sistem kontrol mutakhir. Dengan dihadirkan tema penelitian ini yang mencakup pengembangan desain dan pengembangan prototype turbin angin serta integrasi sistem

kontrol pada turbin angin sangat diharapkan mampu berkontribusi dalam pengembangan turbin angin di Indonesia. Tujuan integrasi sistem kontrol pada turbin angin adalah untuk mengontrol kecepatan poros penggerak rotor pada generator. Pada kontrol kecepatan ini generator diharapkan mampu menghasilkan kecepatan tertentu, sehingga generator mampu beroperasi di daerah kerja secara penuh. Apabila generator memiliki kecepatan rotasi kurang dari range yang ditetapkan, maka generator tidak akan mampu menghasilkan energi listrik yang cukup. Demikian pula apabila kecepatan generator melebihi jangkauan range operasi, maka generator akan menjadi tidak efisien dan dapat mengalami kerusakan [3-4].

Dalam desain sistem turbin angin disini, tidak melibatkan adanya sistem brake karena sistem brake telah diambil alih oleh sebuah sistem kontrol sudut pitch blade. Dengan berubahnya sudut dari blade maka secara signifikan akan mengubah aerodinamis dari blade. Perubahan aerodinamis ini selanjutnya mengubah besaran daya angin yang ditangkap oleh blade. Dari sini turbin angin selanjutnya akan mengubah kecepatan perputaran poros ke putaran generator. Variabel proses sistem kontrol turbin angin disupply oleh keluaran sensor anemometer, sensor rotary encoder yang dipasang pada turbin angin atau dapat dipasok dari data pustaka peramalan kecepatan angin yang sudah diproses sebelumnya [27,31].

Fokus permasalahan yang diselidiki adalah sistem kontrol dan sistem akuisisi data yang bergantung pada variabel kecepatan angin. Adapun sistem kontrol yang akan diadopsi adalah sistem kontrol logika fuzzy. Sistem kontrol ini diharapkan mampu menghasilkan peningkatan efisiensi turbin angin dan mampu memproduksi kecepatan putaran poros yang relatif konstan. Dalam penelitian ini yang dinilai sangat penting adalah menemukan cara mendesain dan membangun sebuah protipe turbin angin yang dilengkapi dengan sistem kontrol sudut pitch blade berbasis kontrol cerdas. Beberapa masalah utama yang diselidiki untuk mendukung kegiatan rancang bangun turbin angin adalah sebagai berikut: mencari hubungan besaran data cuaca dan kecepatan angin, karakteristik data cuaca dan kecepatan angin di beberapa lokasi di Jawa Timur, menemukan karakteristik turbin angin yang terkait dengan perubahan sudut pitch, membangun algoritma sistem kontrol logika fuzzy. Menemukan kinerja sistem kontrol turbin yang mampu mengatasi gangguan internal maupun eksternal. Selanjutnya mencari dan menetapkan keadaan mantap sistem turbin angin ketika turbin angin dioperasikan di lapangan [18].

Penelitian rancang bangun turbin angin atau sistem konversi energi angin (SKEA) di Indonesia masih sangat terbatas. SKEA yang pernah dibangun belum mengintegrasikan sistem kontrol secara terpadu dengan turbin angin. SKEA masih sangat perlu ditingkatkan

kinerjanya agar dapat beroperasi secara optimal. Pengembangan sistem kontrol pada turbin baru sebatas pada sistem keluaran turbin angin, bukan pada sistem turbin angin secara integral seperti pengaturan sistem kelistrikan untuk pengisi baterai atau elektronika daya oleh Amir Suprianto dari Universitas Lampung, Hibah Bersaing-2008 dan T.A. Fauzy Soelaiman dengan penyempurnaan sistem turbin angin untuk penerangan billboard Institut Teknologi Bandung, Hibah Bersaing-2009. Kedua peneliti belum membahas sistem kontrol turbin angin. Dalam buku putih tentang energi baru dan terbarukan yang diterbitkan oleh kementerian Ristek, bahwa kegiatan litbang SKEA di Indonesia tentang pengembangan turbin angin untuk daerah kerja berkecepatan angin rendah dalam kegiatan penelitian tahun 2005-2010. Kementrian Riset dan Teknologi (RISTEK) baru memasukkan sistem kendali turbin angin yang difokuskan pada kendali rotor atau pengereman kecepatan turbin dengan blade tetap. Sistem kendali turbin angin yang lain diperuntukkan pada turbin angin yang diinstalasi pada ladang angin berkecepatan tinggi diatas 12 m/s. Tujuan penerapan sistem kontrol tersebut untuk mengamankan generator. Sistem kontrol belum melakukan optimisasi daya listrik. Dalam kebijakan RISTEK lanjutan, litbang untuk periode 2011-2015 baru menargetkan peningkatan performasi terhadap sistem kontrol lanjutan dengan teknik pengaturan aerodinamis blade dan generator. Dalam sistem kendali posisi blade yang direspon oleh aktuator adalah sistem kendali sudut *pitch* turbin angin, sehingga tema penelitian yang diusulkan pada saat ini telah dikerjakan lebih awal sebagai topik penelitian masa depan [32].

Pada bagian lain sistem kendali sudut *pitch* tetap turbin angin telah dikerjakan oleh B.Neammanee dari Institute of Technology Nort Bangkok [22]. Pengendalian adaptiv terhadap variabel kecepatan turbin angin juga telah dilakukan dengan menerapkan kontrol torsi pada poros turbin untuk menjamin kecukupan energi angin [1]. Aktivitas lain yakni penelitian dengan simulasi dan pemodelan generator turbin angin untuk kecepatan rotasi sebagai variabel yang dikontrol dengan aktuator pada poros turbin angin telah dilakukan [36]. Pengendalian posisi susut *pitch* terhadap variabel kecepatan pada turbin angin telah dilakukan dengan simulasi oleh Zhang, dia membandingkan strategi kontrol konvensional PI dan kontrol logika fuzzy [21]. Pada penelitian simulasi kendali tersebut ukuran jejari blade yang digunakan 35 meter dan turbin mampu membangkitkan listrik dengan daya 1500 kW. Demikian pula Mulyadi telah melakukan pemodelan dan perancangan turbin angin berbasis kontrol cerdas sebagai paradigma untuk sistem pembangkit turbin angin. Penelitian dikerjakan dengan sumulasi untuk memperbaiki cakupan energi turbin angin yang dikontrol

agar turbin dapat bekerja secara signifikan pada ladang angin dengan kecepatan angin diatas 12 m/s. [20].

Pengembangan strategi kontrol turbin angin yang tidak boleh diabaikan adalah perhatian terhadap adanya keterbatasan input daya pada turbin angin, kemampuan komponen mekanik dan komponen elektrik turbin angin yang siap menampung range besaran fisis. Dalam kaitan upaya peningkatan produksi energi angin, maka usaha meningkatkan ekstraksi energi angin harus dilakukan ketika terjadi penurunan daya angin. Penurunan tersebut terjadi ketika ada perubahan kecepatan angin. Strategi kontrol yang cocok untuk dirancang dengan beban yang terikat sistem turbin angin adalah usaha menjaga nilai tip speed ratio (TSR) agar tetap berada pada range kerja turbin angin. Nilai TSR yang optimum akan menyebabkan turbin angin mampu mengekstraksi daya angin secara maksimum pada kondisi angin yang tersedia. Model dinamik dan simulasi turbin angin juga diperlukan untuk menentukan sistem kontrol yang sesuai ketika turbin angin menghadapi perubahan beban [9].

1.3. Kontrol Logika Fuzzy

Fuzzy set pertama kali diperkenalkan oleh L.Zadeh tahun 1965 dalam papernya yang berjudul *fuzzy sets* pada jurnal kontrol dan Informasi. Dalam paper tersebut dipaparkan ide dasar tentang fuzzy set yang meliputi *inclusion, union, intersection, complement, relation* dan *convexity*. Ide tersebut dimatangkan oleh Zadeh dalam beberapa paper lanjutannya. Penerapan fuzzy dalam bidang kontrol dengan fuzzy set dikembangkan oleh E.Mamdani dan kawan kawan dari Queen Mary College London, yang mengaplikasikan dalam skala laboratorium pada tangki proses pencampuran dan mesin uap. Adapun penerapan dalam dunia industri dipelopori oleh Sugeno dan kawan kawan dari Tokyo Institute of Technology Jepang dan Yamakawa dari Kyusu Institute Technology. Dalam Pengembangan Hardware, Togai dan Watanabe dari Bell Telephone Laboratory berhasil menciptakan chip pertama berbasis logika fuzzy. Pada saat ini penerapan fuzzy set sudah sangat luas, seperti dalam bidang kontrol, proses produksi, manajemen, teknik sipil, kedokteran, bidang militer. Logika fuzzy telah berkembang sangat cepat dan pesat, diminati oleh banyak pihak, kontrol logika fuzzy dapat diintegrasikan dengan algoritma sistem yang lain sehingga berpeluang untuk optimisasi proses pada plant [2,8,47].

Pengembangan kontrol logika fuzzy pada turbin angin telah diawali pada model kontrol klasik [1,3]. Penerapan kontrol turbin angin pada perioda awal dilakukan melalui beberapa pendekatan dan penyederhanaan sistem turbin angin dengan pendekatan model linier, keluaran besaran fisis turbin angin hanya diukur dalam variabel tunggal yang

selanjutnya menjadi variabel yang dikontrol. Perkembangan lebih lanjut pada sistem kontrol Proporsional Integral Derivatif (PID) yang ditambahkan sebuah devais kompensator dengan tujuan mengatasi fluktuasi kecepatan angin. Prinsip kerjanya mengkompensasi posisi sudut pitch untuk menjaga agar kecepatan rotasi poros turbin angin konstan [55]. Pada pengembangan lebih lanjut sistem kontrol ditingkatkan melalui cara memilih nilai-nilai yang didasarkan pada minimasi kesalahan kecepatan rotor dan siklus aktuator. Metode kontrol tersebut adalah metoda kontrol ruang keadaan yang berumpan balik penuh. Pada metoda tersebut sistem telah memiliki sensitifitas terhadap kesalahan sistem, pemodelan sistem dan pengukuran parameter sistem [4,7]. Perkembangan selanjutnya penerapan teknik kontrol pada blade individual dengan metoda linier kuadratik Gaussian (LQG). Sistem kontrol yang dimaksud termasuk dalam sistem kontrol optimal. Tujuan sistem kontrol tersebut mengurangi beban yang timbul pada turbin angin akibat faktor lingkungan, seperti gaya gravitasi, gaya gesek blade, lag flap dan faktor yang mempengaruhi pemodelan sudut pitch turbin angin [5]. Perkembangan selanjutnya pada sistem kontrol Proporsional Integral (PI) dan H_∞ untuk pengaturan sudut pitch turbin angin yang memiliki kapasitas sampai 400 kW. Sistem kontrol H_∞ terbukti mampu menghitung nilai ketidakpastian model turbin angin, lebih baik dan mampu mengurangi kesalahan pengukuran kecepatan angin sehingga sistem kontrol mampu meredam gangguan yang tidak diinginkan pada plant. Untuk meredam gangguan dan mengatasi gangguan pada pengukuran variabel proses, dilakukan dengan meningkatkan kemampuan sistem kontrol. Usaha tersebut dilakukan dengan membangun state estimator, mendeteksi kondisi gangguan dilakukan dengan cara membangun asumsi dalam bentuk model gelombang. Dengan menambah estimator pada sistem, maka sistem kontrol mampu mengurangi efek gangguan [8]. Desain sistem kontrol berbasis algoritma ruang keadaan yang diterapkan untuk mengatur kecepatan rotor turbin angin berada pada poros blade turbin. Kontrol tersebut dioperasikan ketika turbin angin bekerja dengan beban penuh dan sistem kontrol menggunakan sampling data pada lima derajat kebebasan dalam model linier. Peneliti lain mengembangkan teknik pengendali dengan menambah estimator sebagai penyeimbang keberadaan tiang turbin angin. State estimator yang dibangun digunakan untuk mengurangi kekurangan dalam pengukuran besaran fisis dalam parameter dan variabel proses. Efek yang timbul dari kecepatan angin fluktuatif diharapkan dapat diatasi oleh sistem kontrol.

1.4. Peramalan Kecepatan dan Arah Angin

Energi angin adalah salah satu sumber energi terbarukan yang ketersediannya dapat menggantikan energi konvensional. Persolan penting dalam penggunaan turbin angin adalah bagaimana mengatasi kesulitan peramalan daya angin yang akurat. Fluktuasi kecepatan angin

yang terjadi akan mempengaruhi produksi daya angin. Keadaan tersebut akan menimbulkan kesulitan bagi pengguna turbin angin di lapangan, terutama untuk berkompetisi pada pasar listrik. Sebuah peramalan yang akurat dapat dimanfaatkan untuk mengoperasikan jaring listrik agar dapat dilakukan penjadwalan secara ekonomis dan efisien untuk mengakomodasi permintaan pelanggan listrik. Satu hal yang paling penting pada produksi energi angin adalah mencari hubungan perubahan yang terjadi dengan kecepatan pada kecepatan angin dan arah angin, keluaran daya turbin angin akan bervariasi dengan perubahan tersebut. Secara teori perhitungan daya angin dapat dihitung dengan mudah dan ditunjukkan bahwa keluaran daya turbin angin bervariasi terhadap kecepatan angin yang dipangkat tiga dan kerapatan udara. Oleh sebab itu peramalan yang terkait dengan produksi daya turbin angin difokuskan pada kecepatan dan arah angin. Pada penelitian ini dibahas model peramalan untuk durasi 30 menit dan durasi harian menggunakan arsitektur jaring saraf tiruan (JST).

1.5. Sistematika Laporan

Disertasi ini disusun mengikuti tema pokok bahasan untuk memudahkan pemahaman terhadap pengembangan sistem turbin angin dengan rincian sebagai berikut. Bab 1 berisi pendahuluan yang mengangkat berbagai isue antara lain isue lingkungan, isue ekonomi, isue geopolitik, isue energi baru terbarukan dan isue perkembangan SKEA. Bab 2 membahas Plant dan kontrol. Disain sistem yang terkait dengan pengembangan turbin angin untuk memaksimalkan penangkapan energi angin, efisiensi daya angin sebagai variabel kecepatan turbin angin dilaporkan pada bab 3. Bab 4 membahas hasil penelitian melalui hasil uji dengan simulasi maupun implementasi untuk meningkatkan efisiensi penangkapan daya angin melalui variasi sudut pitch blade, memperbaiki variabel kecepatan angin pada turbin yang terhubung pada generator. Integrasi sistem turbin angin termasuk elektronika daya yang secara khusus dikembangkan untuk mengoptimisasi keluaran sistem konversi energi angin (SKEA) yang telah diintegrasikan dengan beban dan sistem penyimpanan daya pada baterai. Kesimpulan dari pekerjaan yang telah dikerjakan dilaporkan pada bab 5. Informasi tambahan disajikan pada lampiran untuk melengkapi informasi penelitian ini.

BAB II

PLANT DAN KONTROL

Plant adalah seperangkat peralatan yang digunakan untuk melakukan suatu operasi tertentu, yang merupakan obyek fisik yang akan dikontrol. Pada penelitian ini obyek yang dimaksud adalah turbin angin. Adapun yang dimaksud kontrol adalah suatu operasi yang bekerja apabila ada gangguan pada sistem, maka ia cenderung memperkecil selisih antara keluaran sistem dan masukan sistem, atau untuk memenuhi keadaan yang diinginkan dan ia bekerja berdasarkan selisih tersebut. Kontrol yang diterapkan pada sistem adalah kontrol logika fuzzy, yang merupakan sistem kontrol dalam kelompok kontrol cerdas. Sistem yang dimaksud dalam penelitian ini adalah kombinasi dari turbin angin dan kontrol logika fuzzy yang bekerja bersama-sama dan melakukan sasaran tertentu, yaitu optimisasi produksi daya listrik dari turbin angin pada suatu zona kecepatan angin yang disebut ladang angin.

Turbin angin yang merupakan objek penelitian ini belum lengkap kalau belum dilengkapi dengan ladang angin yang merupakan tempat atau lokasi dimana angin dan karakteristiknya berada. Tempat atau lokasi turbin angin diinstalasi merupakan bagian plant turbin angin yang sangat menentukan berhasil atau tidaknya SKEA. Karakteristik ladang angin dan spesifikasi turbin angin dapat diibaratkan dua sisi keping mata uang yang tidak dapat dipisah. Ladang angin merupakan faktor kunci berhasil atau tidaknya instalasi turbin angin. Geografis Indonesia memiliki potensi energi angin cukup besar tetapi belum banyak dimanfaatkan. Pada buku cetak biru energi nasional, potensi tenaga angin di Indonesia tercatat 9,29 G W, tetapi sampai sekarang baru dimanfaatkan sekitar 1,4 MW. Menurut kebijakan energi nasional pembangunan PLTB harus mencapai 250 M W pada 2025 [5]. Indonesia banyak memiliki daerah terisolasi dengan ladang angin yang variatif dan memiliki potensi tenaga angin besar dan berpeluang dapat diinstalasi turbin angin untuk menghasilkan tenaga listrik. Situasi geografis Indonesia yang variatif tersebut mengakibatkan pasokan energi konvensional menjadi terkendala terutama penyediaan tenaga listrik sulit dipenuhi. Potensi energi lokal seperti energi angin jika dikelola dengan baik akan mampu memberi jawaban atas kebutuhan energi tersebut. Pada daerah yang memiliki ladang angin dengan kecepatan rata rendah tetapi masih >3 m/s, maka energi angin tersebut masih dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tenaga bayu skala mikro. Pada bagian lain ketika terjadi keterbatasan suplay energi konvensional dan sumber energi tersebut memberikan dampak bahaya terhadap lingkungan (polusi lingkungan, hujan asam dan efek rumah kaca),

maka pemanfaatan EBT perlu mendapat perhatian serius. Pada saat ini dunia sangat berkepentingan terhadap pengalihan penggunaan energi konvensional menuju energi baru terbarukan. Saat ini telah banyak negara di dunia memanfaatkan energi baru dan terbarukan seperti angin, matahari, geothermal, biomassa, dan lain lain. Banyak negara telah merencanakan pemenuhan energi listriknya >10 % berasal dari energi angin. Energi angin merupakan EBT yang dinilai paling menjanjikan di masa depan dibanding dengan EBT lain seperti: solar, geothermal dan biogas. Dalam waktu mendatang perangkat turbin angin dipastikan meningkat tajam terutama turbin angin yang diinstalasi di lepas pantai. Oleh karena pada desain turbin angin selalu harus menyesuaikan dengan ladang angin dimana turbin angin akan diinstalasi, maka pada penelitian ini dibahas kegiatan pengukuran kecepatan angin dan variabel data cuaca lain meliputi: suhu, kelembaban, arah angin, intensitas matahari dan tekanan udara, yang terkait dengan pengukuran kecepatan angin di Indonesia dan pada ladang angin di Jawa Timur pada khususnya. Data geografis Indonesia yang dimaksud dalam ladang angin meliputi: Lokasi sebelah tenggara Asia, di Kepulauan Melayu antara Samudra Hindia dan Samudra Pasifik. Koordinat geografis: 6° LU - 11°08' LS dan dari 95° 00' BT - 141°45' BT, Referensi peta: Asia Tenggara Wilayah: *total darat*: 1.922.570 km², *daratan non-air*: 1.829.570 km² *daratan berair*: 93.000 km², *lautan*: 3.257.483 km²; Garis batas negara: *total*: 2.830 km: Malaysia 1.782 km, Papua Nugini 820 km, Timor Leste 228 km Negara tetangga yang tidak berbatasan darat: India di barat laut Aceh, Australia, Singapura, Filipina, Vietnam, Thailand, Brunei Darussalam, Kamboja, Thailand dan Birma dengan garis pantai: 54.716 km.

Karakteristik kecepatan angin dan jenis turbin angin memegang kunci berhasil atau tidaknya instalasi turbin angin. Indonesia sebagai negara yang berada di dekat katulistiwa memiliki kecepatan angin rata-rata tahunan rendah dalam range 3-7 m/s. Akan tetapi dengan kecepatan angin tersebut memanfaatkan energi angin melalui sistem konversi tenaga angin (SKEA) terbuka sangat lebar, asalkan SKEA yang dibangun dirancang secara khusus untuk bekerja pada daerah kecepatan angin tersebut. SKEA yang dibangun memiliki diameter blade disesuaikan dengan ukuran 1-3 meter [3]. Konfigurasi turbin angin yang dibangun dicocokkan dengan lokasi Indonesia yakni turbin angin tipe HAWT dengan jumlah blade 3 buah, menggunakan tipe blade mengikuti standar NACA-0012 yang selanjutnya disebut turbin angin plant-1 dan blade standard NREL S83n yang selanjutnya disebut turbin angin plant-2 [10].

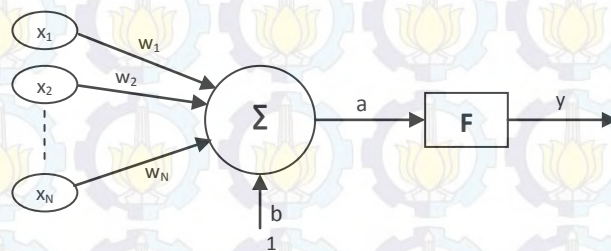
Blade standard *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) S83n adalah tipe blade yang dirancang secara khusus untuk turbin angin skala kecil dengan diameter (1–3 m). Karakteristik blade yang memiliki ukuran tebal dengan nilai C_L (lift coefficient) maksimum maka blade akan memiliki gaya angkat yang tinggi pula meskipun pada kecepatan angin rendah [3]. Parameter lain yang harus diperhatikan dalam perancangan blade turbin angin adalah penentuan sudut *pitch* blade. Parameter dominan yang mempengaruhi kinerja turbin angin meliputi: kecepatan sudut rotor, kecepatan *cut-in* turbin, kecepatan *cut-off* turbin dan koefisien daya turbin [4]. Fokus penelitian memilih posisi sudut *pitch* optimum yang mampu menghasilkan daya maksimum, mempertimbangkan nilai *cut-in* yang rendah, agar ketika kecepatan angin rendah turbin masih mampu menghasilkan korelasi kecepatan angin dan kecepatan rotor tetap tinggi. Berdasar pertimbangan tersebut maka dirancang blade turbin angin yang mampu berputar, meski kecepatan angin relatif kecil dan turbin mampu menghasilkan torsi pada rotor secara maksimal. Pustaka data yang mengkorelasikan posisi sudut *pitch*, kecepatan angin, kecepatan sudut, tip speed ratio, dan koefisien daya selanjutnya digunakan sebagai acuan pengembangan strategi kontrol turbin angin. Interaksi turbin angin dan ladang angin ditransformasi melalui blade turbin angin. Interaksi tersebut merupakan sistem yang sangat kompleks, namun demikian peristiwa tersebut dapat disederhanakan melalui pemodelan torsi aerodinamis atau pomodelan daya aerodinamis.

2.1. Peramalan Dengan Jaring Saraf Tiruan

Jaring saraf tiruan (JST) adalah algoritma yang dapat digunakan untuk optimisasi sistem. Proses optimisasi tersebut dapat digunakan untuk proses peramalan data dengan masukan dan keluaran tertentu. JST bertugas melakukan perhitungan independen terhadap data masukan yang diterima dan melewati lapisan pertama, lapisan tersembunyi dan lapisan akhir. Bagian tersebut merupakan sub-kelompok dari satu atau lebih elemen pengolah untuk menentukan keluaran JST. Setiap elemen pemroses JST melakukan komputasi yang didasarkan pada jumlah input tertimbang. Lapisan pertama JST senantiasa merupakan lapisan input dan lapisan akhir senantiasa lapisan output. Lapisan yang menempati diantara kedua lapisan, yakni lapisan pertama dan terakhir merupakan lapisan tersembunyi. Unsur pengolah JST dapat dilihat sebagai unit yang mirip dengan neuron otak manusia, sehingga disebut dengan sel atau neuron buatan. Proses peramalan yang dikerjakan oleh JST melalui tahapan proses pembelajaran, proses validasi dan proses pelatihan. Adapun teknik peramalan dengan JST dapat diberlakukan untuk peramalan data cuaca jangka pendek, jangka menengah dan jangka panjang.

2.1.1. Peramalan Pada Ladang Angin-1

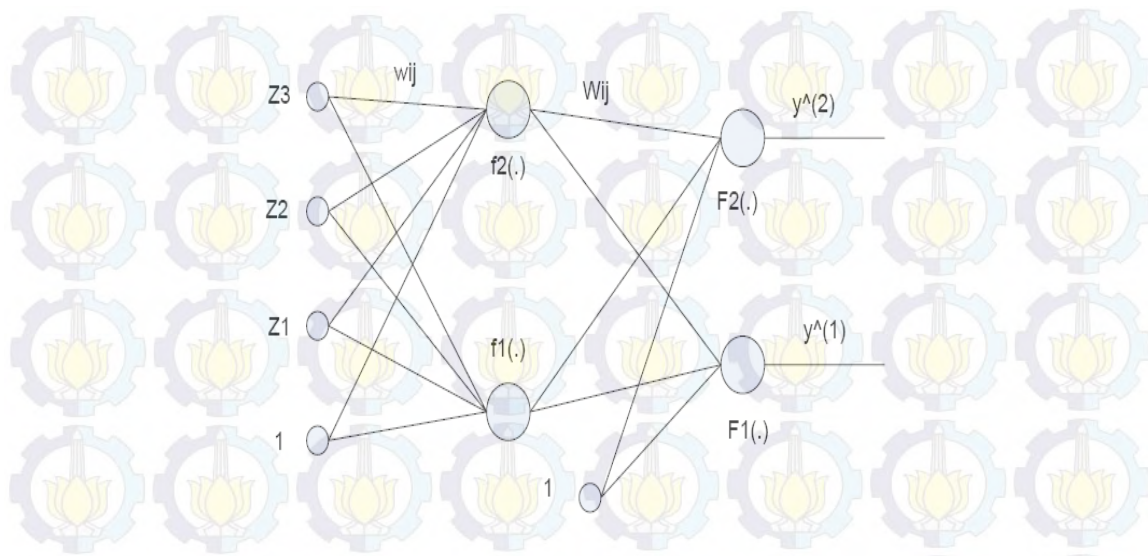
Teknik peramalan yang diimplementasi pada ladang angin-1 adalah memprediksi kecepatan angin menggunakan model Jaringan Saraf Tiruan (JST). JST diaplikasikan untuk meramal kecepatan angin dalam jangka waktu singkat 30 menit. Teknik peramalan tersebut mengikuti tahapan berikut: akusisi data dan pengolahan data awal, konversi dan normalisasi data, analisis statistika, perancangan JST, pelatihan, validasi, pengujian dan analisis sistem. Parameter masukan yang digunakan dalam peramalan meliputi: temperatur, kelembaban relatif, intensitas cahaya dan keluaran berupa kecepatan angin. Model JST untuk peramalan kecepatan angin menggunakan algoritma pembelajaran Levenberg Marquardt. Pemilihan tersebut dilakukan untuk menyesuaikan dengan kebutuhan. Proses peramalan diawali dengan proses *scalling* data yang dikerjakan dengan cara membuat skala pemberian bobot pada setiap data dan setiap kelompok data yang selanjutnya dibagi dengan nilai tertinggi dari kelompoknya [3-4].



Gambar 2.1. Arsitektur JST ladang angin-1

2.1.2. Peramalan Pada Ladang Angin-2

Jaring syaraf tiruan (JST) merupakan algoritma yang menirukan cara berpikir otak manusia yang selalu mencoba untuk mensimulasikan proses pembelajaran. Seperti halnya otak manusia, JST juga terdiri dari beberapa *neuron* dan *neuron-neuron* tersebut satu sama lain berhubungan. Neuron akan mentransformasikan informasi yang diterima melalui sambungan keluarnya menuju ke neuron-neuron lain. *Multylayer Perceptron* (MLP) adalah jaring yang paling sering mempertimbangkan anggota dari keluarga jaring syaraf tiruan. Alasannya dengan JST ada kemudahan untuk memodelkan sistem secara sederhana meskipun dari sistem yang memiliki hubungan fungsional yang kompleks. Untuk mendapatkan nilai bobot JST terlebih dahulu harus dicari melalui hubungan input-output. Cara untuk mendapatkan bobot dilalui melalui prose pelatihan atau pembelajaran, yang pada dasarnya merupakan sebuah masalah optimisasi. Gambar 2.2. mengilustrasikan MPL ladang angin-2 dengan 3 input, 2 lapis tersembunyi dan 2 lapis output.



Gambar 2.2. Arsitektur JST ladang angin-2

Perancangan JST merupakan implementasi dari identifikasi model matematis JST. Identifikasi JST dilakukan berdasarkan beberapa variabel-variabel fisis input-output. Pasangan data input-output yang digunakan pada identifikasi JST ini terdiri dari 3 input dan 2 output. Pasangan data input dan output yang digunakan untuk pelatihan dan validasi model tersebut memiliki hubungan yang nonlinier. Data input output diambil dari stasiun cuaca Karangates-Malang. Output JST merupakan model yang diperoleh dari proses pelatihan dan proses validasi. Output model JST diharapkan cocok dan sesuai dengan output data lapangan yang sesungguhnya atau JST mampu menghasilkan nilai error minimum. Sebelum data input-output ladang angin digunakan untuk membangun model JST, terlebih dahulu dilakukan proses *scalling*. Data *scalling* diperlukan untuk mempercepat konvergensi data saat proses *training* dan validasi JST. Kegiatan *scalling* untuk mentransformasi data pada range 0-1. Pada bagian akhir setelah data dikenai diproses uji dengan JST maka data dikembalikan lagi pada range data awal yaitu dengan cara menggunakan persamaan kebalikan metode *scalling* tersebut.

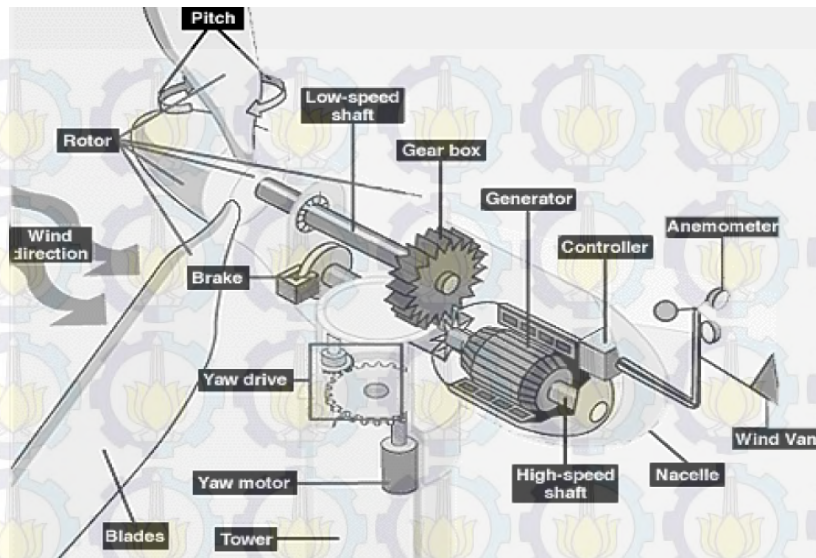
Setelah melakukan proses *scalling* data, maka data tersebut digunakan pada proses pelatihan JST dengan 3 layer, yaitu lapisan input, lapisan tersembunyi dan lapisan output. Pada tiap tiap *neuron* terdapat fungsi aktivasi yang terdapat pada arsitektur JST tersebut. Fungsi aktivasi pada lapisan tersembunyi dan lapisan output menggunakan fungsi aktivasi linear.

2.2. Turbin Angin

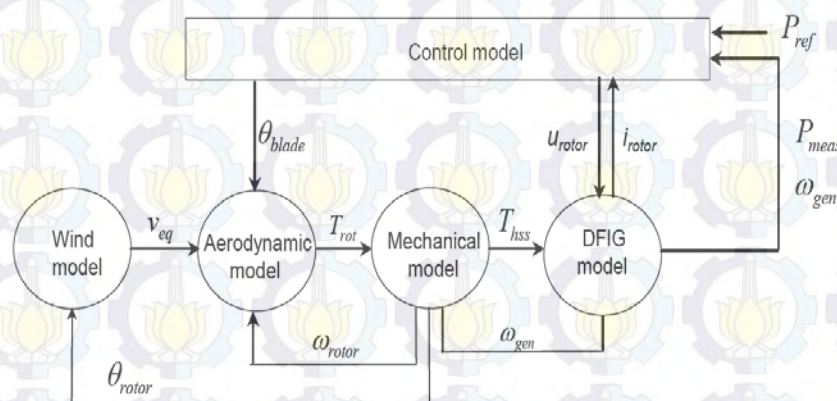
Turbin angin adalah mesin konversi energi tertua di dunia [6-7]. Pada saat ini, turbin angin merupakan sistem konversi energi angin (SKEA) yang penting dan sangat populer. Hal ini disebabkan sistem konversi energi tersebut merupakan kelompok sistem yang bersih dan mentransformasi energi baru dan terbarukan sebagai sumber energi yang ekonomis [1,8]. Merupakan sumber energi yang ramah lingkungan, pengelolaannya mudah dan murah [10]. Pada saat ini turbin angin sangat diminati oleh banyak negara, sehingga keberadaan SKEA telah mengalami pertumbuhan yang luar biasa. Mencermati perkembangan turbin angin, bahwa turbin angin klasik telah berkembang menjadi turbin angin yang modern, sehingga SKEA mampu memproduksi daya listrik rata-rata lebih besar 5 MW tiap unit. Penerapan turbin angin telah meluas dan telah diinstalasi pada daerah yang memiliki kecepatan angin tinggi, kecepatan angin sedang dan kecepatan angin rendah. Turbin angin secara luas telah menyebar baik di daerah sub tropis maupun daerah tropis, pada daerah yang memiliki kecepatan angin kurang dari 10 m/s maupun daerah yang memiliki kecepatan angin (12-50) m/s. dan diinstalasi di darat maupun di laut [9]. Turbin angin telah diminati banyak pihak, sehingga saat ini turbin angin berkembang sangat pesat. Jumlah kapasitas terpasang turbin angin dunia telah mencapai 196 GW pada akhir tahun 2010, angka tersebut diyakini akan terus tumbuh dan turbin angin akan menjadi sistem transformasi energi primadona pada jangka panjang [25]. Penggunaan energi angin diramalkan dapat mencapai lima kali produksi energi global pada waktu yang akan datang atau 40 kali lipat permintaan energi listrik dunia saat ini [11]. Indonesia sebagai salah satu negara tropis dengan geografis luas dan penduduk yang menyebar dari pantai, daratan dan pegunungan mempunyai perhatian khusus pada pemanfaatan energi angin [5]. Pada akhir tahun 2010, Indonesia telah menginstalasi turbin angin dengan kapasitas 1,4 MW. Adapun ukuran turbin angin yang digunakan memiliki kapasitas 50 Watt sampai 10 kW dan turbin angin memiliki diameter blade 0,8 meter sampai 7,5 meter yang dioperasikan pada daerah yang memiliki kecepatan angin yang dibagi dalam daerah kecepatan: zone I, yakni (2,5- 4) m/s, pada zone II memiliki kecepatan angin (4-5) m/s dan zona III dengan kecepatan angin diatas 5 m/s. [11]. Adapun pengembangan SKEA di Indonesia telah dicanangkan oleh pihak pemerintah bahwa instalasi turbin angin pada tahun 2025 dapat mencapai kapasitas 5 MW yang terhubung pada jaring listrik nasional dan 250 MW tidak terhubung dengan jaring nasional. Pengembangan energi angin di Indonesia telah menjadi program nasional dan pengembangannya ditangani oleh LAPAN yang didukung oleh perguruan tinggi dan lembaga penelitian lain [5].

Tipe 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/s. 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. HAWT dioperasikan pada daerah yang memiliki kecepatan angin rendah sampai daerah yang memiliki kecepatan tinggi. Ukuran turbin dibangun mulai dari skala kecil sampai skala besar. HAWT dengan ukuran besar telah mampu menghasilkan tenaga listrik dengan kapasitas mencapai 5 MW bahkan lebih di setiap unitnya. Turbin angin tipe HAWT sangat variatif yang terkait: konfigurasi, jumlah blade, ukuran rotor, tipe blade, dan sistem kontrol sangat beragam. Prinsip kerja turbin angin sumbu vertikal VAWT sama seperti tipe turbin angin horizontal HAWT, putaran turbin tipe VAWT tegak lurus dengan permukaan tanah. Perkembangan ukuran dan tipe turbin angin VAWT juga sangat variatif. Turbin angin yang memiliki dimensi dan tipe blade berbeda akan memiliki kinerja yang berbeda pula, terutama efisiensi yang dihasilkan. Turbin angin yang memiliki jumlah blade lebih banyak akan menghasilkan torsi lebih besar. Jenis turbin angin ini banyak digunakan untuk kegiatan mekanik seperti untuk keperluan pompa air. Turbin angin dengan jumlah blade sedikit, dua atau tiga lebih sering digunakan untuk tujuan pembangkit tenaga listrik. Turbin angin tipe ini mempunyai torsi rendah, akan tetapi memiliki putaran rotor tinggi yang dapat ditunjukkan melalui hubungan nilai efisiensi $[\eta]$, tip speed ratio $[\lambda]$ dan torsi $[C_Q]$. Pada rotor turbin angin yang memiliki jumlah blade lebih banyak, maka turbin akan menghasilkan torsi lebih tinggi, namun demikian turbin belum tentu mampu menghasilkan efisiensi yang tinggi demikian pula sebaliknya. Produksi sumber daya angin dan turbin angin sangat terkait dengan jumlah blade turbin angin, turbin dengan jumlah blade banyak lebih cocok untuk daerah dengan kecepatan angin rendah, dengan kecepatan angin rata-rata tidak terlalu tinggi turbin masih mampu menghasilkan putaran rotor yang diharapkan. Namun demikian turbin dengan jumlah blade sedikit sulit dapat beroperasi secara efisien pada daerah kecepatan angin kurang dari 5 m/s.

Gambaran umum tentang turbin angin yang tersusun atas komponen dan divais ditunjukkan oleh Gambar 2.3. Turbin angin terdiri dari komponen utama: blade, gearbox, generator dan kontroler. Skema turbin angin diilustrasikan oleh Gambar 2.4. Untuk mendapat gambaran yang lebih jelas perihal turbin angin maka turbin angin akan dibahas secara khusus dan lebih detail pada bab ini.



Gambar 2.3. Gambar umum turbin angin [54]

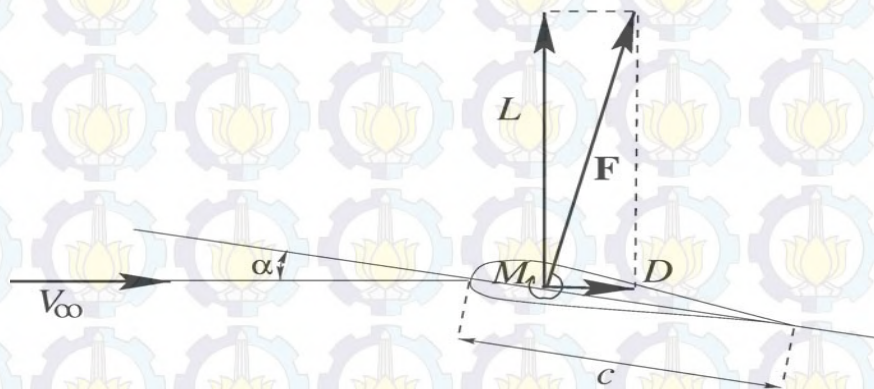


Gambar 2.4. Skema sistem turbin angin [53]

2.2.1. Blade Turbin Angin

Blade adalah komponen utama turbin angin untuk menangkap energi angin, energi tersebut dikonversi menjadi energi mekanik dan listrik. Desain blade turbin angin merupakan bagian penting dalam pembangunan turbin angin. Perkembangan teknologi telah memberi kesempatan pada perancang untuk membuat blade turbin angin dengan bentuk yang bervariasi meliputi: bahan, ukuran, jenis blade dan jumlah blade. Pada turbin angin sumbu horizontal terdapat persyaratan penting yang menuntut tambahan perhatian meliputi: jejari blade, jumlah blade, sudut pitch, panjang chord, jenis airfoil dan bahan baku blade. Ketika blade dikenai angin dari arah depan, maka blade akan menghasilkan vektor gaya yang disebut

lift atau gaya angkat (L) dan *drag* (D) atau gaya dorong. Perubahan gaya angkat dan gaya dorong dipengaruhi secara langsung oleh bentuk geometri dari blade, kecepatan dan arah angin terhadap garis utama blade. Akibat dari perubahan gaya angkat dan dorong, maka kecepatan sudut dan nilai torsi poros turbin akan berubah pula. Oleh karena bentuk aerodinamis blade sangat dipengaruhi oleh posisi kemiringan sudut blade terhadap arah hembusan angin, maka posisi $[\alpha]$ sudut serang akan berubah. Dengan perubahan sudut blade tersebut maka akan mempengaruhi kecepatan sudut turbin angin yang nilainya berbanding lurus dengan produksi energi angin yang diekstrak turbin angin melalui blade, dengan demikian penelurusan posisi sudut blade turbin angin menjadi penting. Jumlah blade dan dimensi rotor turbin angin adalah memiliki pengaruh dominan terhadap kemampuan turbin angin dalam mengekstrak energi angin yang melintas pada blade. Semakin besar ukuran diameter rotor, semakin besar pula area sapuan angin oleh blade. Keadaan ini akan memberikan pengaruh terhadap kecepatan rotasi turbin angin. Untuk ukuran rotor yang makin besar akan menghasilkan koefisien daya semakin besar, keadaan ini mengakibatkan kecepatan putaran turbin menjadi lebih rendah. Turbin angin sumbu horizontal secara umum memiliki tiga blade atau lebih banyak. Penentuan jumlah blade didasar pada desain daerah kerja dan estetika. Ilustrasi tentang blade dapat dijelaskan melalui Gambar 2.5.



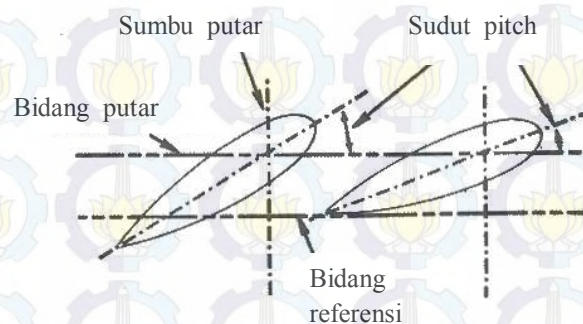
Gambar 2.5. Vektor gaya pada blade dengan variabel sudut serang [15]

2.2.2. Posisi Sudut Pitch Blade

Penetapan sudut pitch pada turbin angin adalah mengacu pada sudut serang dari blade terhadap aliran fluida yang melintasinya. Pada pesawat terbang atau kapal sudut pitch propeler dapat diatur sedemikian rupa untuk mengendalikan daya yang dihasilkan oleh blade, sehingga kecepatan pesawat atau kapal dapat berubah tanpa mengubah kecepatan putar propeler. Pada turbin angin pengaturan sudut pitch dilakukan untuk menyesuaikan ekstraksi daya yang dihasilkan terhadap kecepatan angin yang berfluktuasi. Pada kondisi *emergency*

shutdown atau kondisi badai, sudut pitch diatur secara paralel terhadap arah angin agar turbin angin tidak berputar melebihi ambang batas.

Desain turbin angin harus mempertimbangkan panjang *chord*. Bagian pangkal blade adalah merupakan bagian dari blade yang memiliki kemampuan menangkap energi angin bernilai kecil dan pada bagian ujung blade merupakan daerah yang memiliki kemampuan menangkap energi angin bernilai besar. Pada daerah ujung blade akan menghasilkan torsi yang bernilai besar. Dengan membangun geometris blade yang bagian pangkalnya lebih lebar dibanding pada bagian ujung, maka turbin angin akan memiliki kemampuan berputar lebih mudah ketika kecepatan angin masih rendah. Oleh karena bagian ujung blade merupakan daerah penghasil torsi terbesar, maka dimensi *chord* harus tetap diperhitungkan dengan cermat. Jenis Blade dengan panjang chord yang semakin kecil pada bagian ujungnya (*taper*) akan memberikan beberapa keuntungan meliputi: Efisiensi turbin angin dapat meningkat, ketahanan terhadap tegangan dan fatigue meningkat akibat beban lengkung terbesar berada pada bagian pangkal blade maka pangkal blade yang lebar memiliki kekuatan lebih untuk menahan beban mekanik dan ukuran pangkal blade yang lebar memicu dalam menghasilkan torsi awal putaran yang besar. Penjelasan posisi sudut pitch blade diilustrasikan Gambar 2.6. Batasan nilai konstanta “Betz” pada chord didekati dengan persamaan 2.1.



Gambar 2.6. Posisi sudut pitch blade [15]

$$C = \frac{16\pi R(R/r)}{9\lambda^2 B} \quad (2.1)$$

C = Panjang chord (m)

R = Radius total rotor (m)

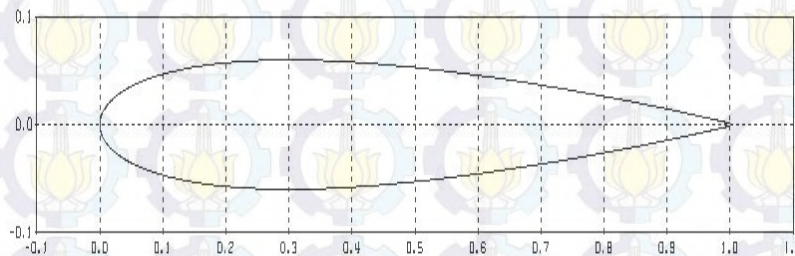
r = Radius pada segmen chord yang dihitung (m)

λ = Tip speed ratio

B = Jumlah blade pada rotor

2.2.3. Blade Turbin Angin Standard NACA

Pembangunan turbin angin skala kecil secara umum menggunakan standard blade NACA. Para perancang umumnya menggunakan bentuk blade yang sederhana, seperti bentuk pelat datar atau blade tipis berstandar *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) seri 4 digit atau 5 digit. Karakteristik blade sangat berpengaruh terhadap produksi torsi turbin angin, maka blade menjadi bagian terpenting dari turbin angin. Blade berpengaruh pada kecepatan putar poros dan efisiensi turbin angin. Blade turbin angin plant-1 yang dipilih dalam pengembangan turbin angin adalah blade dengan kontur airfoil mengikuti standart NACA 0012. Pertimbangan pemilihan tipe blade dengan standar NACA 0012, mempertimbangkan alasan bentuk geometris blade yang bersifat simetris sehingga pembuatannya dapat dikerjakan lebih mudah, lebih teliti dan lebih presisi. Urutan pabrikasi komponen pengembangan SKEA diawali dengan merancang dimensi blade yang berhubungan dengan ladang angin dan produksi daya angin yang diharapkan dapat dihasilkan oleh turbin angin. Dimensi blade yang dibangun memiliki panjang blade 50 cm, panjang *chord* 10 cm dan tebal blade 1,2 cm. Agar blade dapat memiliki sifat kuat untuk menahan stress serta memiliki bobot yang ringan, maka bahan blade yang dipilih adalah bahan fiber glass. Desain kontur airfoil yang dibangun diilustrasikan oleh Gambar 2.7.

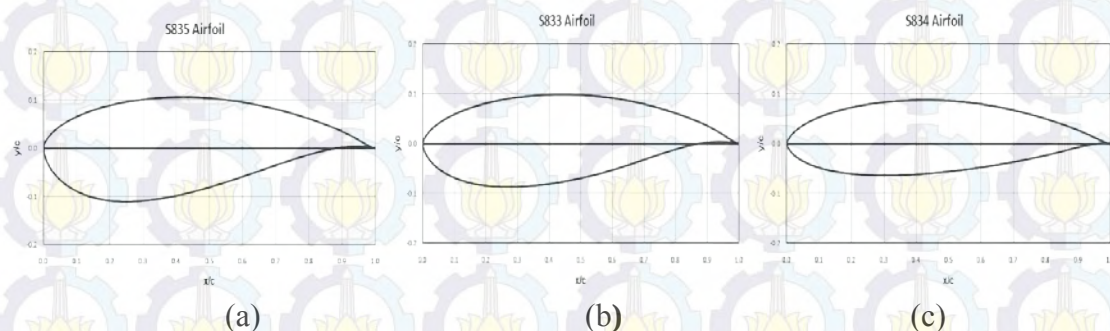


Gambar 2.7. Airfoil Naca 0012 (skala 1:10 cm) [21]

2.2.4.. Airfoil Turbin Angin Standard NREL

Turbin angin plant-2 dibangun menggunakan blade berstandar *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), NREL telah melakukan penelitian dan merilis airfoil yang cocok untuk diterapkan pada turbin angin sumbu horisontal dengan skala kecil hingga besar. Airfoil tersebut diestimasi mampu meningkatkan ekstraksi energi angin sebesar 23% - 33%. Adapun untuk pengaruhan variabel sudut pitch, turbine angin mampu meningkatkan ekstrak tenaga

angin sebesar 8-20 %, untuk pengaturan variable RPM turbine angin 8-10 %. Pada desain turbin angin dengan blade berdiameter rotor 1–3 meter, NREL telah mengeluarkan seri S822 dan S823 yang kemudian digantikan oleh seri S83n (S833, S834, S835). Blade seri S83n merupakan blade tebal yang cocok digunakan untuk turbin angin dengan variabel speed rendah, variabel pitch tipikal airfoil rendah, noise rendah dan koefisien lift tinggi. Berdasarkan spesifikasi tersebut, maka ketiga tipe airfoil digunakan pada turbin angin yang dirancang dengan diameter 2 m yang dilengkapi variabel *pitch angle control*. Bagian pangkal airfoil yang dibangun adalah menggunakan tipe airfoil S835, sedangkan bagian tengah menggunakan tipe S833, dan bagian ujung blade tipe S834. Gambar blade S833 diilustrasikan oleh Gambar 2.8. dan spesifikasi blade NREL S83n ditunjukkan oleh Tabel 2.1.



Gambar 2.8. (a) Penampang blade NREL S835 untuk pangkal blade (b) Penampang blade NREL S833 untuk tengah blade (c) Penampang blade NREL S834 untuk ujung blade.

Tabel 2.1. Spesifikasi desain airfoil NREL S83n

Unit	S833	S834	S835
Blade radia station	0,75	0,95	0,40
Parameter	Objective/ Constraint		
Reynolds numbers,R	$0,4 \times 10^6$	$0,4 \times 10^6$	$0,25 \times 10^6$
Max Lift Coef ($C_{L,max}$)	1,10	1,00	1,20
Lower limit of low-drag, lift coef. $C_{L,ll}$	0,30	0,20	0,40
Upper limit of low-drag, lift coef. $C_{L,ul}$	0,90	0,80	1,00
Zero lift pitching moment coef. $C_{m,0}$	$\geq -0,15$		
Airfoil thickness, t/c	18 %	15 %	21 %

2.2.5. Bahan Blade

Bahan baku blade turbin angin dapat dipilih secara variatif sehingga blade dapat bekerja dengan kelebihan dan kekurangan tertentu. Beberapa pertimbangan yang dilakukan untuk memilih material atau bahan baku blade meliputi: faktor harga, kekuatan, dan massa. Dalam desain turbin angin skala kecil, ketika harus mempertimbangkan faktor harga, maka kayu balsa menjadi pilihan utama, karena harganya relatif murah. Pada pengembangan turbin

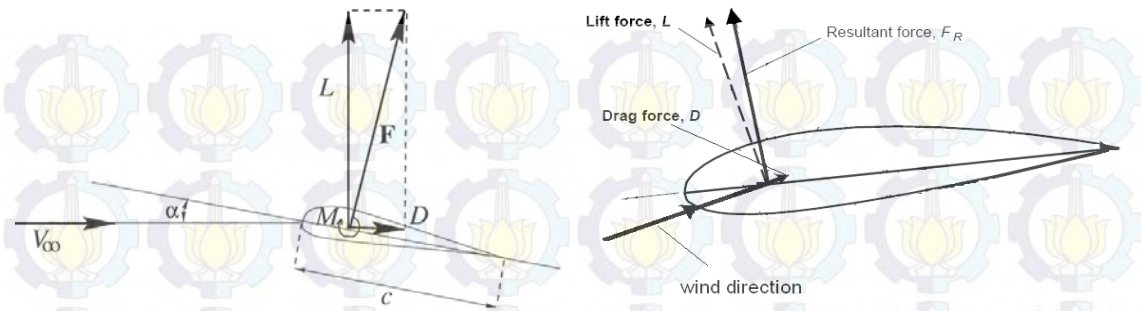
angin skala menengah, dengan harapan turbin angin memiliki kekuatan lebih, maka bahan logam baja atau aluminium menjadi pilihan. Adapun pada pengembangan turbin angin skala besar dan memiliki teknologi tinggi, maka pemilihan blade yang ringan dapat dicapai dengan mengambil bahan komposit serat kaca atau serat karbon menjadi lebih tepat. Berikut ditunjukkan perbandingan berbagai macam bahan blade seperti pada tabel 2.2.

Tabel 2.2. Perbandingan Karakteristik Bahan Blade Turbin Angin

Bahan	Keterangan
Kayu	Murah
	Ringan
	Mudah di fabrikasi dengan alat sederhana
Logam Baja	Mahal
	Berat
Aluminium	Ringan
	Budah dibentuk
Fiber Carbon	Tidak tahan fatigue
	Sangat ringan
	Kuat
	Sangat mahal
	Harus dipabrikasi di pabrik dengan teknologi tinggi
Fiber Glass	Ringan
	Mudah dibuat dengan proses cetak
	Lebih murah dibanding logam dan serat karbon

2.2.6. Prinsip Kerja Turbin Angin

Gambar 2.9. mengilustrasikan bahwa ketika sebuah airfoil terkena angin dari arah depan, maka akan menghasilkan vector gaya lift (L) dan gaya drag (D). Perubahan gaya lift dan gaya drag dipengaruhi secara langsung oleh bentuk geometri blade, kecepatan dan arah angin terhadap garis utama blade. Akibat dari perubahan gaya lift dan gaya drag maka kecepatan sudut dan torsi rotor akan berubah. Sistem kontrol sudut pitch blade adalah salah satu mekanisme kontrol pada turbin angin yang bekerja dengan mengatur aerodinamis blade. Melalui kontrol posisi sudut blade terhadap arah tiupan sudut serang angin ditunjukkan oleh Gambar 2.9. Jika terjadi perubahan sudut blade pada sistem maka akan mempengaruhi kecepatan sudut *shaft*, perubahan jumlah daya angin yang diterima oleh blade akan dikonversi oleh blade menjadi kecepatan sudut *shaft*.



Gambar 2.9. Vektor gaya pada blade dengan sudut serang berbeda [28]

Daya angin yang dapat ditangkap dan diekstrak oleh sistem turbin angin sumbu horisontal dirumuskan sebagai berikut [28].

$$P = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} C_p A_r V_w^3 \quad (2.2)$$

Dari rumus tersebut diketahui bahwa daya angin selain bergantung pada kecepatan angin juga bergantung pada nilai C_p . Semakin besar nilai C_p maka semakin besar pula daya yang dapat diolah oleh turbin angin. Besaran C_p merupakan fungsi dari tip speed rati $[\lambda]$ dan sudut pitch $[\theta]$, sehingga persamaan (2.2) dapat ditulis menjadi [8,45].

$$P = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} C_p(\lambda, \theta) A_r V_w^3 \quad (2.3)$$

Sedangkan λ sendiri dirumuskan sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{\omega}{v} R \quad (2.4)$$

Jika ω adalah konstan sesuai set point yang diinginkan dan R blade adalah konstan, maka C_p hanya akan bergantung terhadap v dan θ . Oleh karena v tidak dapat dikontrol maka θ dijadikan variabel yang dikontrol sebagai kompensasi perubahan kecepatan angin (V) untuk memperoleh daya yang diharapkan. Untuk memperoleh θ yang sesuai dengan kebutuhan, maka dilakukan pengambilan data dengan kecepatan angin (V) tetap (konstan). Hubungan antara daya angin dan kecepatan sudut (RPM) *shaft* ditunjukkan oleh persamaan 2.5. dengan produksi daya berbanding lurus dengan kecepatan sudut rotor blade [28,45].

$$P = \tau_{\text{aero}} \omega \quad (2.5)$$

λ = Tip speed ratio

ω = Kecepatan sudut (rps)

V = Kecepatan angin (m/s)

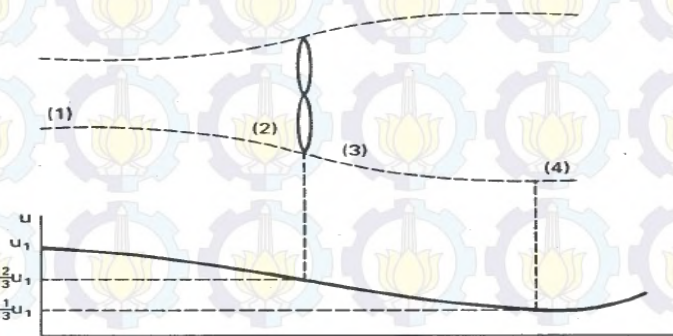
R = Jari-jari rotor blade (m)

Produksi daya angin yang ditangkap oleh sebuah *horizontal axis wind turbine* HAWT dapat diturunkan melalui persamaan energi kinetik angin yang bergerak dengan kecepatan tertentu ke arah sumbu x , persamaan energi untuk udara yang melintas pada turbin angin ditunjukkan oleh persamaan 2.6 dan 2.7.

$$U = \frac{1}{2} m V_w^2 = \frac{1}{2} (\rho_{air} A_r x) V_w^2 \quad (2.6)$$

Daya adalah turunan energi terhadap waktu ;

$$P = \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_r V_w^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_r V_w^3 \quad (2.7)$$



Gambar 2.10. *Tube* angin yang melewati turbin angin

Hubungan kecepatan angin pada *tube* angin yang melintas turbin angin secara ideal:

$$\begin{aligned} V_2 &= V_3 = \frac{2}{3} V_1 \\ V_4 &= \frac{1}{3} V_1 \\ A_2 &= A_3 = \frac{2}{3} A_1 \\ A_4 &= \frac{1}{3} A_1 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Untuk mengetahui seberapa besar daya yang dapat diekstrak oleh turbin angin dapat dilakukan dengan menghitung seberapa besar selisih daya angin sebelum dan sesudah melintas turbin angin tersebut. Gambaran ekstraksi daya angin dapat dijelaskan melalui sebuah contour *tube* yang dilalui angin yang bergerak dengan kecepatan V melintas pada turbin angin. Pada keadaan tersebut kecepatan angin nilainya akan berkurang berbanding lurus dengan jarak blade turbin angin. Demikian pula tekanan angin yang melintas pada turbin akan naik akibat ruang gerak yang tersedia semakin sempit. Pada keadaan ini energi kinetik angin oleh turbin angin diubah menjadi energi rotasional atau daya angin (P_{win}).

Ketika angin melintas sampai pada jarak tertentu pada turbin angin, maka kecepatan angin kembali pada kecepatan awal. Fenomena ini diakibatkan oleh ruang gerak yang melebar. Daya angin yang dapat diekstrak oleh turbin angin sebagai berikut [45].

$$P = P_1 - P_4 = \frac{1}{2} \rho_{air} (A_1 V_1^3 - A_4 V_4^3) = \frac{1}{2} \rho_{air} \left(\frac{8}{9} A_1 V_1^3 \right) \quad (2.9)$$

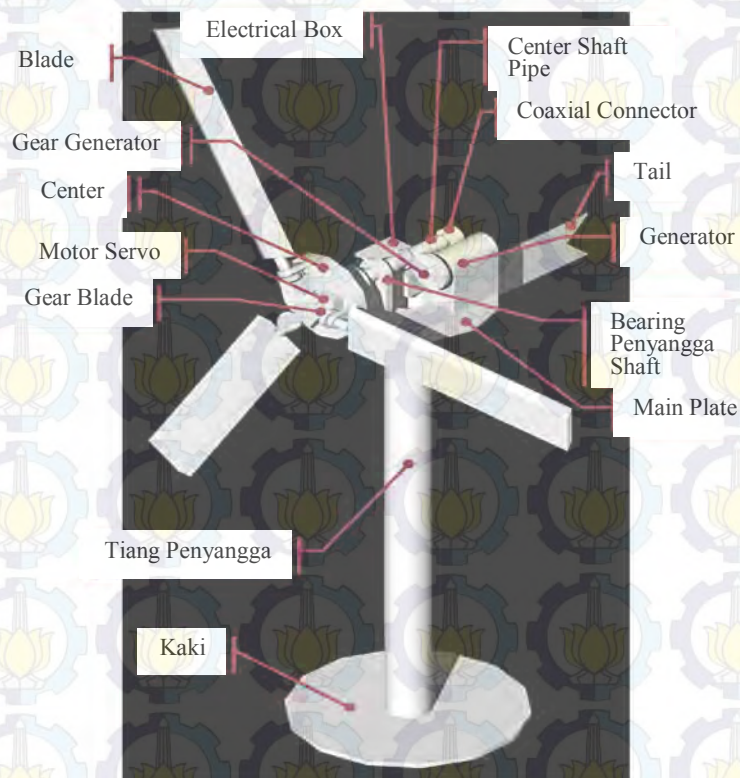
Untuk mempermudah perhitungan, persamaan (2.9) di ubah ke dalam bentuk lain yang menggunakan variabel A2 atau terkait dengan luas area sapuan turbin angin sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho_{air} \left[\frac{8}{9} \left(\frac{2}{3} A_2 V_1^3 \right) \right] = \frac{1}{2} \rho_{air} \left(\frac{16}{27} A_2 V_1^3 \right) \quad (2.10)$$

Pada persamaan 2.10 terdapat konstanta 16/27 atau = 0.593 yang selanjutnya disebut koefisien Betz. Nilai tersebut menyatakan efisiensi maksimum dari sebuah turbin angin atau koefisien power (Cp). Dalam praktek desain turbin angin nilai Cp=59,3 % sulit dicapai.

2.2.7. Prototype Turbin Angin Plant-1 dan Plant-2

Hasil rancang bangun prot otype turbin angin terdiri dari dua unit plant yang selanjutnya disebut plant-1 dan plant-2. Gambar turbin angin tersebut diilustrasikan oleh Gambar 2.11. dan Gambar 2.12.



Gambar 2.11. Desain prototipe turbin angin plant-1



Gambar 2.12. Desain prototipe turbin angin plant-2

2.3. Kontrol Logika Fuzzy

Kontrol logika fuzzy (KLF) [2,9-11] dan Jaring Syaraf Tiruan (JST) [12], telah diteliti untuk mengurangi ketidakpastian sistem kontrol yang dihadapi oleh metode kontrol klasik dan telah dikerjakan oleh *Prats* [10]. Dia telah mengaplikasikan logika fuzzy untuk kontrol ekstrak energi dengan mengakomodasi variabel kecepatan angin maupun variabel plant turbin angin yang lain. Model dinamis sistem telah dikembangkan untuk mengontrol torsi turbin angin dan sudut pitch blade. Terbukti kontrol logika fuzzy mampu menghasilkan kinerja lebih baik dibanding dengan kontrol linier [11]. Pada bagian lain Zhang telah membandingkan penerapan kontrol PID dan KLF pada putaran poros turbin angin dan inverter pada generator turbin angin untuk mengatasi perubahan variabel kecepatan angin secara realtime, KLF mampu menghasilkan keluaran lebih halus dan pengurangan gangguan sistem yang ada dapat diterima.

Skema kontrol adaptif telah dikembangkan untuk menghilangkan beberapa masalah yang dihadapi dalam pengendalian turbin angin, seperti diketahui ketika terdapat model sistem yang bervariasi dengan parameter model turbin angin [13-16]. Lagu dan kawan kawan telah menggunakan model referensi skema kontrol adaptif untuk mengusahakan sebuah turbin angin agar mampu menghasilkan daya yang lebih efisiensi untuk melacak kecepatan rotor yang diinginkan, dilakukan dengan memaksimalkan ekstrak energi dan mengontrol tegangan eksitasi generator. Pengembangan algoritma kontrol adaptif untuk variabel kecepatan angin dan torsi generator turbin angin telah dilakukan. Pendekatan

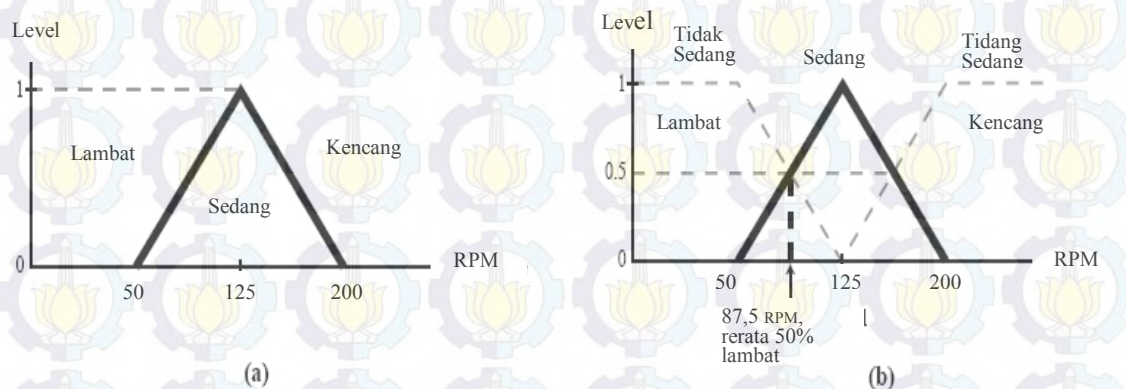
tersebut bertujuan untuk memaksimalkan penangkapan energi angin ketika kecepatan angin rendah sampai menengah [14-15].

Pada penelitian turbin angin ini, dikembangkan strategi kontrol cerdas kontrol logika fuzzy yang digunakan untuk mengatur posisi sudut *blade* dan kecepatan rotasi sistem turbin angin. Penerapan sistem kontrol tersebut bertujuan untuk memaksimalkan penangkap energi oleh turbin angin pada daerah yang memiliki kecepatan angin rendah sampai kecepatan angin menengah dengan penelusuran posisi sudut pitch yang mampu menghasilkan putaran poros turbin dengan kecepatan yang ditetapkan. Oleh karena struktur turbin angin sangat kompleks, maka turbin angin termasuk sistem nonlinier. Dengan mengintegrasikan turbin angin dan sistem kontrol logika fuzzy, diharapkan sistem mampu memaksimalkan penangkapan energi angin yang dilalui tanpa harus mengetahui model sistem secara detail dan mengetahui hubungan divais yang berpengaruh terhadap efisiensi daya turbin angin. Dengan mengembangkan algoritma kontrol logika fuzzy dapat dicapai posisi sudut blade pada plant, maka kinerja turbin angin menjadi optimal, karena kecepatan rotasi turbin angin mampu menangkap energi secara penuh. Dari keadaan tersebut dipastikan bahwa lintasan angin pada blade dapat menghasilkan efisiensi turbin yang tinggi. Ketika terjadi perubahan kecepatan angin pada sistem, maka posisi sudut pitch blade akan berubah, perubahan yang tepat dapat dicapai melalui kegiatan optimisasi yang dikerjakan oleh kontrol logika fuzzy. Pada penelitian ini kontrol logika fuzzy merupakan sebuah strategi kontrol yang diharapkan mampu meningkatkan ekstraksi energi angin dan mampu merespon kecepatan angin sebagai variabel input turbin angin. Daya angin yang dihasilkan ekstrak energi tersebut selanjutnya ditransformasi menjadi energi listrik.

2.3.1. Prinsip Dasar Logika Fuzzy

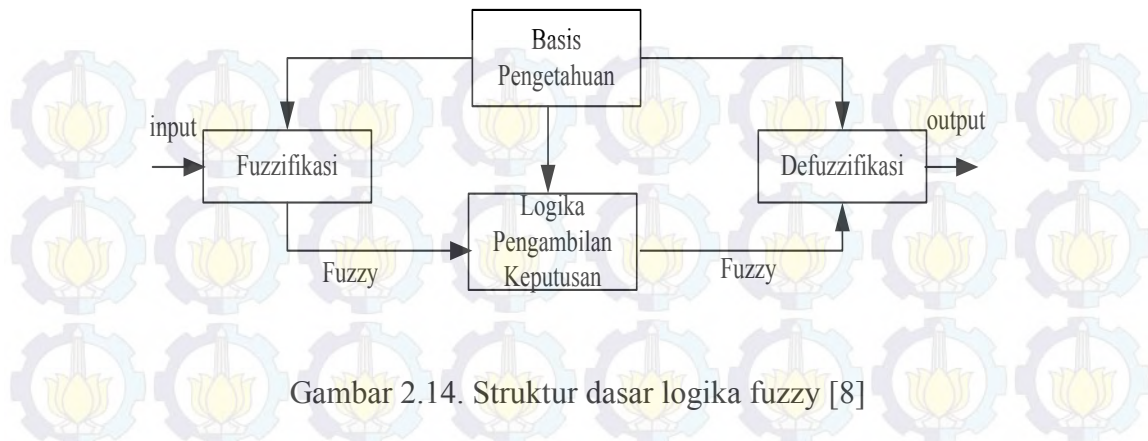
Logika fuzzy merupakan salah satu cabang *artificial intelligent* yang berhubungan dengan algoritma perasaan yang digunakan untuk menciptakan pola pikir manusia dan penentuan keputusan. Algoritma ini digunakan dalam aplikasi pemrosesan data yang tidak dapat direpresentasikan dalam bentuk biner. Contoh, pernyataan “putaran turbin sedang” dan “daya listrik rendah” bukan pernyataan diskrit. Kedua pernyataan tersebut tidak menggambarkan data konkret tentang daya listrik atau putaran turbin (yakni daya listrik adalah 50 watt dan putaran turbin = 50 RPM). Logika fuzzy menginterpretasikan pernyataan samar seperti ini sehingga memenuhi logika masuk akal. Dalam kasus RPM sedang, logika fuzzy memiliki kemampuan yang dapat menginterpretasikan dua hal, yakni level kecepatan dan hubungannya dengan kecepatan untuk memastikan bahwa “sedang” berarti suatu

keadaan di antara cepat dan lambat. Dalam barisan bilangan biner, cepat akan bernilai suatu nilai biner (cepat adalah logika 1) dan lambat bernilai yang lain (logika 0). Inilah yang menyebabkan tidak ada nilai yang dapat menginterpretasikan “sedang” pada formulasi logika biner, logika fuzzy dapat dikatakan logika abu-abu (*gray logic*) yang menciptakan sebuah jalan untuk menyatakan satu nilai “diantara” nilai-nilai data. Logika fuzzy menghubungkan sebuah level atau strata dengan *range* data, memberikan sebuah nilai satu pada titik maksimum dan nilai nol pada titik minimum. [2,6,8,18,20]. Level strata data pada logika fuzzy diilustrasikan Gambar 2.11.



Gambar 2.13. Level strata data pada logika fuzzy, (a) *Range* putaran blade, (b) Garis putus range putaran tidak sedang [20]

Gambar 2.13.a mengilustrasikan sebuah representasi dari logika fuzzy dari *range* putaran turbin “sedang”, dimana 125 RPM mengindikasikan “putaran turbin rerata mantap” (yakni. strata RPM bernilai 1). Semua putaran lebih dari 200 RPM dinilai cepat dan semua putaran dibawah 50 RPM dinilai lambat. Ini berakibat bahwa putaran diatas 200 RPM dan dibawah 50 RPM mempunyai strata kecepatan putar bernilai 0, berarti tidak sedang sama sekali. Gambar.2.13.b menunjukkan representasi lain dari *range* kecepatan sudut, di mana garis putus-putus menunjukkan bahwa putaran kencang dan lambat berarti tidak sedang. Pada putaran 125 RPM, algoritma logika fuzzy menilai bahwa putaran turbin tersebut adalah 50% sedang dan 50% lambat, mengindikasikan sebuah level kecepatan rotasi sedang. Dibawah 50 RPM, logika fuzzy menilai putaran adalah lambat [2,20]. Struktur dasar logika fuzzy dapat digambarkan dalam skema seperti ditunjukkan Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Struktur dasar logika fuzzy [8]

Fungsi dari bagian-bagian di atas dijelaskan sebagai berikut:

- Fuzzifikasi berfungsi untuk mentransformasi sinyal masukan yang bersifat *crisp* (bukan fuzzy) ke himpunan fuzzy dengan menggunakan operator fuzzifikasi.
- Basis pengetahuan berisi basis data dan aturan dasar yang mendefinisikan himpunan fuzzy atas daerah – daerah masukan dan keluaran yang disusun dalam perangkat aturan kontrol.
- Logika pengambilan keputusan merupakan inti dari logika fuzzy yang mempunyai kemampuan seperti manusia dalam mengambil keputusan. Aksi pengaturan fuzzy disimpulkan dengan menggunakan implikasi fuzzy dan mekanisme inferensi fuzzy.
- Defuzzifikasi berfungsi untuk mentransformasi kesimpulan tentang aksi atur yang bersifat fuzzy menjadi sinyal sebenarnya yang bersifat *crisp* dengan menggunakan operator defuzzifikasi.

2.3.2. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan suatu proses yang mengubah variabel *non-fuzzy* (*crisp*) ke dalam variabel fuzzy, variabel input (*crisp*) dipetakan ke bentuk himpunan fuzzy sesuai dengan variasi semesta pembicaraan input. Pemetaan titik-titik numerik atau *crisp points*, $x = (x^1, x^2, \dots, x^n)^T \in U$ ke himpunan fuzzy A pada semesta pembicaraan U . Data yang telah dipetakan selanjutnya dikonversi ke dalam bentuk *linguistik* yang sesuai dengan label dari himpunan fuzzy yang telah terdefinisi untuk variabel input sistem [2,8]. Pada pemetaan tersebut terdapat dua kemungkinan pemetaan yaitu :

- Fuzzifikasi *singleto* adalah fuzzy *singleton* dengan support x sebagai berikut :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{untuk } x = x_o \\ 0 & \text{untuk } x \in U \text{ yang lain} \end{cases} \quad (2.11)$$

- b) Fuzzifikasi *nonsingleton*: $\mu_A(x) = 1$ dan $\mu_A(x')$ menurun dari 1 sebagaimana x' bergerak menjauh dari x . sebagai berikut:

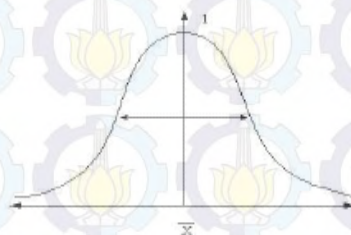
$$\mu_A(x) = \exp\left(-\frac{(x'-x)^T(x'-x)}{\sigma^2}\right) \quad (2.12)$$

Fuzzifikasi memiliki komponen utama yaitu fungsi keanggotaan himpunan fuzzy. Fungsi keanggotaan merupakan sebuah kurva yang menggambarkan pemetaan dari input ke derajat keanggotaan antara 0 dan 1. Melalui fungsi keanggotaan yang telah disusun maka nilai-nilai dari masukan tersebut menjadi informasi fuzzy yang nantinya berguna untuk proses pengolahan secara fuzzy pula. Banyaknya jumlah fungsi keanggotaan dalam fuzzy *set* menentukan banyaknya aturan yang harus dibuat [2,8]. Fungsi keanggotaan dalam himpunan fuzzy mempunyai bentuk yang berbeda-beda pula yang terdiri dari: fungsi *Gaussian* (2.13), fungsi segitiga (2.14) dan fungsi trapesium (2.15). yang diilustrasikan oleh Gambar (2.13-2.15).

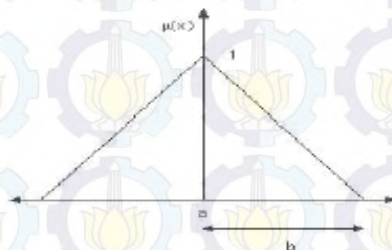
$$\mu_A(u) = \exp\left[-\frac{(u-x)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.13)$$

$$\mu_A(u) = 1 - \frac{\sqrt{(u-a)^2}}{b} \quad (2.14)$$

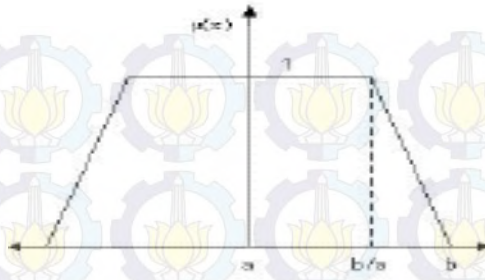
$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1 & \dots\dots\dots; 0 \geq (u-a) \leq \frac{b}{a} \\ 2 - 2\frac{\sqrt{(u-a)^2}}{b} & \dots\dots; \frac{b}{2} \leq (u-a) \leq b \end{cases} \quad (2.15)$$



Gambar 2.15. Bentuk fungsi keanggotaan Gaussian [2,8]

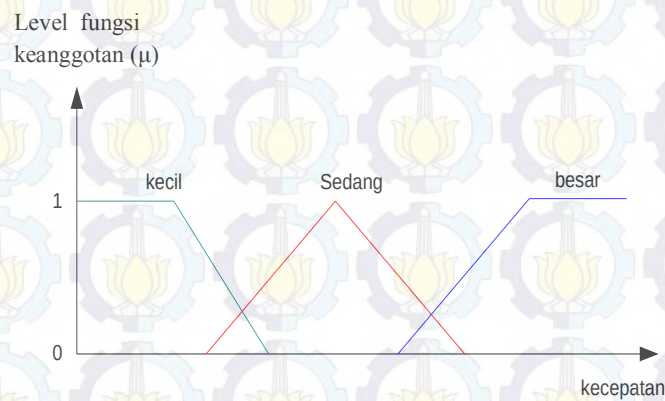


Gambar 2.16. Bentuk fungsi keanggotaan Segitiga [2,8]



Gambar 2.17. Bentuk fungsi keanggotaan trapesium [8]

Fuzzy *set* memiliki beberapa fungsi keanggotaan, jumlah dari fungsi keanggotaan disesuaikan dengan banyaknya kebutuhan. Pada setiap fungsi keanggotaan yang dapat didefinisikan dengan memberi label atau nama anggota yang dapat dinyatakan dengan besar, sedang dan kecil atau sesuai dengan keinginan [2,8].



Gambar 2.18. Input fuzzy dengan 3 fungsi keanggotaan [8]

2.3.3. Basis Aturan Logika Fuzzy

Basis data dan kaidah aturan merupakan bagian mendasar dari logika fuzzy dan merupakan bagian pengetahuan yang memuat informasi tentang objek, peristiwa, atau situasi. Fakta menyatakan kondisi statik dari suatu objek. Sedangkan kaidah (*rule base*) berisi informasi tentang cara membangkitkan fakta baru atau hipotesis fakta yang sudah ada [8].

a) Basis Data (*Data Base*).

Basis data berfungsi untuk mendefinisikan himpunan-himpunan fuzzy dari sinyal masukan dan sinyal keluaran agar dapat digunakan oleh variabel linguistik dalam basis aturan. Dalam pendefinisian tersebut biasanya dilakukan secara subjektif dengan menggunakan pendekatan heuristik dan didasarkan pada pengalaman dan pertimbangan yang menyangkut kerekayasaan, sehingga bergantung penuh pada perancang.

b) Kaidah Aturan (*Rule Base*).

Kaidah atur dalam *fuzzy* ini biasanya tersusun dengan pernyataan :

IF (*antecedent*) THEN (*consequent*) atau dapat juga

IF x is A THEN y is B .

Antecedent : berisi himpunan fakta *input* (sebab).

Consequent : berisi himpunan fakta *output* (akibat).

IF ... THEN ... dalam logika *fuzzy* akan melakukan pemetaan dari himpunan *fuzzy input* himpunan *fuzzy output* [8].

2.3.4. Logika Pengambil Keputusan

Logika pengambilan keputusan disebut juga sebagai *Fuzzy Inference System* (FIS) yang merupakan bagian terpenting dalam logika *fuzzy*. Langkah yang dilakukan pada tahap ini mengevaluasi aturan, Tahap mengevaluasi aturan mempunyai arti bahwa logika *fuzzy* mengolah dan menyimpulkan proses yang tersusun dari rule *IF...THEN*, setiap *rule* menghasilkan satu *output*. Pada dasarnya satu *rule* akan aktif apabila kondisi *input* memenuhi aturan pernyataan *IF*. Pengaktifan aturan pernyataan *IF* menghasilkan *output* kontrol yang didasarkan pada aturan pernyataan *THEN*. Dalam sistem *fuzzy* digunakan banyak *rule* yang menyatakan satu atau lebih pernyataan *IF*. Suatu *rule* dapat pula mempunyai beberapa kondisi *input*, yang satu sama lain dihubungkan dengan *AND* atau *OR* untuk mendapatkan *rule output* [2,8].

2.3.5. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan proses mengubah *output fuzzy* dari FIS (*fuzzy inference system*) menjadi *output crisp*. Bentuk umum proses defuzzifikasi dinyatakan dengan:

$$Z_0 = \text{defuzzier}(z) \quad (2.16)$$

dimana z adalah aksi pengendalian *fuzzy*, Z_0 adalah aksi pengendali *crisp*, dan *defuzzifier* adalah operator defuzzifikasi. Terdapat beberapa macam metode defuzzifikasi yaitu :

a) Metode Titik Pusat (*Center Of Area*, COA).

Metode ini membagi dua momen pertama fungsi keanggotaan, dan harga v_0 yang menandai garis pembagi adalah harga V yang ter-defuzzifikasi. Secara algoritmik dinyatakan dengan [2,8].

$$v_0 = \frac{\int v \mu_v(v) dv}{\int \mu_v(v) dv} \quad (2.17)$$

Sedangkan dalam semesta diskrit dapat dinyatakan:

$$v_0 = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_v(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_v(v_k)} \quad (2.18)$$

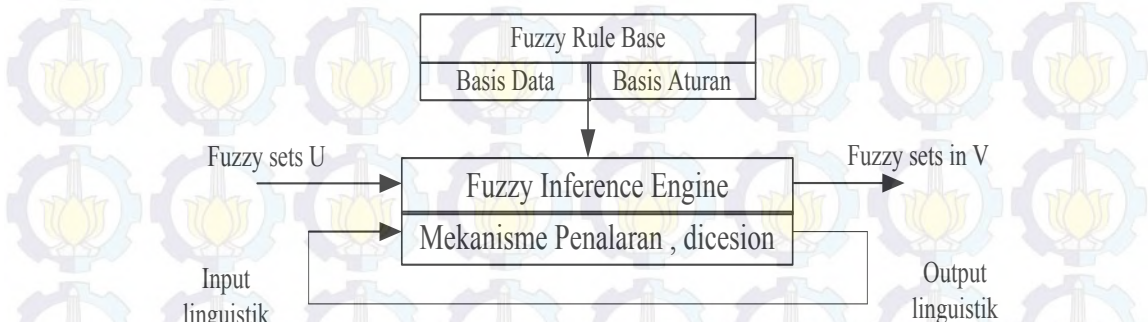
b) Metode Rata-rata Maksimum (Miadle Of Maximum, MOM).

Merupakan metode defuzzifikasi yang merepresentasikan nilai tengah dari keluaran yang fungsi keanggotannya maximum. Fungsi tersebut ditunjukkan sebagai berikut:

$$Z_o = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{l} \quad (2.19)$$

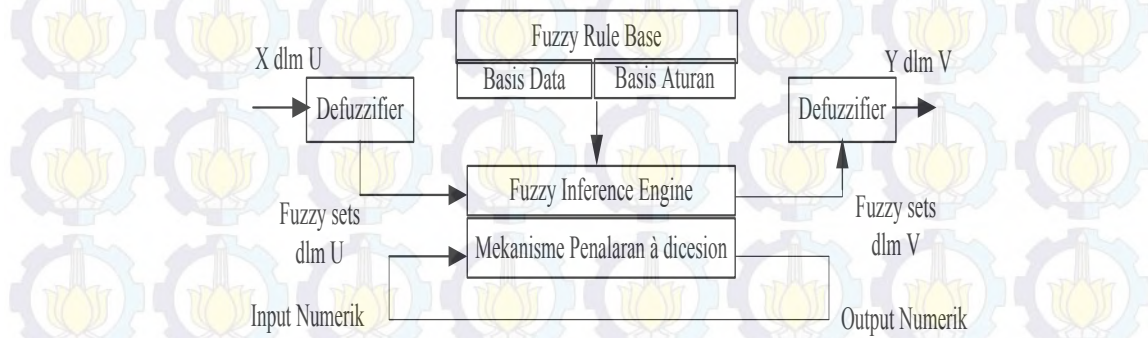
Z_i adalah nilai pendukung dengan fungsi keanggotaan bernilai *maximum* dan l adalah menyatakan banyaknya nilai pendukung [8]. Perkembangan logika *fuzzy* sampai saat ini memiliki beberapa jenis antara lain :

Logika *fuzzy Murni* merupakan logika *fuzzy input*-nya berupa *linguistik* dan *output*-nya *linguistik* pula. Kaidah *fuzzy* tersebut adalah : *If Input x_1 is F_1 and Input x_2 is F_2 , then Output y is G* yang dijelaskan oleh Gambar 2.19.



Gambar 2.19. Struktur *fuzzy Murni* [2,8]

Logika fuzzy *Mamdani* merupakan logika fuzzy *input*-nya berupa numerik dan *output*-nya berupa numerik pula, struktur logika fuzzy tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.20.



Gambar 2.20. Struktur fuzzy *Mamdani* [2,8]

Logika Fuzzy *Takagi-Sugeno* merupakan logika fuzzy dimana *input*-nya berupa linguistik dan *output*-nya berupa numerik. Kaidah fuzzy dari *type* ini dapat dinyatakan:

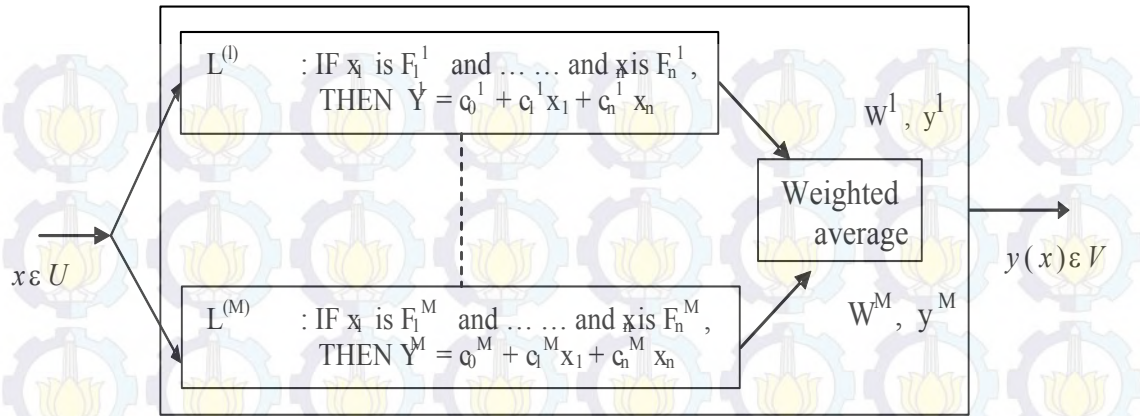
$$L^{(l)} : \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l, \text{ THEN } Y^l = c_0^l + c_1^l x_1 + c_n^l x_n \quad (2.20)$$

Dimana F_1^l adalah *set fuzzy*, c_1 adalah parameter berharga riil, y^l keluaran sistem oleh kaidah $L^{(l)}$ dimana $l = 1, 2, \dots, M$ adalah jumlah kaidah fuzzy. Dari kaidah tersebut dapat dilihat bahwa, bagian **IF** berupa *set fuzzy*, sedangkan pada bagian **THEN** adalah bernilai *crisp*, berupa kombinasi linier dari variabel masukan. Masukan *vector* berharga riil $\underline{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$, dan keluarannya adalah $y(\underline{x})$ yang bernilai sesuai dengan bobot rata-rata y^l sebagai berikut [2,8].

$$y(\underline{x}) = \frac{\sum_{l=1}^M w^l y^l}{\sum_{l=1}^M w^l} \quad (2.21)$$

Sedangkan rumus faktor bobot w^l diformulasikan :

$$w^l = \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \quad (2.22)$$



Gambar 2.21. Struktur fuzzy Takagi-Sugeno [2,8]

Fuzzy rule-based model yang cocok untuk memperkirakan suatu sistem nonlinear adalah diperkenalkan oleh Takagi dan Sugeno sejak tahun 1985. Model fuzzy yang dikemukakan, digambarkan dengan aturan 'if-then' fuzzy yang mewakili hubungan linear *input-output* dari sistem nonlinear. Keseluruhan model fuzzy dari sistem diperoleh dengan memadupadankan model linear sistem. Model fuzzy Takagi-Sugeno (T-S) untuk sistem kontinu yang dijabarkan dalam bentuk sekumpulan aturan 'if-then' fuzzy, dinyatakan sebagai berikut [2,7].

Aturan model ke-*i* adalah :

IF $\zeta I(t)$ adalah M_{i1} dan ... $\zeta p(t)$ adalah M_{ip} , maka,

$$\dot{X}(t) = A_i X_i(t) + B_i U(t)$$

$$y(t) = C_i X_i(t) \quad i=1,2, \dots, r \quad (2.23)$$

M_{ip} adalah subset fuzzy dan r adalah jumlah aturan model fuzzy, $x(t) \in R^n$ adalah vektor keadaan (state vector), $u(t) \in R^n$ adalah vektor *input*, $y(t) \in R^q$ adalah vektor *output*, $A_i \in R^{n \times m}$, $B_i \in R^{n \times m}$, $C_i \in R^{n \times m}$. Sementara $\zeta(t) = [I(t), \zeta p(t)]$ adalah premis variabel vektor, yang dapat berupa fungsi dari variabel keadaan, gangguan eksternal atau fungsi waktu [2,7,8].

Untuk mendesain pengendali fuzzy, diperlukan model fuzzy T-S dari sistem nonlinear. Secara umum ada dua pendekatan dalam membentuk model fuzzy sistem yakni: identifikasi model fuzzy menggunakan *input-output* data dan penurunan model dari persamaan sistem nonlinear yang ada. Pemodelan fuzzy menggunakan data *input-output* secara garis besar terdiri atas identifikasi struktur fuzzy clustering, dan estimasi parameter [2,7,8]. Pendekatan menggunakan metode identifikasi cocok diterapkan pada sistem yang tidak dapat atau terlalu sulit dijabarkan dalam model analitis dan/atau model fisis. Dalam kasus seperti sistem mekanis dimana model dinamis nonlinear sistem dapat ditentukan dengan metode seperti

Lagrange atau Newton-Euler, pendekatan dilakukan dengan menurunkan model fuzzy dari persamaan nonlinear dinamis lebih tepat digunakan. Metode ini menggunakan pendekatan ‘sektor nonlinearitas’ atau ‘penaksiran lokal’ atau kombinasi keduanya [2,7,8].

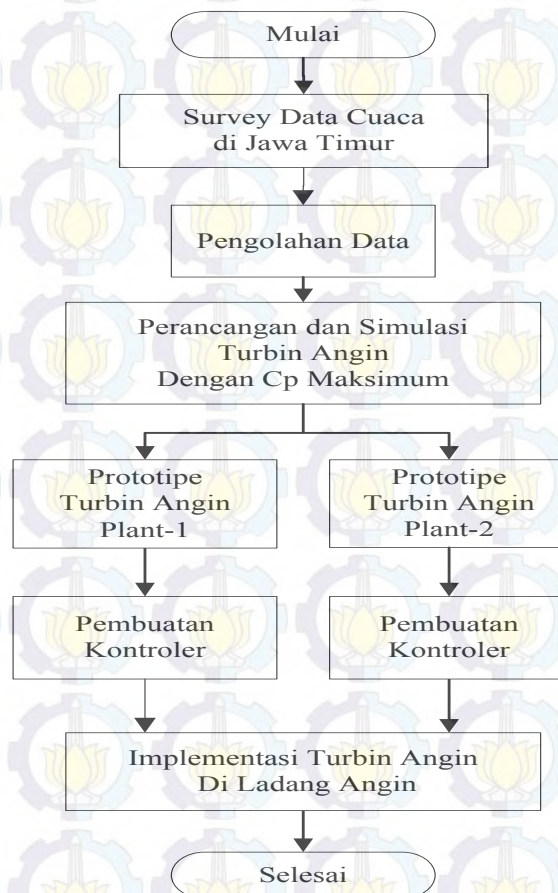
2.3.6. Kontrol Logika Fuzzy (KLF)

Pada sistem kontrol logika fuzzy diilustrasikan operasi KLF yang dinyatakan bahwa input dari sistem fuzzy adalah output dari proses selanjutnya diinputkan pada sistem melalui interface. Sebagai contoh dalam sebuah aplikasi kontrol kecepatan sudut (RPM), data input dapat dimasukkan ke dalam kontroler fuzzy menggunakan sebuah modul input analog. Informasi input ini selanjutnya diteruskan melalui proses logika fuzzy. Prosesor akan membandingkan input tersebut dengan sebuah rule base untuk mendapatkan sebuah output. Pemrosesan logika fuzzy dalam melakukan eksekusi mengikuti aturan IF...THEN yang berdasarkan dari kondisi input. Sebuah strata dari input diklasifikasikan seberapa cocok dengan grafik setting data tertentu. Akibatnya, jika sebuah sistem logika fuzzy menggunakan input analog yang mempunyai range angka dari 0 s ampai 4095, maka grafik akan merepresentasikan setting input yang akan mencakup jangkauan dari 0 sampai 4095 [2,8,20]. Output dari sistem kontrol fuzzy juga didefinisikan dengan strata dimana strata tersebut menentukan nilai output yang tepat untuk element kontrol. Seperti telah disebutkan pada sub-bab pendekatan sistem, fuzzy klasik secara kasus didefinisikan sebagai sistem fuzzy dengan basis aturan jika-maka dengan fungsi keanggotaan segitiga. Penerapannya fungsi keanggotaan, data dikelompokkan secara linier. Sebagai contoh yang terkait dengan problem diatas pemisalan pengelompokan keadaan yang menyatakan putaran turbin angin. Pernyataan 50 RPM adalah pernyataan putaran sangat rendah, putaran 100-150 RPM pernyataan sedang dan putaran 150-200 RPM pernyataan putaran sangat cepat [2,8,20].

BAB III

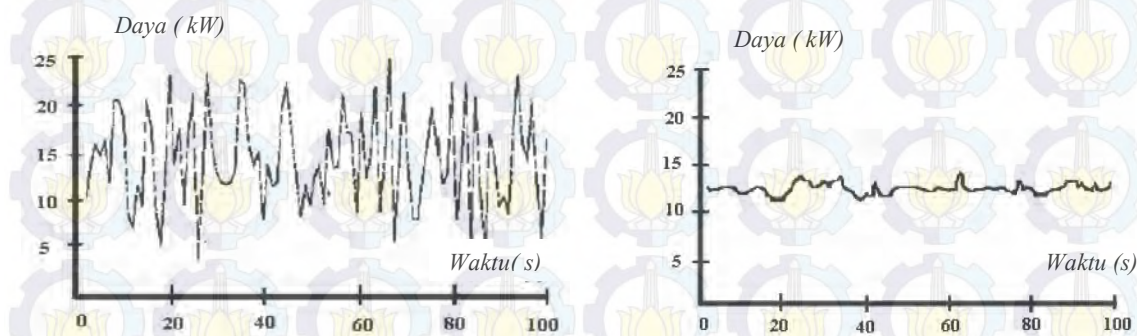
DESAIN SISTEM

Disain sistem yang dimaksud pada penelitian, melakukan rancang bangun prototipe turbin angin yang diinstalasi di ladang angin Jawa Timur. Ladang angin memiliki range kecepatan angin tertentu 0-10 m/s. Agar turbin angin mampu memproduksi daya maksimum, maka turbin angin dilengkapi sistem kontrol yang tergolong kontrol cerdas, yakni kontrol logika fuzzy. Untuk pengembangan sistem kontrol tersebut, diperlukan parameter kecepatan angin untuk melengkapi desain turbin angin yang mencakup posisi sudut pitch blade turbin angin sebagai variabel utama untuk memproduksi daya maksimum. Integrasi turbin angin dengan ladang angin dan sistem kontrol merupakan fokus utama penelitian ini. Penelitian dibagi menjadi beberapa bagian : meliputi peramalan kecepatan dan arah angin (kelompok-1), Simulasi dan implementasi rancang bangun turbin angin (kolompok-2) dan Pengembangan sistem kontrol logika fuzzy (kelompok-3). Integrasi dari ketiga sub-kelompok tersebut ditunjukkan oleh diagram alir Gambar 3.1.



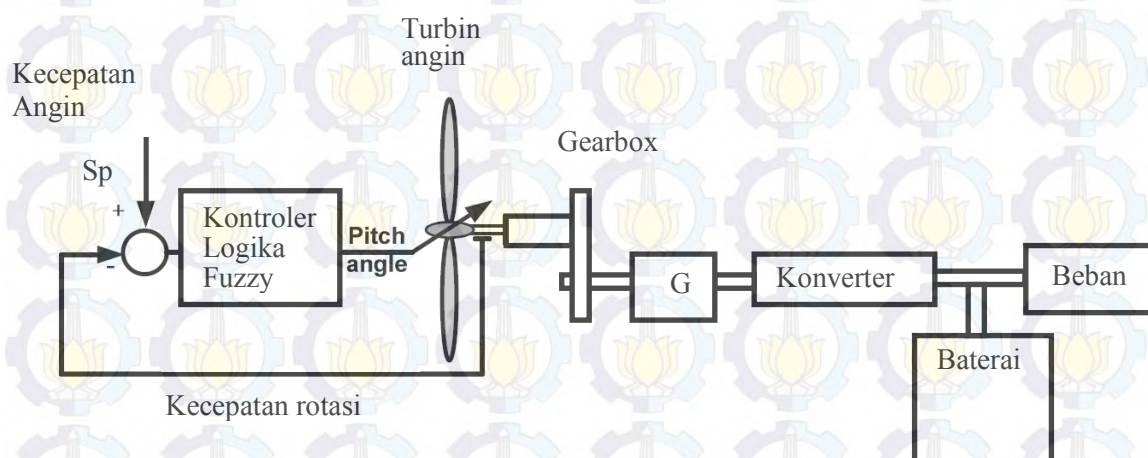
Gambar 3.1. Diagram alir desain penelitian

Gambar 3.2.a. mengilustrasikan produksi daya turbin angin yang dikontrol tetapi memiliki posisi sudut blade tetap, adapun Gambar 2.b. mengilustrasikan produksi daya turbin angin yang menggunakan sistem kontrol posisi sudut blade. Pada penelitian ini diimplementasi kontrol logika fuzzy untuk mengatur posisi sudut pitch blade turbin angin yang mampu menghasilkan nilai koefisien daya (C_p) maksimum dan produksi daya turbin angin (P) dengan osilasi minimum.



Gambar 3.2 (a), Poduksi daya turbin dengan sudut pitch tetap, (b) dengan sudut pitch terkontrol [53].

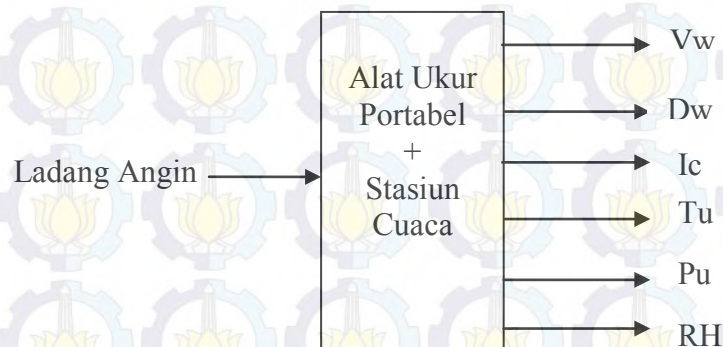
Dengan mengintegrasikan penelitian kelompok-1 dan kelompok-2, maka diperoleh sistem turbin angin dengan skema yang ditunjukkan oleh Gambar 3.3. Adapun integrasi sistem turbin angin dan perancangan kontrol logika fuzzy pada sudut pitch blade turbin angin dibahas secara khusus pada sub-bab 3.6. Perancangan kontroler logika fuzzy yang dibangun pada sistem dititik beratkan pada pengontrolan posisi sudut blade turbin angin. Metoda kontrol logika fuzzy yang dibangun termasuk metode *Mamdani* yang melibatkan proses defuzzifikasi *The Miadle of Maximum method* (MOM).



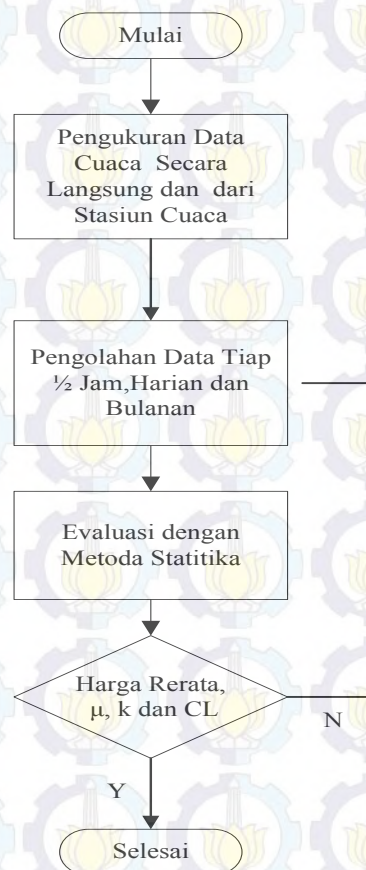
Gambar 3.3. Skema sistem turbin angin

3.1 Metoda Pengukuran Data Cuaca (Kasus I)

Pengukuran data cuaca dilakukan dengan metoda pengukuran langsung pada ladang angin meliputi: Sampang, Nganjuk, Mojokerto, Lamongan, Blitar dan Pasuruhan. Pada bagian lain akusisi data cuaca diakses melalui stasiun cuaca Nganjuk, stasiun Juanda Surabaya dan stasiun cuaca Karangates-Malang. Data cuaca yang diakusisi kecepatan angin (V_w), arah angin (D_w), intensitas cahaya (I_c), temperatur udara (T_u), tekanan udara (P_u) dan kelembaban relatif (RH). Diagram bloka proses pengukuran data diilustrasikan Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Diagram blok sistem pengukuran data cuaca

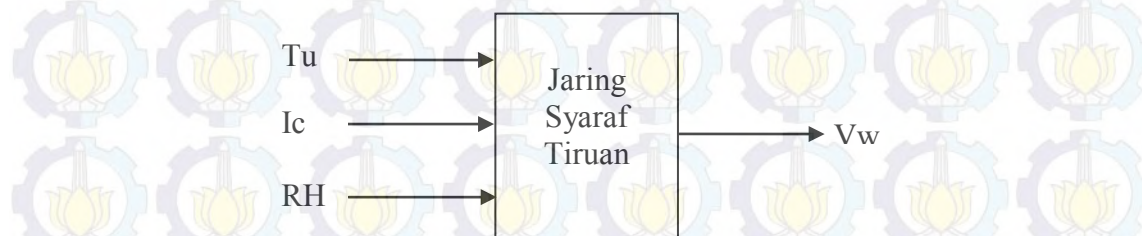


Gambar 3.5. Diagram alir evaluasi data cuaca

Disain pemrosesan data cuaca diilustrasikan oleh diagram alir Gambar 3.5. Pada pemrosesan data dilakukan dengan mengelompokkan data sejenis dalam kelompok data yang memiliki durasi 30 menit, durasi harian dan durasi bulanan. Evaluasi statistika dilakukan untuk menghitung nilai rerata, menghitung nilai ketidakpastian pengukuran, nilai faktor cakupan dan nilai tingkat kepercayaan. Apabila pengolahan data telah memenuhi kriteria nilai ketidakpastian pengukuran yang ditetapkan, maka hasil pengolahan data siap digunakan untuk melengkapi kegiatan rancang bangun turbin angin dan apabila pengolahan data belum memenuhi persyaratan ketidakpastian pengukuran, maka data yang diolah jumlahnya dapat ditambah atau dikurangi, atau dilakukan pengelompokan data lanjutan dengan menambah atau mengurangi durasi pencuplikan data yang diolah.

3.2. Metoda Peramalan Kecepatan Angin (Kasus II)

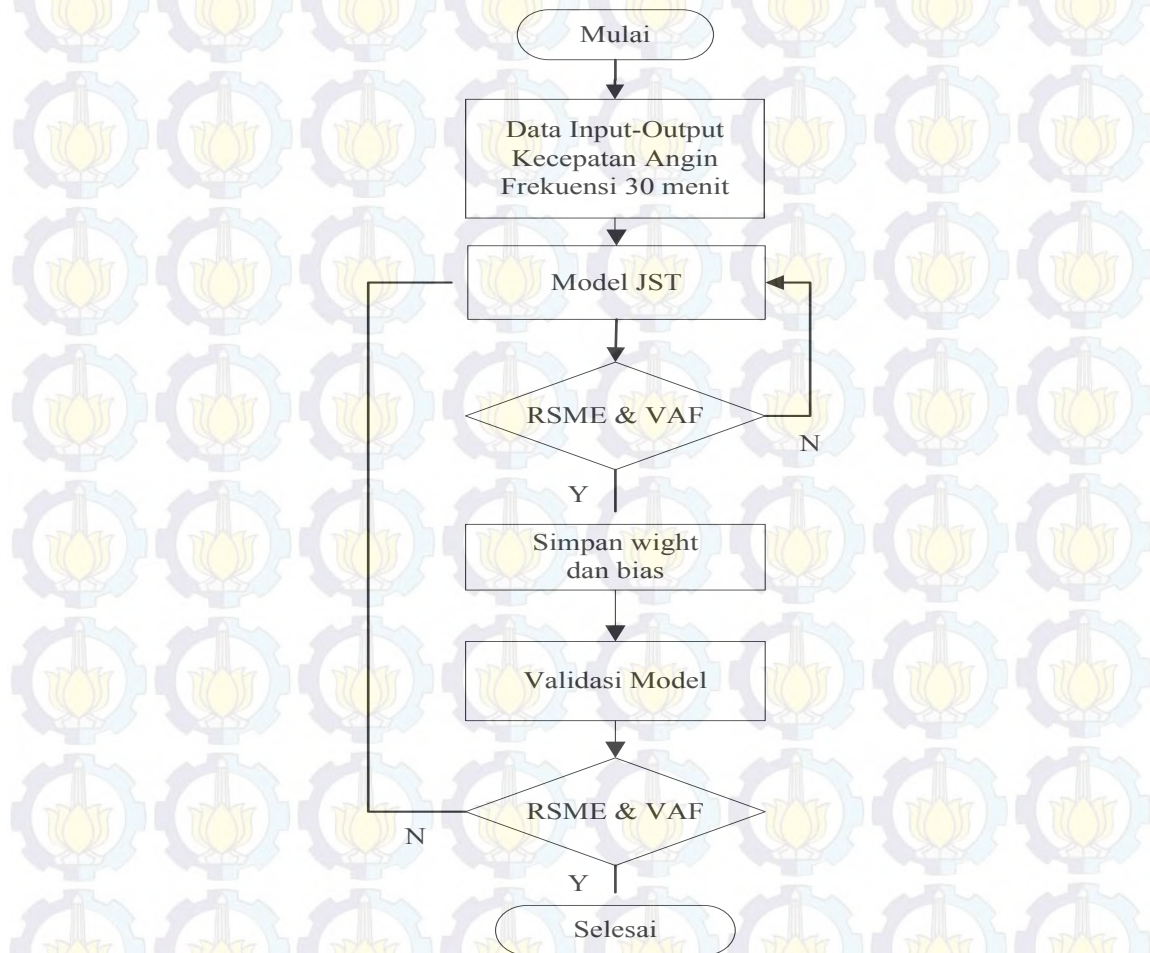
Teknik peramalan pada kasus-2 diperlukan untuk meramal kecepatan angin dalam durasi 30 menit. Data yang digunakan dalam peramalan berasal dari ladang angin Nganjuk. Data cuaca diperoleh melalui cara pengukuran langsung dan dilengkapi dari stasiun cuaca Sawangan-Nganjuk. Data cuaca yang diakusisi meliputi: kecepatan angin (V_w), intensitas cahaya (I_c), temperatur udara (T_u) dan kelembaban relatif (RH). Diagram blok sistem peramalan kecepatan angin dengan model JST diilustrasikan Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Diagram blok sistem peramalan kecepatan angin

Desain teknik peramalan kecepatan angin diilustrasikan diagram alir Gambar 3.7. Teknik peramalan kecepatan angin dalam sistem ini membutuhkan data masukan dan data keluaran untuk membangun model jaring syaraf tiruan (JST). Langkah selanjutnya dilakukan simulasi dengan paket program Matlab. Ketika simulasi telah dikerjakan dan apabila nilai output model telah memenuhi kriteria persyaratan RMSE dan VAF, maka bobot terakhir dari model tersebut disimpan. Sistem dengan bobot tersebut selanjutnya digunakan proses *validasi* model JST. Adapun data yang digunakan pada proses validasi adalah data yang berbeda dengan data pelatihan, Penggunaan data tersebut bertujuan untuk melihat kemampuan model yang telah dibangun. Proses validasi diharapkan mampu menghasilkan

nilai RSME dan VAF yang ditarget, sehingga proses pengujian model JST dapat dilanjutkan. Apabila proses validasi belum memenuhi kriteria RMSE dan VAF, maka Pelatihan model JST perlu diulang kembali, dengan mengubah-ubah parameter sampai menghasilkan bobot terbaik.

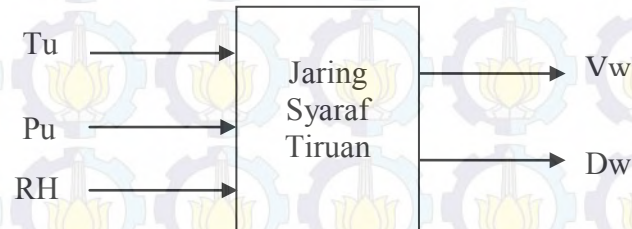


Gambar 3.7. Diagram alir pemodelan JST pada kasus II

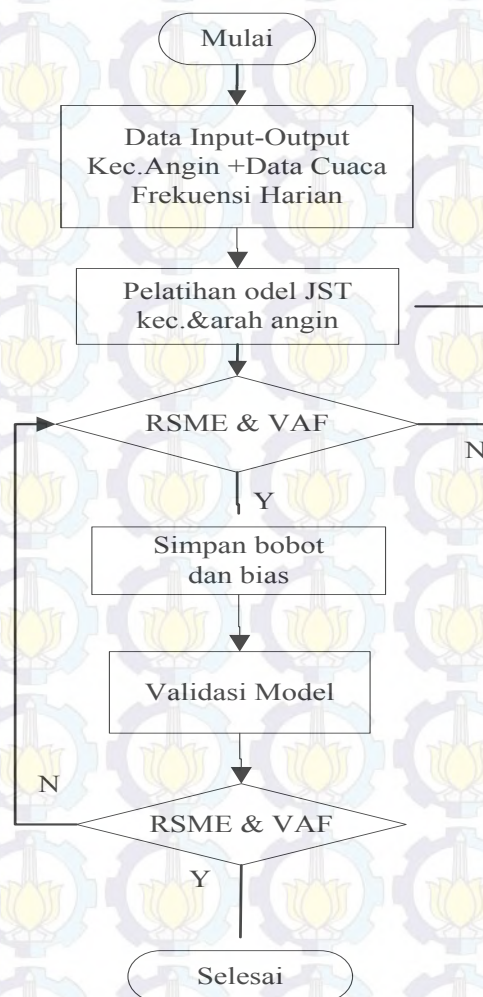
3.3. Metoda Peramalan Kecepatan Angin dan Arah Angin (Kasus III)

Metoda peramalan kecepatan angin dan arah angin dalam durasi peramalan harian menggunakan data yang berasal dari ladang angin Karangates-Malang. Data masukan sistem berupa: suhu udara, tekanan udara dan kelembaban relatif, sedangkan *output* sistem JST berupa kecepatan angin dan arah angin. Untuk pemetaan distribusi kecepatan angin dan arah angin ditampilkan dalam bentuk *windrose*. Metode *training* yang digunakan JST adalah *Levenberg Marquardt*, sehingga ketika pembobot pelatihan JST yang dilakukan telah memenuhi syarat perancangan, maka model JST pelatihan tersebut digunakan untuk proses validasi dan pengujian. Penggunaan *history length* dilakukan dengan cara coba-coba

memasukkan nilai dalam kisaran 1 sampai 10 pada setiap input JST. Cara tersebut juga digunakan untuk menentukan jumlah lapis tersembunyi model JST. Nilai yang dicoba berada dalam range antara 1 sampai 10. Dalam proses pelatihan model, JST diharapkan mampu menghasilkan nilai RMSE terkecil dan nilai VAF terbesar. Diagram blok sistem peramalan kecepatan dan arah angin ditunjukkan oleh Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Diagram blok sistem peramalan kecepatan angin dan arah angin



Gambar 3.9 Diagram alir pemodelan JST pada kasus III

Desain pengembangan JST untuk peramalan ditunjukkan oleh diagram alir Gambar 3.9. Pelatihan model JST dengan masukan data temperatur udara, tekanan udara dan kelembaban relatif dan keluaran berupa kecepatan angin dan arah angin, dapat diperoleh bobot yang mampu menghasilkan keluaran terbaik. Kriteria yang digunakan untuk menilai keluaran adalah RMSE dan VAF. Apabila keluaran model telah memenuhi persyaratan nilai RMSE minimum dan VAF maksimum, maka bobot yang dihasilkan dari proses pelatihan yakni w_{1f} (bobot dari lapisan input ke lapisan tersembunyi) dan w_{2f} (bobot dari lapisan tersembunyi ke lapisan output), *hidden node* dan *history length* selanjutnya disimpan.

3.4. Metoda Simulasi Optimisasi Daya Turbin Angin (Kasus IV)

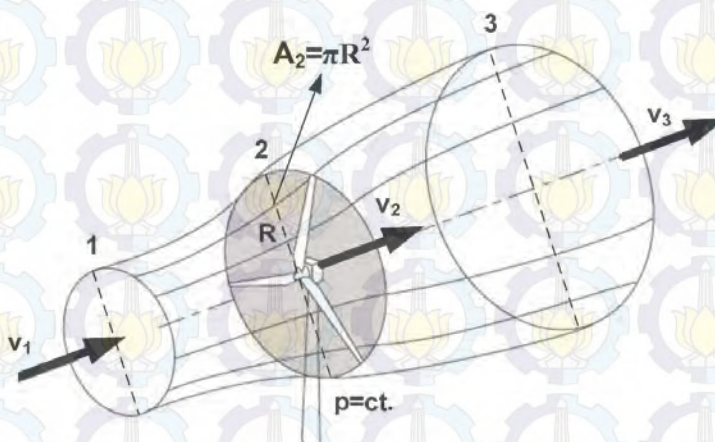
Disain optimisasi parameter turbin angin (C_p) dan (P), dibangun melalui model sistem operasi turbin angin seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.10. Teori Betz menggunakan hipotesis, bahwa fluida yang digunakan dalam percobaan memiliki tekanan udara konstan, dan memiliki kecepatan udara yang ideal, sistem diilustrasikan berada pada sebuah pembatas samar seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.10.

Model Betz digambarkan dengan persamaan sistem sebagai berikut:

$$P = \rho \cdot Q \left[\frac{V_1^2}{2} - \frac{V_3^2}{2} \right]; F = \rho \cdot Q (V_1 - V_3); \rho = ct, \text{ dan } p = ct. \quad (3.1)$$

Pada hipotesis diasumsikan bahwa variasi kecepatan angin pada turbin angin yang berada pada selubung pembatas dianggap linier dan ditulis dengan persamaan sebagai berikut :

$$V_2 = \frac{1}{2} (V_1 + V_3) \quad (3.2)$$



Gambar 3.10. Tabung pembatas untuk model fisik turbin angin Betz

apabila digunakan notasi faktor induksi aliran, a , maka:

$$a = V_2 / V_1 \quad (3.3)$$

persamaan Betz selanjutnya menjadi :

$$P = P_0 \cdot C_p, \quad (3.4)$$

dengan C_p adalah koefisien daya:

$$C_p = 4.a^3 \cdot (1-a), \quad (3.5)$$

dan P_0 merupakan daya angin maksimum ketika sistem dikenai kecepatan angin v_1 .

$$P_0 = \rho \cdot A \cdot V_1^3 / 2 \quad (3.6)$$

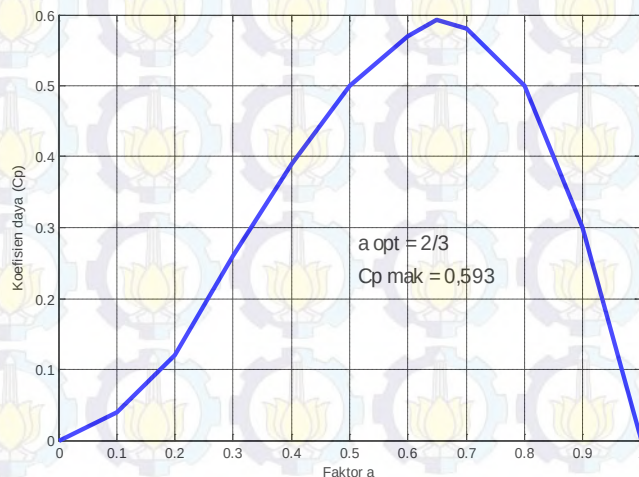
Untuk memperoleh nilai koefisien daya maksimum dilakukan melalui persamaan persamaan (3.5), sehingga diperoleh nilai 'a' optimum sebagai berikut:

$$a_{opt} = 16/27 = 0,593 \quad (3.7)$$

Perubahan koefisien daya yang dihitung melalui persamaan (3.5) selanjutnya diplot dan ditunjukkan oleh Gambar 3.11. Dengan melakukan simulasi menggunakan paket program Matlab, maka diperoleh nilai C_p maksimum = 59.3%, nilai tersebut merupakan nilai energi kinetik angin maksimum yang mampu diekstrak oleh turbin angin untuk sebuah kondisi keluaran kecepatan angin aksial nilainya berharga sepertiga dari nilai kecepatan angin masukan atau $V_3 = 1/3 V_1$

Dengan mengikuti persamaan kontinuitas, maka teori Betz dapat ditulis dalam persamaan :

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 = V_3 \cdot A_3, \quad (3.8)$$



Gambar 3.11. Koefisien daya terhadap faktor induksi aliran [53]

Apabila selubung turbin telah digabung dengan turbin angin, maka turbin angin dapat dianggap memiliki selubung samar. Turbin angin akan memiliki keluaran dalam suatu luasan tiga kali lebih besar dibanding dengan luas masukan. Kondisi ini secara praktis dapat diterima dan inilah yang disebut teori pendekatan Betz. Proses konversi energi angin dapat digambarkan lebih lanjut dengan memperkenalkan konstanta TSR, yang di definisikan sebagai perbandingan tangensial (ωR) dengan kecepatan angin V_1 yang selanjutnya ditulis dalam persamaan (3.9). Turbin angin dapat beroperasi ketika nilai TSR berubah dari nilai batas tepi koefisien daya maksimum (C_p). Dari nilai tersebut, korelasi nilai C_p terhadap nilai tip speed ratio optimum dapat dihitung. Pada keadaan tersebut turbin angin mampu menghasilkan efisiensi daya maksimum.

$$\lambda = \omega R / V_1 \quad (3.9)$$

Metoda optimisasi daya pada turbin angin, terkait dengan variabel kecepatan angin yang berhubungan dengan posisi sudut pitch blade, Turbin angin akan memiliki koefisien daya maksimum yang digambarkan oleh fungsi yang bergantung pada sudut pitch dan tip speed ratio ditunjukkan oleh persamaan 3.10 dan 3.11. Dari referensi [45,53] diketahui nilai-nilai konstanta, $C_1 = 0,5175$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0,4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$, $C_6 = 21$.

$$C_p(\lambda, \theta) = C_1 \cdot (C_2 \lambda_i - C_3 \theta - C_4) e^{-C_5 \lambda_i} + C_6 \cdot \lambda \quad (3.10)$$

dengan:
$$\lambda_i = 1/(\lambda + 0.08 \theta) - 0.0035/\theta^3 + 1 \quad (3.11)$$

Jika posisi sudut pitch blade, θ bervariasi dari $(0-20)^\circ$ maka koefisien daya C_p memiliki evolusi seperti hasil simulasi. Variasi tersebut dapat diperoleh melalui perhitungan numerik melalui persamaan (3.10) dan (3.11).

Desain optimisasi penelusuran posisi sudut pitch blade turbin angin, dilakukan untuk mencari hubungan keluaran daya turbin angin dan kecepatan rotasi dengan variasi kecepatan angin. Karakteristik sistem turbin angin tersebut dicapai melalui simulasi yang menggunakan paket program MATLAB. Hasil simulasi dibahas secara khusus pada sub-bab 4.4.

3.5. Metoda Optimisasi Daya Prototipe Turbin Angin (Kasus V)

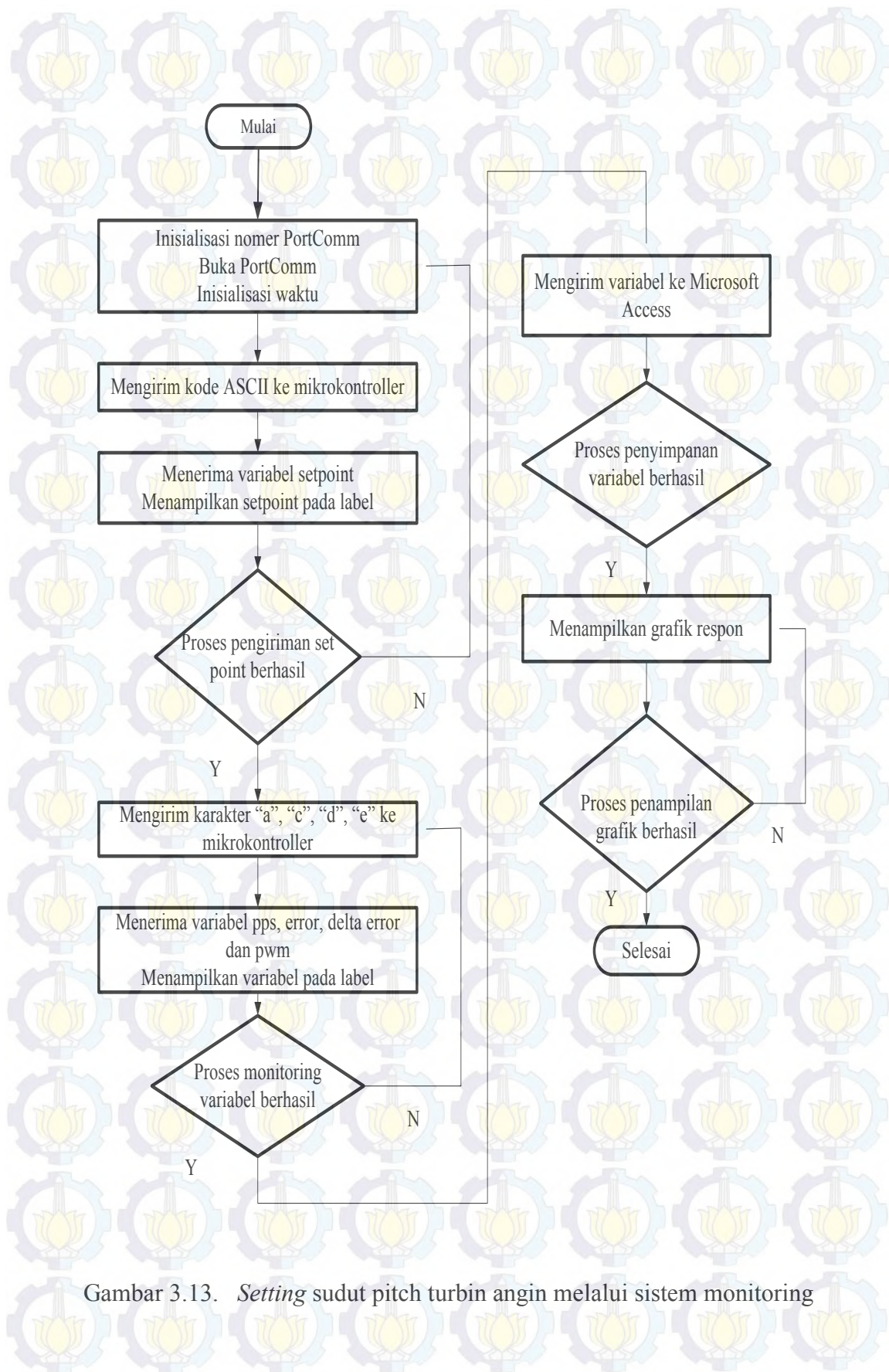
Prototipe turbin angin yang telah dibangun diharapkan mampu menghasilkan daya angin maksimum. Untuk mengetahui kinerja turbin angin dilakukan pengujian di

laboratorium. Dengan meniupkan angin pada turbin angin pada kondisi kecepatan angin variatif dan pada posisi sudut pitch blade variatif, merekam data hasil kegiatan uji yang meliputi: kecepatan angin pada posisi sebelum dan sesudah blade, kecepatan rotasi turbin angin, posisi sudut pitch blade. Tahap selanjutnya mencari hubungan nilai TSR terhadap kecepatan angin pada variasi posisi sudut pitch blade, koefisien daya terhadap kecepatan angin pada variasi sudut pitch blade, dan koefisien daya terhadap TSR pada variasi sudut pitch blade. Kecepatan rotasi turbin angin dihitung melalui pembacaan PPS yang ditunjukkan dalam sistem monitor, dari pembacaan PPS yang diperoleh selanjutnya dikonversi ke nilai rotasi per sekon dilanjutkan ke rotasi per menit (RPM). Berdasar nilai sensor *rotary encoder*, nilai RPS = 1/20 PPS, sehingga nilai RPM= RPSx60. Melalui sistem monitoring yang dirancang sendiri dengan paket program Visual Basic ditunjukkan oleh Gambar 3.12. Diperoleh data percobaan peniupan angin yang dilakukan dengan blower ditunjukkan pada Tabel 3.1. Desain teknik pengujian sistem turbin angin diilustrasikan oleh diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 3.13.

Gambar 3.12 .Sistem monitoring aktivitas turbin angin

Tabel 3. 1. Mode Pengujian Turbin Angin Dengan Kecepatan Angin Variatif

Mode	Kipas 1	Kipas 2	Ducting	Kecepatan Angin
1	High	High	Ya	7,5 m/s
2	Medium	Medium	Tidak	7,0 m/s
3	Low	Low	Ya	6,5 m/s
4	High	High	Ya	4,8 m/s
5	Medium	Medium	Ya	4,1 m/s
6	High	-	Ya	3,1 m/s
7	Low	-	Ya	2,8 m/s



Gambar 3.13. *Setting* sudut pitch turbin angin melalui sistem monitoring

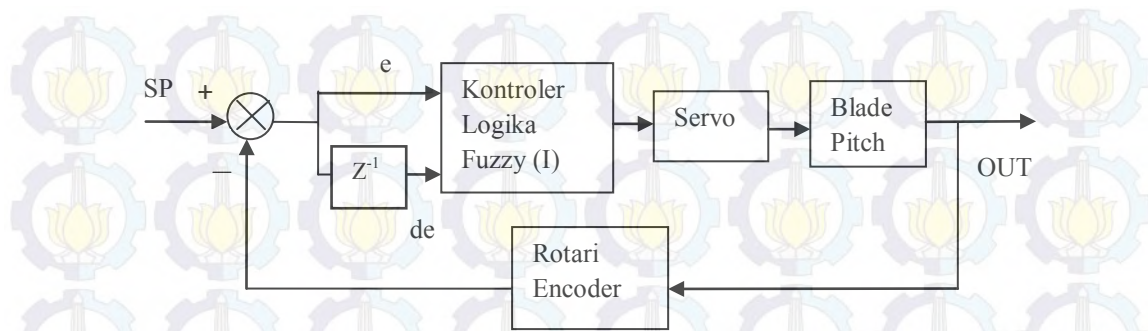
Tabel 3.2. Hasil Percobaan Turbin Angin dengan Variasi Posisi Sudut Blade dan Kecepatan Angin Terhadap Kecepatan Sudut

Sudut Pitch ($^{\circ}$)	Kecepatan Angin						
	7.5 m/s	7.0 m/s	6.5 m/s	4.8 m/s	4.1 m/s	3.1 m/s	2.8 m/s
	ω (RPM)	ω (RPM)	ω (RPM)	ω (RPM)	ω (RPM)	ω (RPM)	ω (RPM)
0	0	0	0	0	0	0	0
5	130	0	0	64	0	55	41
10	168	65	115	64	68	45	34
15	163	111	97	60	56	47	32
20	94	81	70	42	43	37	29
25	103	76	54	40	37	30	22
30	66	54	41	33	32	26	16
35	48	39	30	27	28	18	0
40	40	31	26	21	22	16	0
45	31	25	20	17	19	11	0
50	25	22	17	14	14	0	0
55	23	20	0	11	0	0	0
60	18	12	0	0	0	0	0
65	15	0	0	0	0	0	0
70	12	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0
85	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0

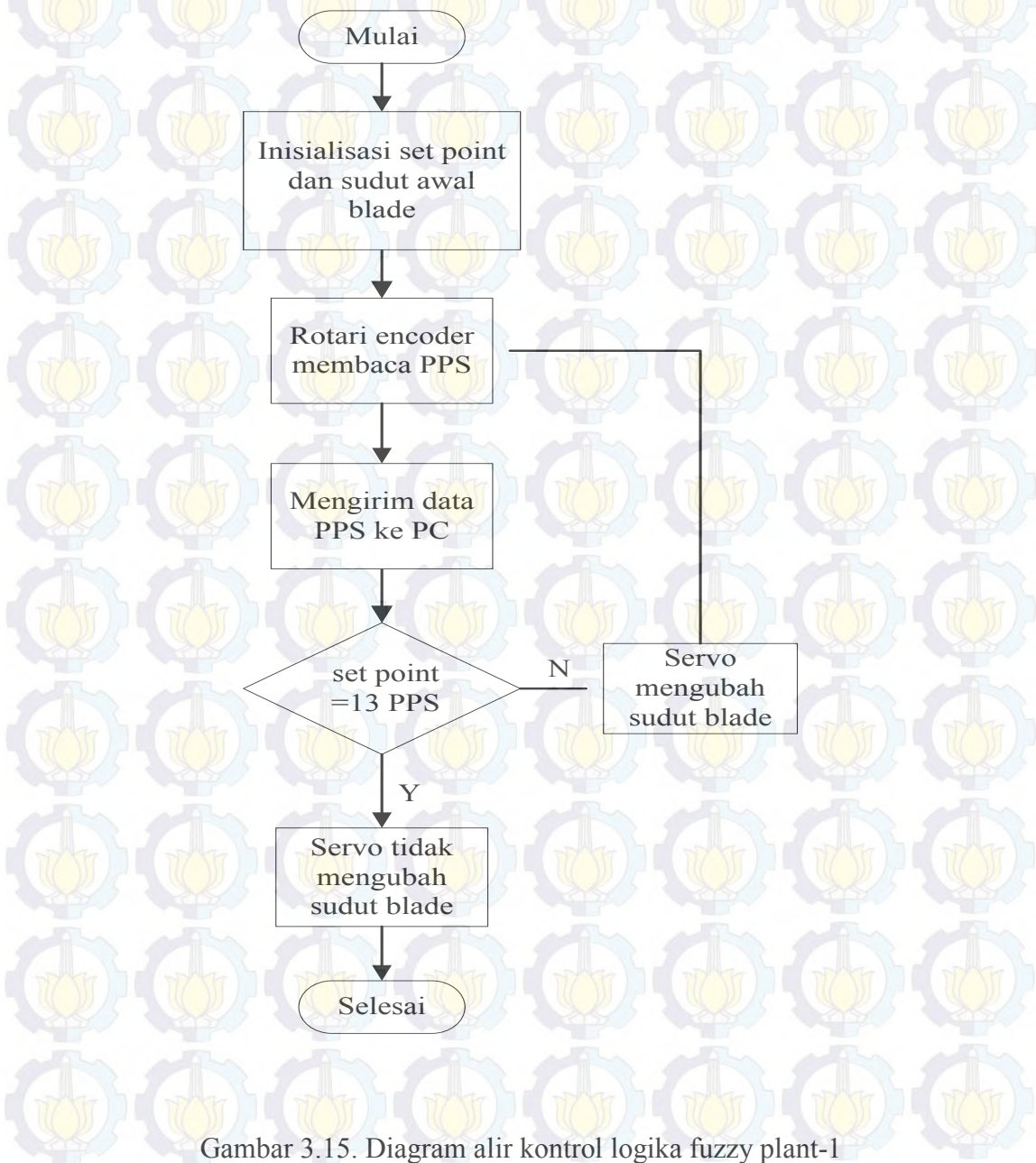
RPM = Rotasi per menit.

3.6. Metoda Pengembangan Kontrol Logika Fuzzy Plant-1 (Kasus VI)

Perancangan kontrol logika fuzzy plant-1a mengacu pada hasil pembacaan sensor *rotary encoder* seperti ditunjukkan oleh diagram blok Gambar 3.14. Angka yang dihasilkan oleh pembacaan sensor, terlebih dahulu dilakukan pembulatan menjadi bilangan bulat terdekat. Sistem turbin angin yang dibangun memiliki range data input 0-22 PPS. Data tersebut selanjutnya diolah untuk menentukan nilai *set point* yang harganya 13 PPS. Data tersebut juga digunakan untuk membangun range fungsi keanggotaan kontrol logika fuzzy dengan input error berharga 0-13 = -13 PPS, nilai tersebut merupakan nilai *error* minimum kontrol logika fuzzy. Adapun nilai PPS yang berasal dari 22-13 = 9 PPS adalah merupakan nilai *error* maksimum. Nilai *error* = 0 merupakan nilai acuan titik tengah kontrol logika fuzzy.

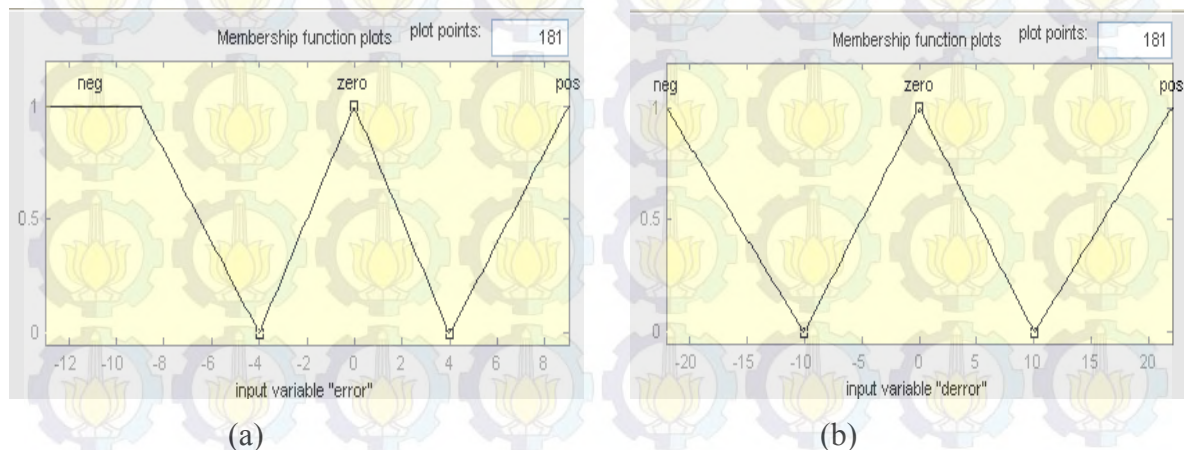


Gambar 3.14. Diagram blok sistem kontrol logika fuzzy plant-1



Gambar 3.15. Diagram alir kontrol logika fuzzy plant-1

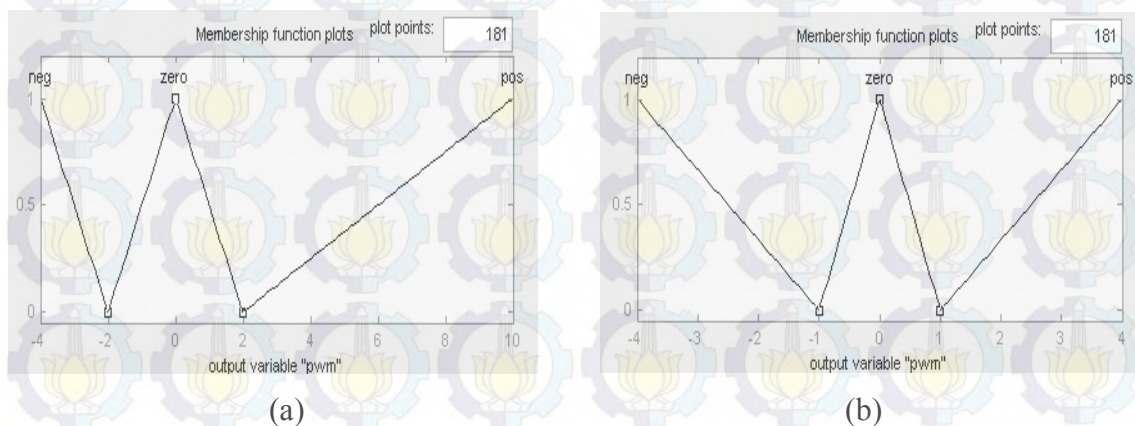
Desain kontrol logika fuzzy yang dibangun pada prototipe turbin angin difokuskan pada pengontrolan kecepatan sudut pitch blade diilustrasikan oleh diagram alir yang ditunjukkan Gambar 3.15. Metode kontrol logika fuzzy yang dibangun menggunakan metode Mamdani yang melibatkan defuzzifikasi *The Midle of Maximum method* (MOM). Sistem kontrol logika fuzzy yang dibangun adalah menggunakan persamaan garis bukan persamaan luas seperti yang ada pada *software* Matlab. Kegiatan ini dilakukan untuk penyederhanaan dan mempermudah penulisan dalam bahasa pemrograman. Nilai fungsi keanggotaan sistem fuzzy dikelompokkan dalam persamaan garis. Input sistem kontrol logika fuzzy adalah kecepatan sudut dan output kontrol logika fuzzy merupakan data yang mewakili sinyal pulsa PPS yang dimodulasi (PWM) untuk merubah posisi sudut pitch *blade*. Dengan terjadinya perubahan posisi sudut pitch blade turbin angin, maka kecepatan sudut pitch blade turbin angin akan berubah.



Gambar 3.16. (a) Fungsi keanggotaan error dan delta error plant-1

Fungsi keanggotaan *error* dan *delta error* kontrol logika fuzzy diilustrasikan oleh Gambar 3.16. Fungsi keanggotaan output data PWM plant-1a. diperoleh melalui cara mengurangi data PWM sehingga kecepatan sudut akan menghasilkan putaran minimum. Sedangkan penambah nilai PWM akan menghasilkan kecepatan sudut putar maksimum. PWM mampu menghasilkan kecepatan sudut dengan set point 13 PPS. Ketika PWM menghasilkan sinyal pada nilai 12 PPS, kecepatan angin pada turbin angin adalah 4 m/s dan ketika sinyal PWM sama dengan 14 PPS, kecepatan angin pada turbin angin 5 m/s. Dengan demikian dapat diasumsikan bahwa ketika sinyal PWM yang berfluktuasi pada pembacaan data (12-14) PPS, maka kecepatan angin berada pada rentang (4-5) m/s. Dengan demikian dapat ditentukan range fungsi keanggotaan kontrol logika fuzzy berada pada range: $8-14 = -6$ PPS untuk nilai minimum dan $24-14 = 10$ PPS untuk nilai maksimum. Data PWM 8-24 PPS

merupakan data yang mewakili range pengujian sudut pitch blade. Sebagai pembanding, dibuat fungsi keanggotaan yang berbeda untuk output fuzzy yang menghilangkan data yang akan menghasilkan PPS= 0. Sehingga *range* data minimal menjadi $12-4=8$ dan *range* data maksimal $14+4=18$, fungsi keanggotaan PWM plant-1b diilustrasikan oleh Gambar 4.17. Fungsi keanggotaan kontrol logika fuzzy selanjutnya ditampilkan pada Tabel 3.3. dengan basis aturan yang menggambarkan hubungan fungsi keanggotaan input *error*, input delta *error* dengan fungsi keanggotaan output kontrol logika fuzzy.



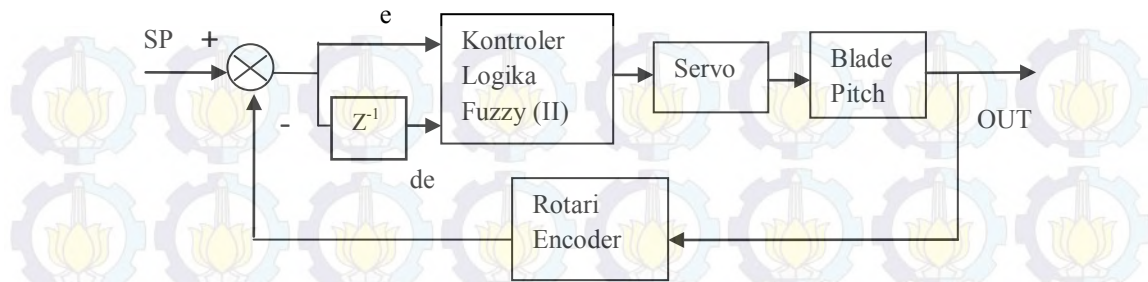
Gambar 4.17.(a) Fungsi keanggotaan output error dan delta error plant-1

Tabel 3.2. Basis Aturan Kontrol Logika Fuzzy Plant-1

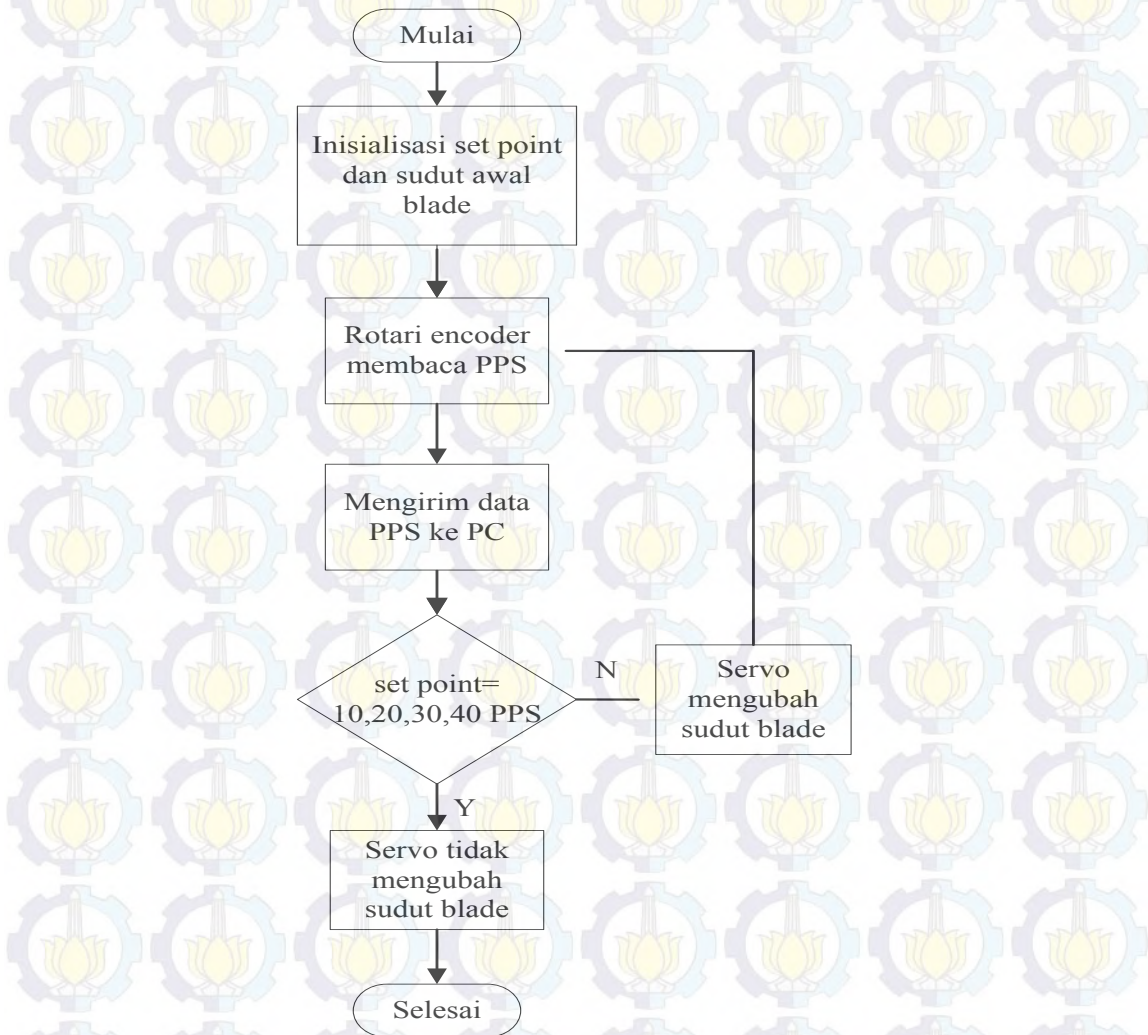
Sudut		Error		
		negatif	zero	Positif
dError	negatif	negatif	negatif	Zero
	zero	negatif	zero	Positif
	positif	zero	pos	Positif

3.7. Metoda Pengembangan Kontrol Logika Fuzy Plant–2 (Kasus VII)

Metoda kontrol logika fuzzy Plant-2, bertujuan memperbaiki sistem turbin angin pada kasus-6 dengan cara meningkatkan dimensi blade turbin angin yang sebelumnya memiliki diameter 1 meter menjadi berdiameter 2 meter. Dengan pengembangan dimensi dan sistem kontrol, turbin angin diharapkan mampu menghasilkan daya lebih besar dan menghasilkan kesetabilan sistem lebih terjamin. Diagram blok sistem turbin angin diilustrasikan oleh Gambar 3.18.



Gambar 3.18. Diagram blok sistem kontrol logika fuzzy plant-2

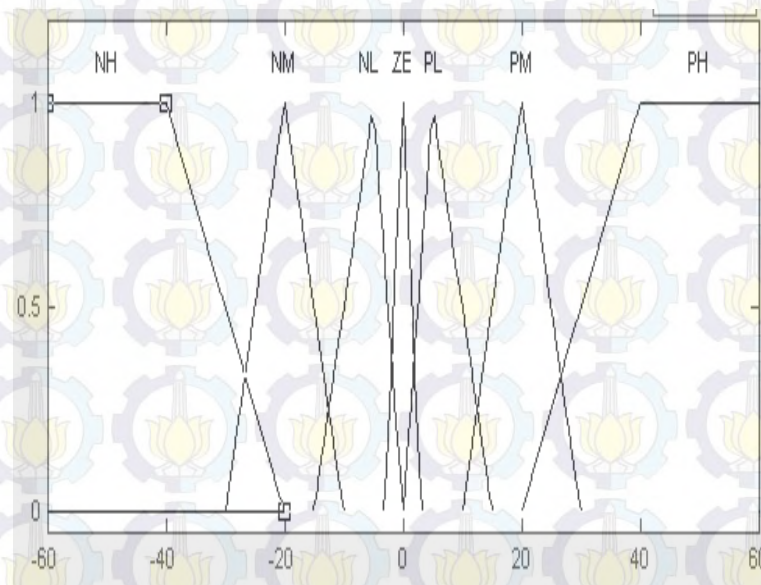


Gambar 3.19. Diagram alir kontrol logika fuzzy plant-2

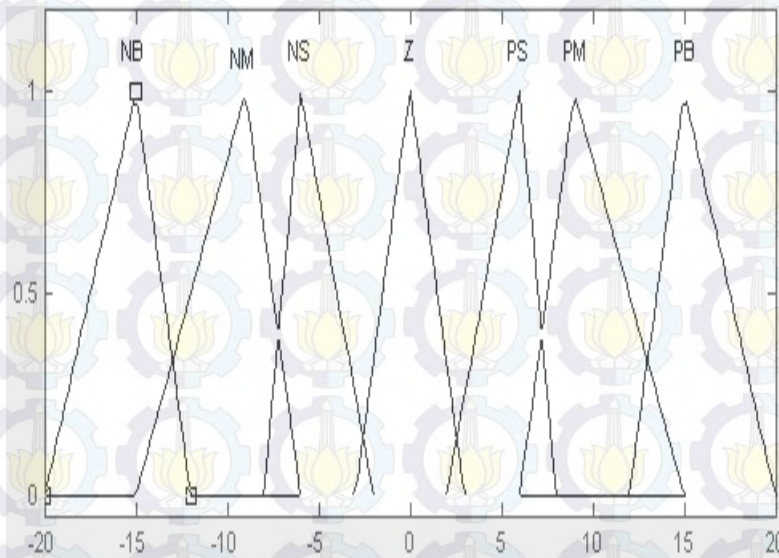
Metoda perancangan kontrol logika fuzzy plant-2 ditunjukkan oleh diagram alir Gambar 3.19. Perancangan fungsi keanggotaan kontrol logika fuzzy plant-2 memiliki tujuan memperbaiki kinerja sistem kontrol sebelumnya mengusahakan peningkatan kemampuan sistem kontrol. Peningkatan dilakukan dengan cara menambah jumlah fungsi keanggotaan *error* dan *delta error* berjumlah 7x7 (sebelumnya 3x3). Fungsi keanggotaan diilustrasikan oleh

Gambar 3.20 dan Gambar 3.21. Fungsi keanggotaan dibangun berdasarkan penelitian yang dilakukan berulang-ulang hingga mencapai hasil yang optimum. Rentang fungsi keanggotaan error adalah -60 hingga 60. Nilai tersebut diambil ketika kecepatan sudut turbin angin mencapai nilai maksimum yaitu 56 PPS. Adapun rentang fungsi keanggotaan delta error diperoleh berdasarkan penelitian. Dari hasil penelitian ditunjukkan bahwa nilainya tidak terlalu besar dan berada pada kisar dibawah 10 PPS. Adapun untuk mengantisipasi perubahan kecepatan angin tiba-tiba dan bernilai besar digunakan range (-20–20) PPS. Fungsi keanggotaan input *error* dan delta *error* ditunjukkan oleh Gambar 3.20. dan Gambar 3.21.

Keluaran kontrol logika fuzzy yang dibangun untuk mengatur posisi sudut pitch blade berada pada rentang: 0,5,10,15,20,25,30,35,40 dan 45 derajat. Batasan fungsi keanggotaan dibuat lebih sempit agar nilai output semakin teliti. Namun demikian resolusi terkecil yang mampu dicapai adalah 5° . Dengan penelitian berulang maka diperoleh nilai batasan fungsi keanggotaan optimum. Pemilihan nilai output didasarkan pada pengambilan data awal respon turbin angin. Posisi sudut pitch blade 5° – 10° digunakan untuk memberi respon akibat peningkatan kecepatan angin. Sedangkan posisi sudut pitch blade 15° – 45° digunakan untuk memberi respon ketika terjadi penurunan kecepatan angin. Nilai penurunan berbanding lurus dengan nilai sudut pitch blade. Ketika posisi sudut pitch semakin besar, maka resultan gaya angkat dan gaya dorong menjadi meningkat yang menimbulkan kondisi tidak seimbang. Hal ini disebabkan oleh nilai gaya angkat yang lebih besar. Apabila sudut pitch melampaui kondisi *stall* maka blade turbin angin tidak lagi mampu menangkap energi angin. Selanjutnya basis aturan kontrol logika fuzzy plant-2 diilustrasikan oleh Tabel 3.4.



Gambar 3.20. Fungsi keanggotaan input error plant-2

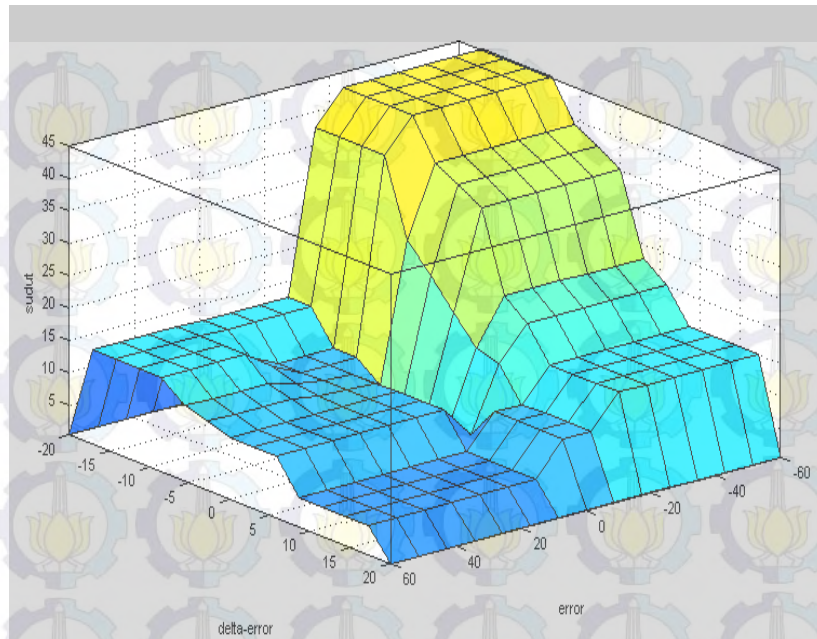


Gambar 3.21. Fungsi keanggotaan input delta error plant-2

Tabel 3.4. Basis Aturan Kontrol Logika Fuzzy Plant-2

DE / E	NH	NM	NL	ZE	PL	PM	PH
NB	45	45	40	15	15	15	15
NM	45	45	40	10	10	10	15
NS	40	35	20	5	10	10	10
ZE	40	35	20	5	10	10	10
PS	35	20	15	5	10	10	10
PM	30	15	10	10	5	5	5
PB	30	15	10	10	5	5	5

Gambar 3.22. merupakan gambar *surface view* yang merepresentasikan Fuzzy Inference system (FIS). *Surface view* berfungsi untuk mengetahui profil permukaan logika fuzzy yang telah dibangun dengan bantuan software Matlab. Apabila FIS landai maka profil *surface view* juga landai dan berlaku sebaliknya. Kelandaian tersebut dipengaruhi oleh nilai aktuator atau keputusan yang diambil kontrol logika fuzzy. Pada penelitian ini *surface view* yang diperoleh tidak terlalu landai pada bagian *error* negatif dan delta *error* negatif. Pada kondisi tersebut sistem turbin angin membutuhkan energi besar untuk melakukan ”pengereman” untuk posisi sudut *pitch blade* 15° – 45° .



Gambar 3.22. *Surface view* berdasar basis aturan KLF yang dibangun

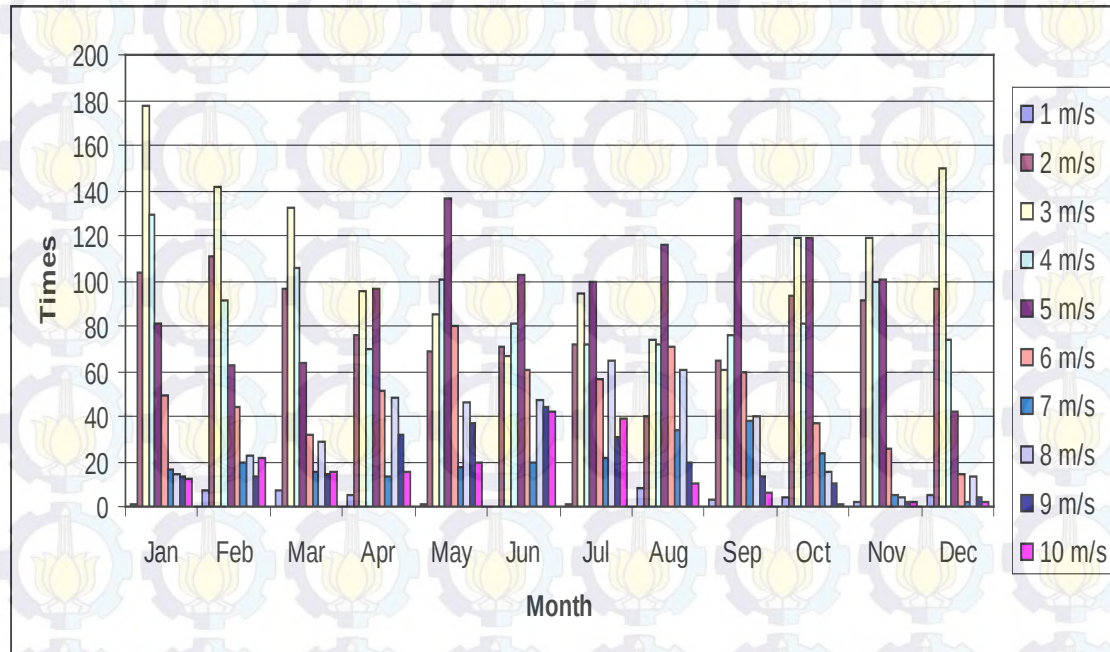
3.8. Instalasi Turbin Angin di Surabaya (Kasus VIII)

Pada penelitian ini turbin angin diinstalasi pada ladang angin Surabaya-Jawa Timur. Data ladang angin yang digunakan eksperimen diperoleh dari stasiun cuaca Juanda Surabaya yang lokasinya berada pada $7^{\circ} 23'$ LS dan $112^{\circ} 47'$ BT, selanjutnya diilustrasikan oleh Gambar 3.23.

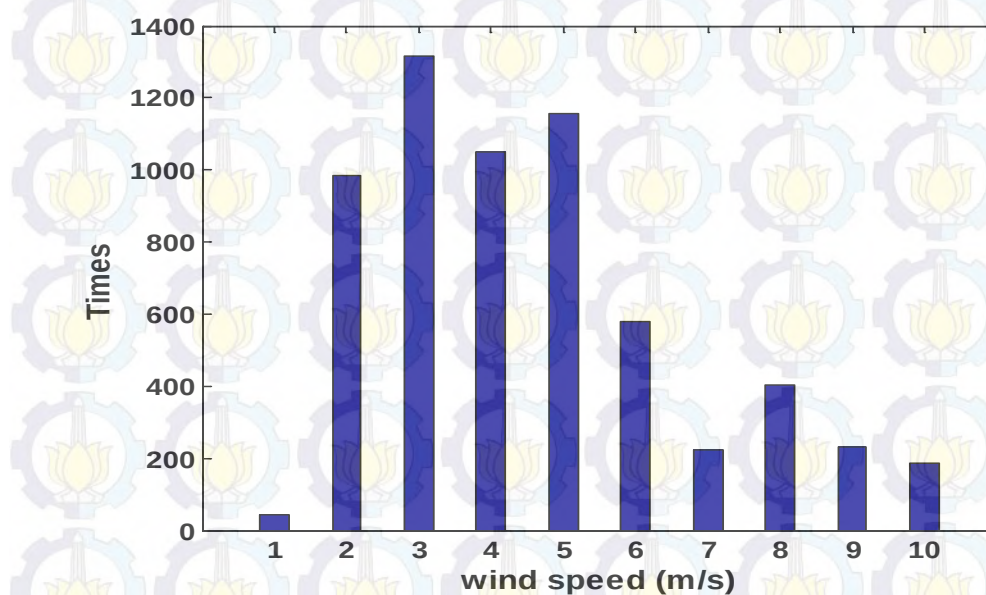


Gambar 3.23. Lokasi pengukuran kecepatan angin di Surabaya

Data cuaca diakses mulai bulan Januari 2006 sampai Desember 2008. Kecepatan angin diukur pada tiap-tiap jam selama kurun waktu duapuluh empat jam dalam tiga tahun. Frekuensi kecepatan angin rerata untuk tiap bulan diilustrasikan oleh Gambar 3.24. dengan kecepatan angin pada range 1-10 m/s. Gambar 3.25 menunjukkan jumlah frekuensi untuk masing-masing kecepatan angin. Frekuensi kecepatan angin terbanyak berada pada daerah kecepatan 2-6 m/s

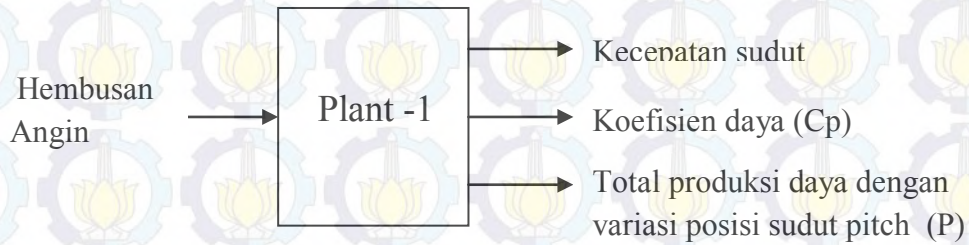


Gambar 3.24. Pola kecepatan angin bulanan 1-10 m/s. di Surabaya

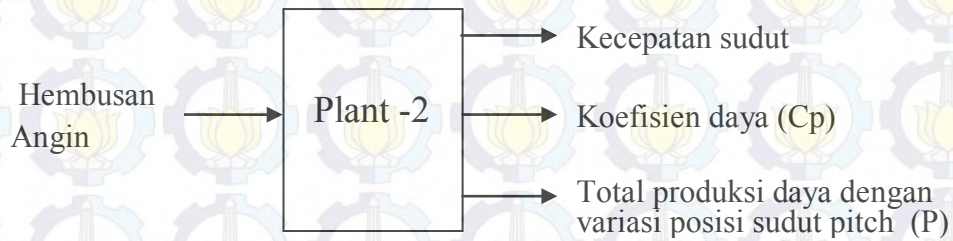


Gambar 3.25. Total frekuensi untuk masing-masing kecepatan angin

Prototipe turbin angin plant-1 dan plant-2 yang diuji coba pada ladang angin Surabaya diilustrasikan oleh Gambar (3.26.-3.27.)



Gambar 3.26. Diagram blok percobaan turbin angin plant-1



Gambar 3.27. Diagram blok percobaan turbin angin plant-2

BAB IV

HASIL DAN ANALISIS

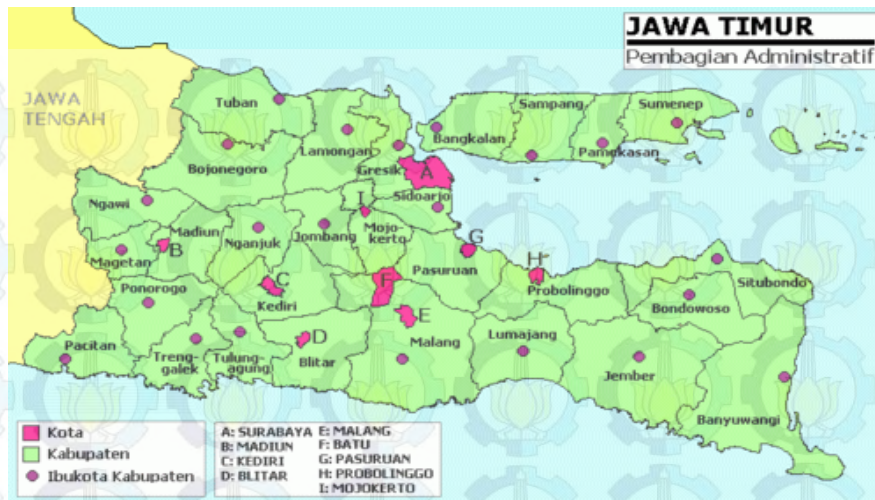
Hasil penelitian kedelapan metoda yang diajukan pada bab 3, dilaporkan dalam bentuk kasus demi kasus pada bab ini. Pada kasus-1, dilaporkan hasil evaluasi data cuaca yang dilolah dengan metoda statistika. Pada kasus-2 dilaporkan hasil simulasi JST untuk peramalan tiga input dan satu output data cuaca untuk mencari kecepatan angin dan pada kasus-3 dilaporkan hasil peramalan tiga input data dan dua output data cuaca untuk mencari kecepatan angin dan arah angin. Pada kasus-4 dan kasus-5 dilaporkan kinerja turbin angin hasil simulasi dan proototipe turbin angin yang telah dibangun, untuk mengetahui koefisien daya maksimum yang berhubungan dengan posisi sudut pitch blade dan kecepatan hembusan angin. Kasus-6 dan kasus-7 melaporkan kinerja implementasi kontrol logika fuzzy pada prototipe turbin angin plan-1 dan plant-2. Dengan implementasi kontrol logika fuzzy pada turbin angin, maka kesetabilan sistem dapat dianalisis pada berapa produksi daya yang dihasilkan untuk kecepatan angin dalam level berbeda. Pada kasus-8 dilaporkan kinerja prototipe turbin yang diinstalasi di ladang angin Surabaya.

4.1. Pengukuran Data Cuaca (Kasus I)

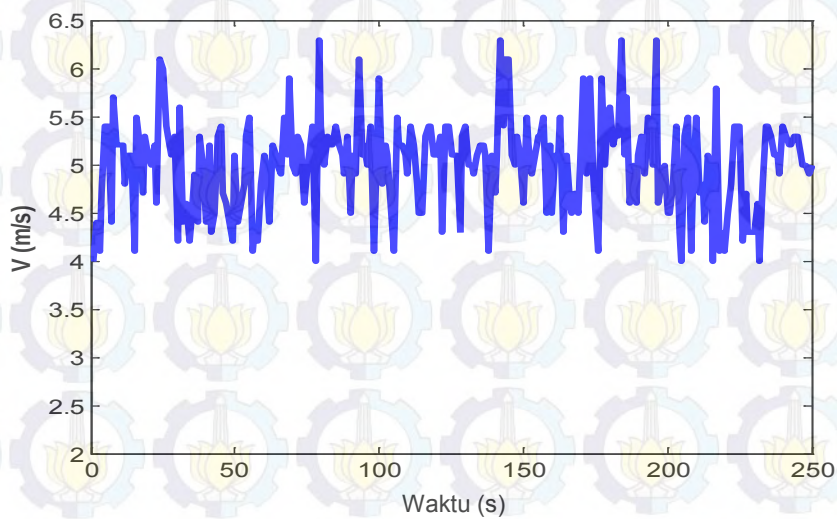
Data cuaca yang digunakan penelitian diakses melalui pengukuran langsung dan tidak langsung meliputi: Sampang, Mojokerto, Nganjuk, Lamongan, Pasuruhan dan Blitar, yang terdiri dari: kecepatan angin, arah angin, temperatur, kelembaban relatif, dan intensitas cahaya. Waktu pengukuran 1-3 bulan dengan durasi pencuplikan data setiap 30 menit per hari. Data cuaca yang diakses melalui stasiun cuaca meliputi: stasiun cuaca Juanda Surabaya, stasiun cuaca Karangates-Malang dan stasiun cuaca Sawangan-Nganjuk. Daerah pengukuran data cuaca diilustrasikan oleh Tabel 4.1.

Table 4.1. Koordinat Geografis dari daerah pengukuran data cuaca yang diteliti

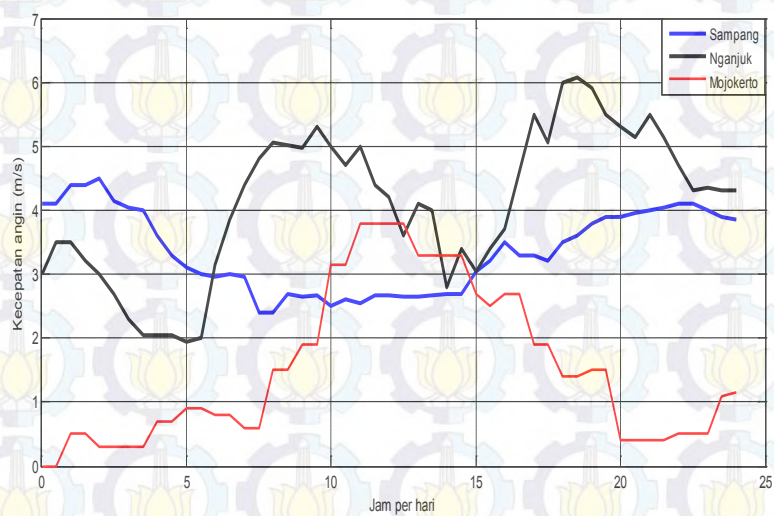
Lokasi	Lintang(o)	Bujur (o)	Level (m)	Durasi	Tahun Pengukuran
Sampang	7 ⁰ 25' S	115 ⁰ 15' E	03	90 hari	01/07/2008-31/08/2008
Surabaya	7 ⁰ 23' S	112 ⁰ 27' E	2,8	03 tahun	01/01/2005-31/12/2007
Nganjuk	7 ⁰ 30' S	111 ⁰ 55' E	46	05 tahun	01/01/2005-31/08/2010
Blitar	8 ⁰ 60' S	112 ⁰ 21' E	150	03 tahun	01/01/2008-31/08/2010
Lamongan	7 ⁰ 35' S	112 ⁰ 33' E	0-100	30 hari	01/06/2007-31/06/2008
Pasuruan	7 ⁰ 31' S	112-113 E	2-2700	30 hari	01/07/2007-31/07/2008
Mojokerto	7 ⁰ 15' S	112 ⁰ 30' E	26	30 hari	01/07/2008-31/08/2008



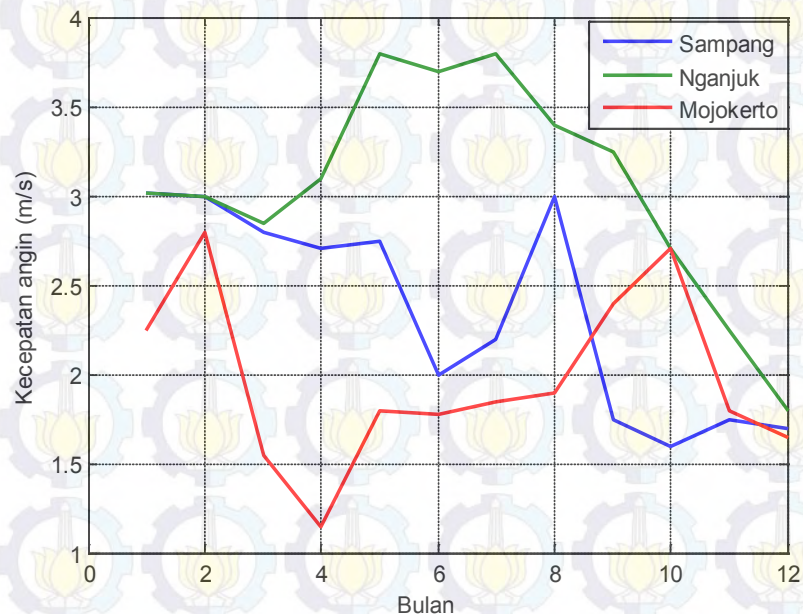
Gambar 4.1. Peta lokasi pengukuran kecepatan angin [18]



Gambar. 4.2. Variasi kecepatan angin untuk waktu singkat



Gambar. 4.3. Variation kecepatan angin tiap jam per hari



Gambar. 4.4. Variasi kecepatan angin untuk kurun waktu bulanan

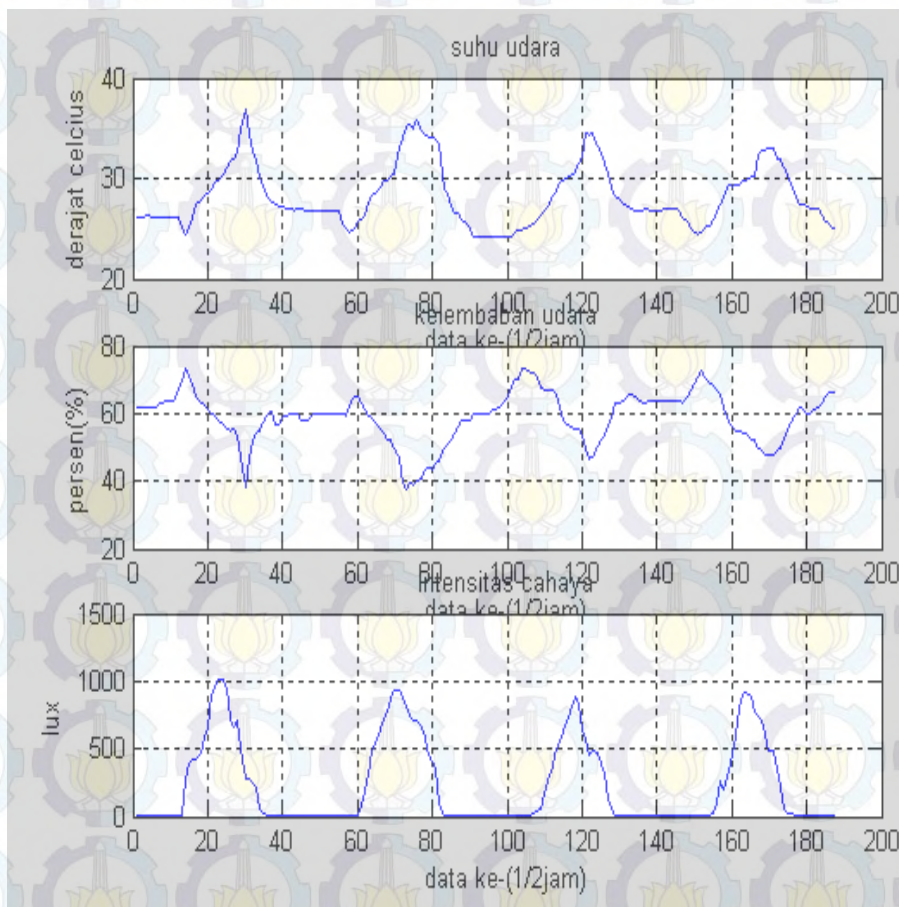
Table 4.2. Ketidakpasian pengukuran data cuaca pada tiga lokasi

Lokasi	Lintang (o)	Bujur (o)	Kecepatan rerata (m/s)	Standard deviasi	Ketidakpastian pengukuran
Sampang	7 ⁰ 25' S	115 ⁰ 15' E	3,4	0,66	0,096
Mojokerto	7 ⁰ 15' S	112 ⁰ 30' E	1,5	1,57	0,228
Nganjuk	7 ⁰ 30' S	111 ⁰ 55' E	4,1	1,17	0,171

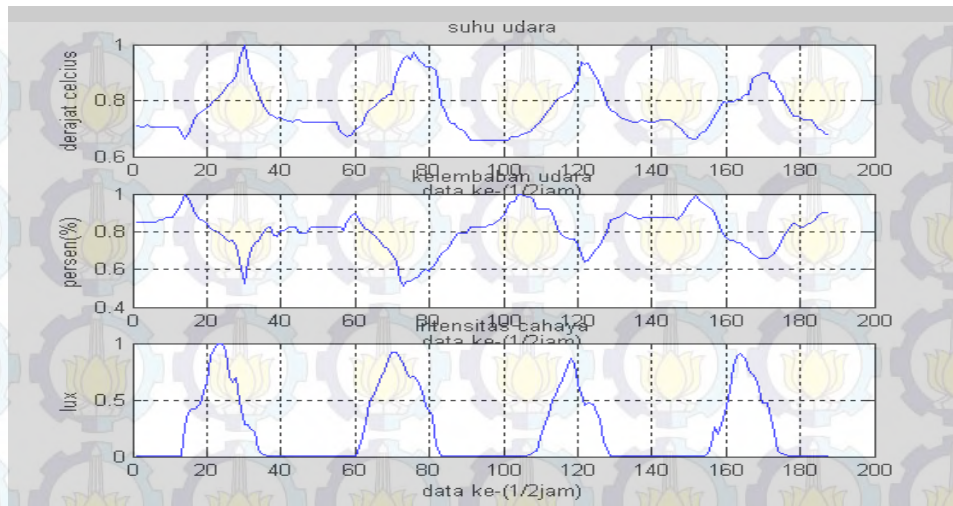
Hasil evaluasi data cuaca diilustrasikan melalui Gambar (4.2.-4.4.) dan Tabel 4.1. Variasi kecepatan angin rentang waktu singkat dalam sekon ditunjukkan oleh Gambar 4.2. ,Variasi kecepatan angin rerata rentang jam per hari dan rentang rerata tiap bulan per tahun diilustrasikan Gambar (4.3-4.4.). Dari Tabel 4.2, kualitas data angin dari ketiga daerah dapat dievaluasi. Kecepatan angin di Mojokerto memiliki kecepatan rerata terendah =1,5 m/s dengan nilai ketidakpastian pengukuran 0,228 , kecepatan angin rerata sedang di Sampang =3,4 m/s. dengan angka ketidakpastian pengukuran 0,096 dan kecepatan angin rerata tertinggi di Nganjuk =4,1 m/s. dengan angka ketidakpastian pengukuran 0,171. Ketiga keadaan diteliti tersebut dengan faktor cakupan = 2 dan tingkat kepercayaan 95 %. Kualitas data angin Nganjuk adalah memiliki karakter terbaik sehingga Nganjuk merupakan ladang angin yang memiliki potensi terbesar untuk instalasi turbin angin.

4.2. Peramalan Kecepatan Angin (Kasus II)

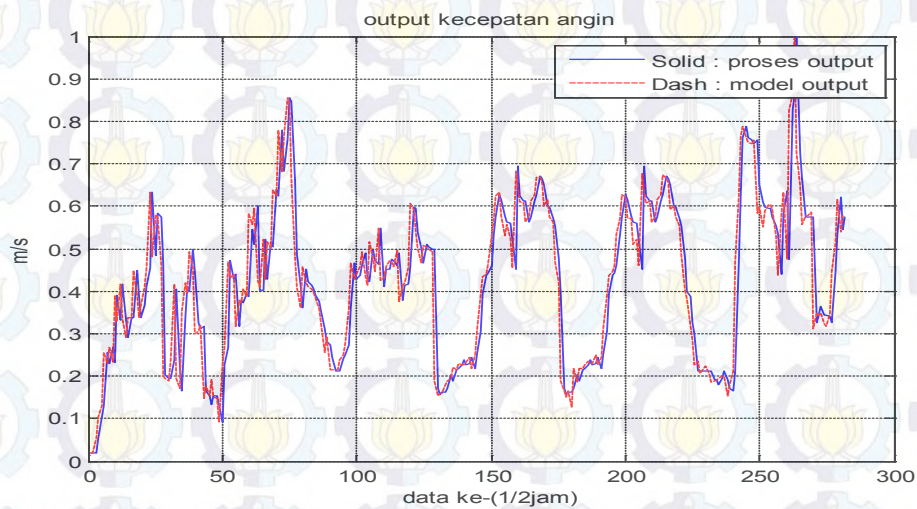
Peramalan kecepatan angin adalah dilakukan melalui proses simulasi dengan mengikuti tahapan proses pelatihan model JST, proses validasi model JST dan proses pengujian model JST. Proses pelatihan dilakukan untuk memperoleh nilai faktor pemberat dan dikerjakan melalui proses iterasi secara terus menerus sampai diperoleh nilai kesalahan minimum. Proses pelatihan dilakukan melalui proses coba-coba terhadap parameter, tingkat pembelajaran (α), momentum (μ), dan jumlah lapis tersembunyi. Pembelajaran dilakukan dengan cara memberi pola masukan, pola lapisan dan pola keluaran yang mampu menghasilkan respon terbaik. Hasil pelatihan model input JST sebelum dan sesudah *scaling* peramalan kecepatan angin diilustrasikan oleh Gambar (4.5.-4.6.). Ketika proses pelatihan JST telah berhasil, maka dilanjutkan proses validasi, dan ketika proses validasi mampu menghasilkan kriteria kinerja yang ditetapkan, maka proses pengujian data peramalan oleh JST dikerjakan. Proses pengujian sistem peramalan kecepatan angin menggunakan 47 pasang data yang berasal dari data lain. Hasil output pelatihan dan output pengujian JST diilustrasikan oleh Gambar (4.7.- 4.8.).



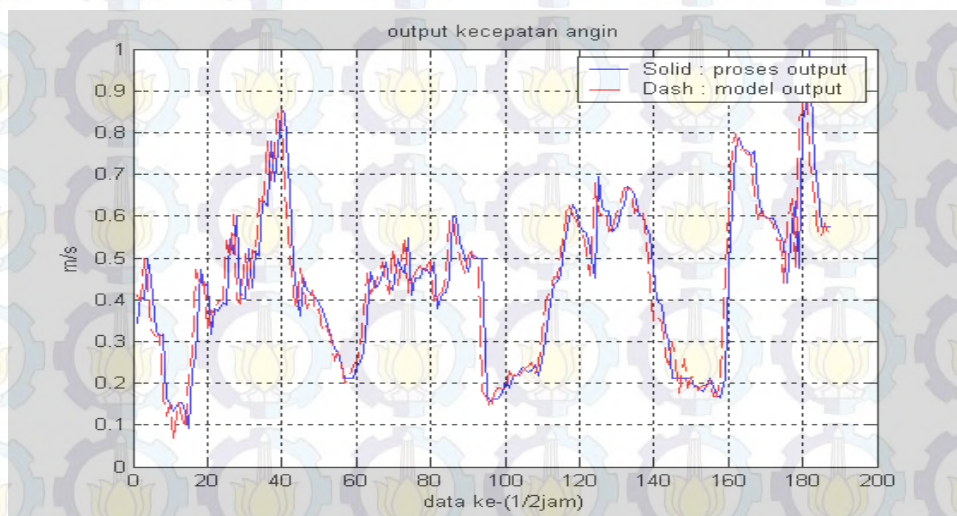
Gambar 4.5. Data input pelatihan JST sebelum *scaling*



Gambar .4.6. Data input proses pelatihan JST setelah *scaling*



Gambar.4.7. Data output proses pelatihan kasus II



Gambar.4.8. Data output proses pengujian kasus II

Table 4.3. Spesifikasi hasil pelatihan JST untuk kecepatan angin

Kinerja JST	Nilai
RSME	0,011776
VAF	100
Jumlah epochs	286
Jumlah lapis	3
Jumlah neuron per lapis	3 5 1

Tabel 4.4. Spesifikasi hasil pengujian JST kecepatan angin

Kinerja JST	Nilai
RSME	0,0173890
VAF	99,1054
Jumlah epochs	286
Jumlah lapis	3
Jumlah neuron per lapis	3 5 1

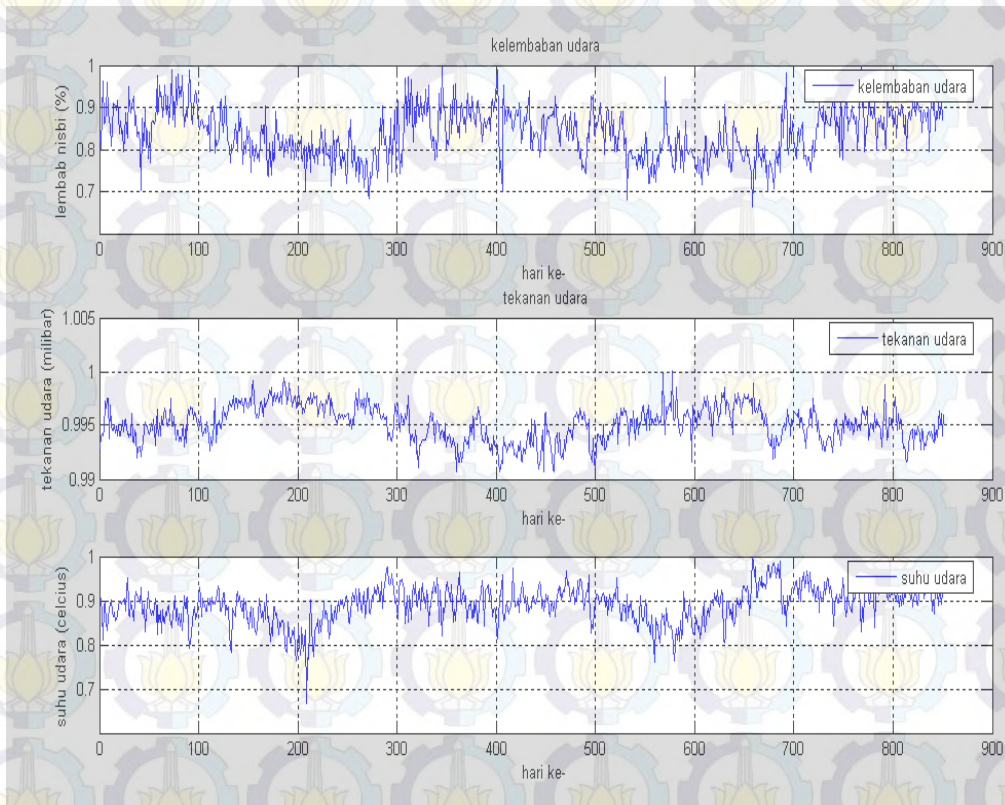
Kinerja proses pelatihan dan kinerja proses pengujian JST ditunjukkan oleh Tabel 4.3. dan Tabel 4.4. Diketahui Nilai RSME dan VAF untuk pelatihan JST = 0,011776 dan VAF =100, Nilai RSME dan VAF untuk pengujian =0,017389 dan =100. Dengan demikian JST mampu melakukan peramalan dengan baik untuk kecepatan angin dalam range 30 menit.

4.3. Peramalan Kecepatan Angin dan Arah Angin (Kasus III)

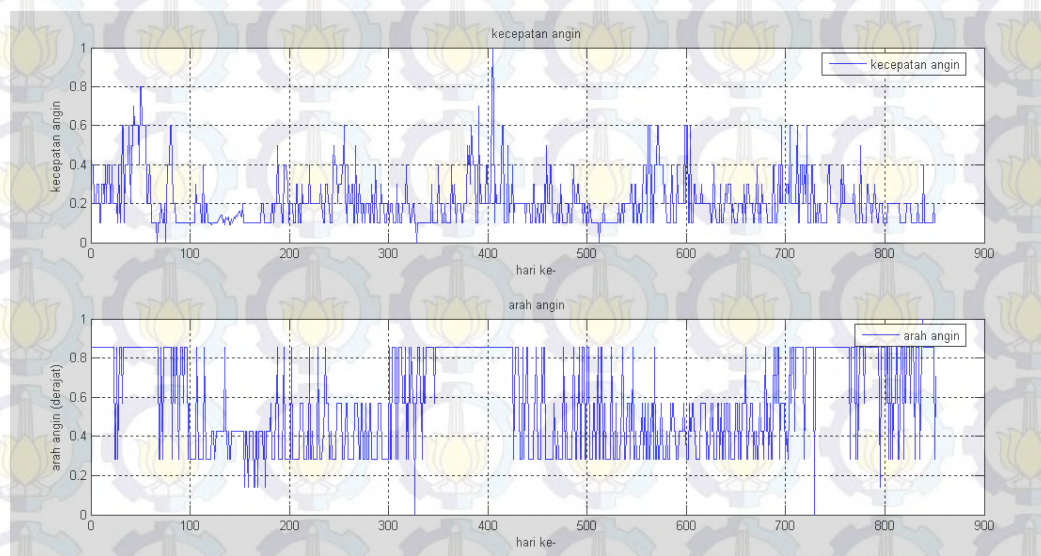
Peramalan kecepatan angin dan arah angin pada kasus-3 dikerjakan seperti pada kasus-2. Pada kasus-3 terdapat perbedaan arsitektur model JST yang memiliki 3 input berbeda: temperatur udara, tekanan udara, dan kelembaban udara dan output JST berupa kecepatan angin dan arah angin. Gambar 4.9. dan Gambar 4.10. menampilkan grafik yang mengilustrasikan data masukan dan keluaran JST, pada kondisi sebelum dan sesudah proses *scaling*. Proses *scaling* dilakukan terhadap data input dan output dengan mengubah level data asli menjadi level 0-1. Gambar 4.11. mengilustrasikan hasil output model JST, dengan garis biru merupakan output proses JST dan garis merah keluaran data asli dari stasiun cuaca. Dari proses pelatihan yang telah dilakukan, JST mampu meramal data cuaca sesuai dengan kriteria yang ditetapkan. Sehingga proses validasi dan proses pengujian JST dapat dilanjutkan.

Hasil proses pengujian JST diilustrasikan oleh Gambar 4.12. Kinerja sistem yang mencakup RMSE dan VAF untuk peramalan kecepatan angin dan arah angin ditampilkan pada Tabel 4.5. dan Tabel 4.6. Nilai RMSE pelatihan untuk peramalan kecepatan angin 0,0669 dan arah angin 0,1061, Nilai VAF untuk kecepatan angin 77,8375 dan arah angin 81,0271. Hasil Pengujian menunjukkan bahwa nilai RMSE kecepatan angin 0,0612 dan

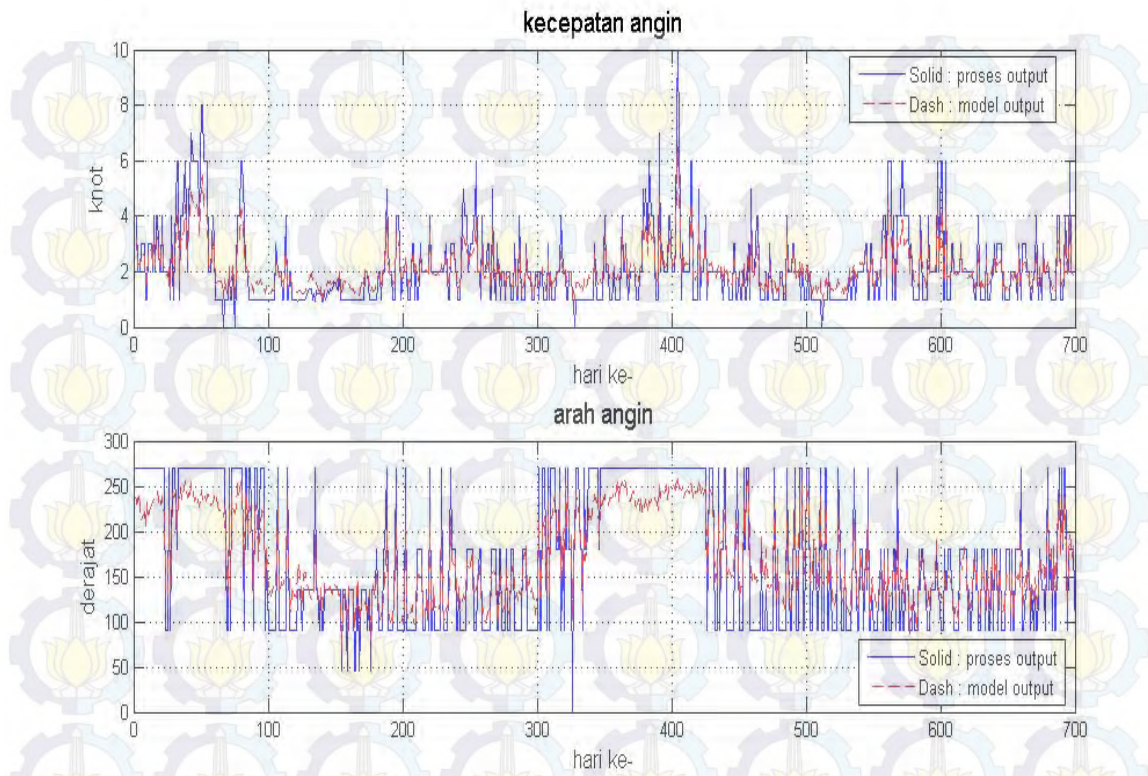
arah angin 0,1107, Nilai VAF untuk kecepatan angin 75,7281 dan 80,4986. RMSE kecepatan angin relatif kecil dibanding arah angin dan nilai VAF untuk keduanya berada pada range 76-81, nilai tersebut memenuhi kriteria VAF yang ditargetkan, namun demikian nilai tersebut relatif kurang mendekati nilai 100. Keadaan tersebut ditimbulkan oleh kecepatan angin dan arah angin yang sangat berfluktuatif ekstrim antara siang hari dan malam hari.



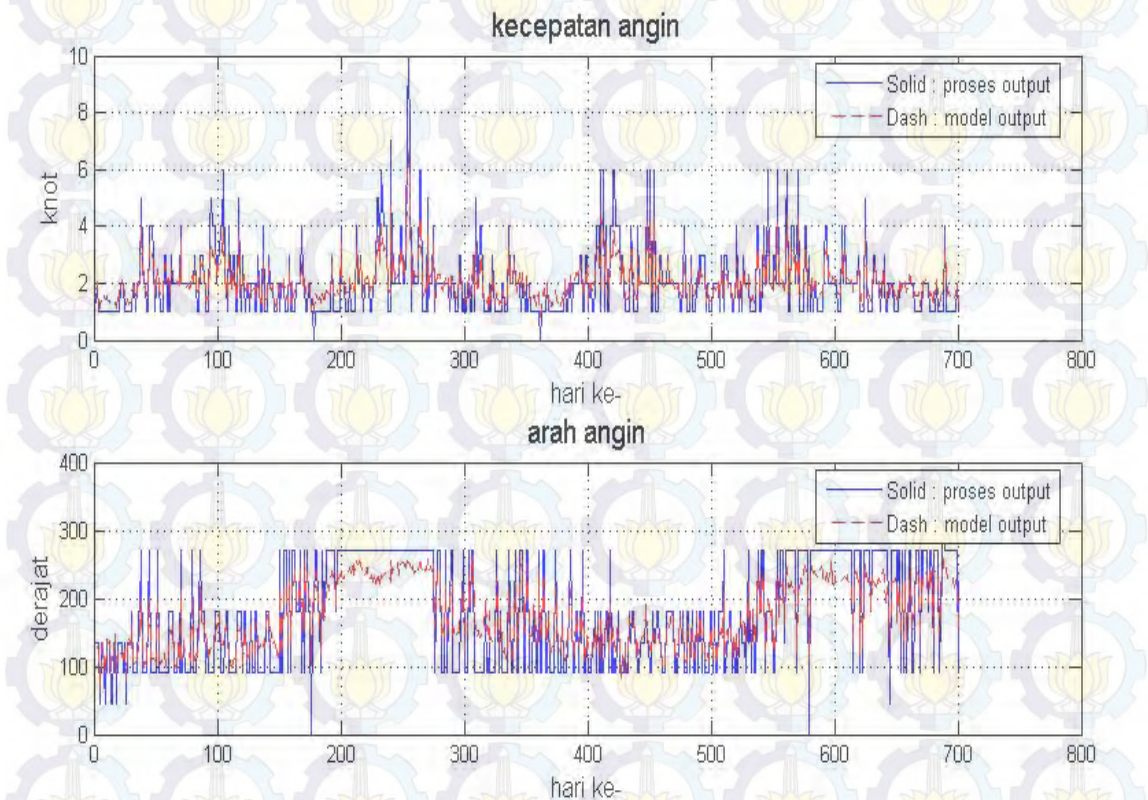
Gambar 4.9. Data input setelah proses *scalling* kasus III



Gambar 4.10. Data output setelah proses *scalling* kasus III



Gambar 4.11. Proses pelatihan JST untuk kecepatan dan arah angin



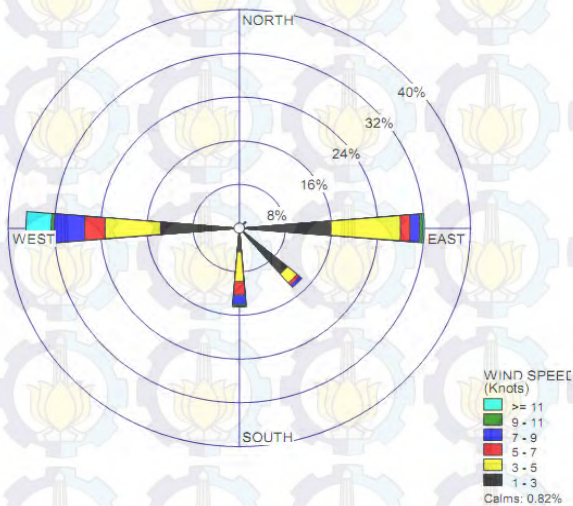
Gambar 4.12. Proses pengujian JST untuk kecepatan dan arah angin

Table 4.5. Spesifikasi hasil pelatihan JST untuk kecepatan angin dan arah angin

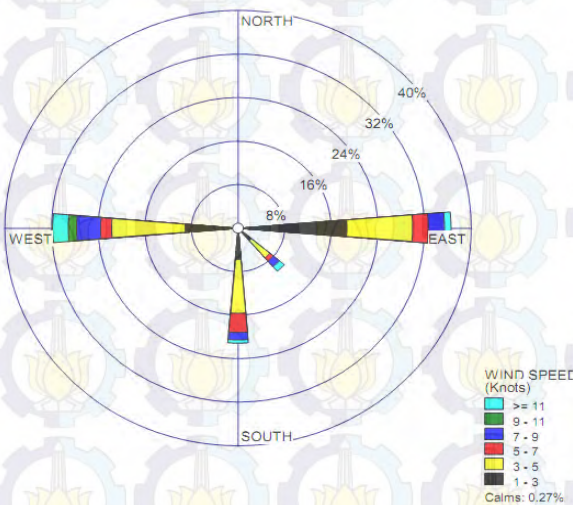
Kinerja JST	Kecepatan angin	Arah angin
RSME	0,0669	0,1061
VAF	77,8375	81,0271
Jumlah epochs	700	700
Jumlah lapis	3	3
Jumlah neuron tiap lapis	3 5 2	3 5 2

Table 4.6. Spesifikasi hasil pengujian JST untuk kecepatan angin dan arah angin

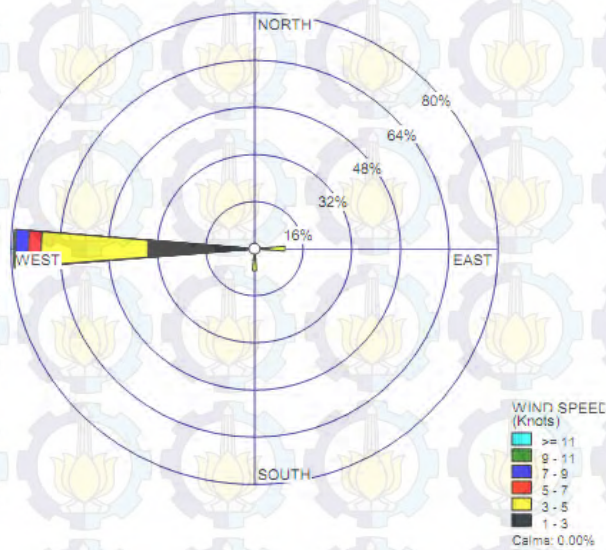
Kinerja JST	Kecepatan angin	Arah angin
RSME	0,0612	0,1107
VAF	75,7281	80,4986
Jumlah epochs	700	700
Jumlah lapis	3	3
Jumlah neuron tiap lapis	3 5 2	3 5 2



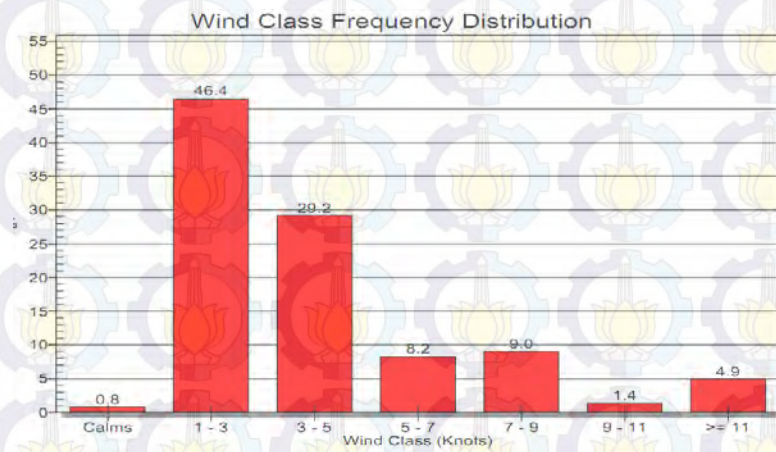
Gambar 4.13. *Windrose* arah angin tahun 2008



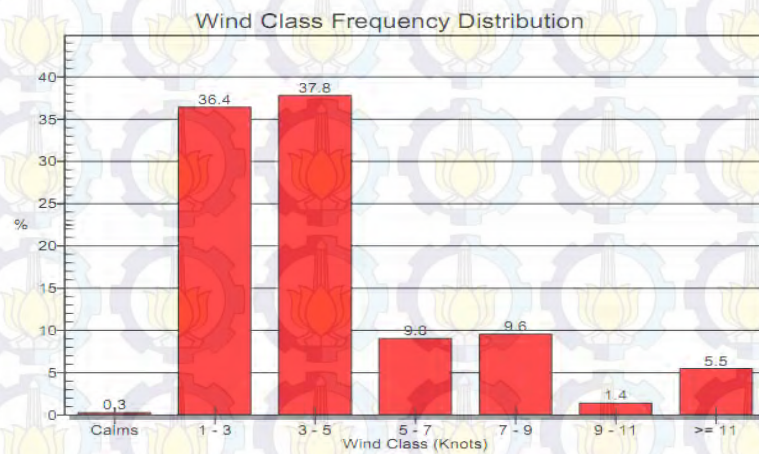
Gambar 4.14. *Windrose* arah angin tahun 2009



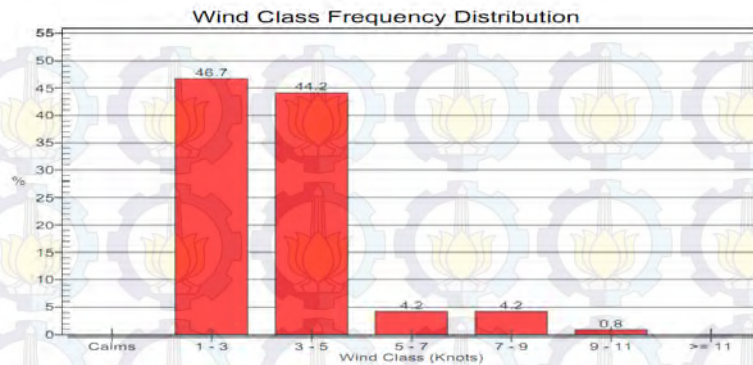
Gambar 4.15. *Windrose* arah angin tahun 2010



Gambar.4.16. Distribusi frekuensi kecepatan angin tahun 2008



Gambar.4.17. Distribusi frekuensi kecepatan angin tahun 2009

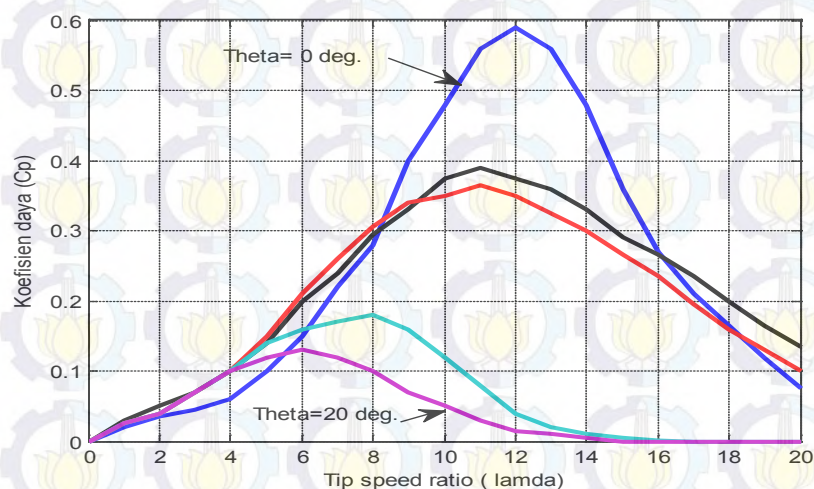


Gambar.4.18. Distribusi frekuensi kecepatan angin tahun 2010

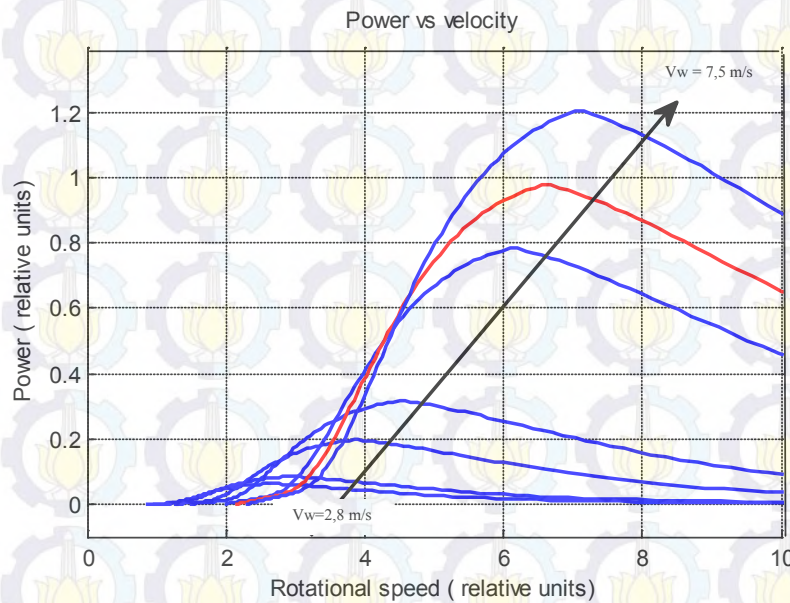
Histogram Gambar 4.16. dan Gambar 4.18. mengilustrasikan distribusi arah angin dan kecepatan angin. Arah Angin pada tahun 2008 dan 2009 didominasi oleh arah timur dan arah barat. Sedangkan untuk tahun 2010 arah angin didominasi oleh arah barat saja. Keadaan tersebut disebabkan oleh data yang digunakan penelitian tahun 2010, baru sampai pada bulan april. Kecepatan angin di wilayah Karangates-Malang memiliki kecepatan angin dominan pada range kecepatan (0,5-1,5 m/s) dan (1,5-2,6 m/s), meskipun masih terdapat kecepatan angin di atas (5,7 m/s).

4.4. Simulasi Optimisasi Daya Turbin Angin (Kasus IV)

Simulasi pengembangan turbin angin bertujuan untuk mencari hubungan parameter turbin angin dan kecepatan angin pada lokasi instalasi turbin angin. Dari simulasi diperoleh hubungan koefisien daya turbin angin (C_p) terhadap tip speed ratio (TSR) pada posisi sudut pitch (0-20)⁰ ditunjukkan oleh Gambar 4.19. dan hubungan keluaran daya turbin angin terhadap kecepatan rotasi turbin angin diilustrasikan oleh Gambar 4.20.

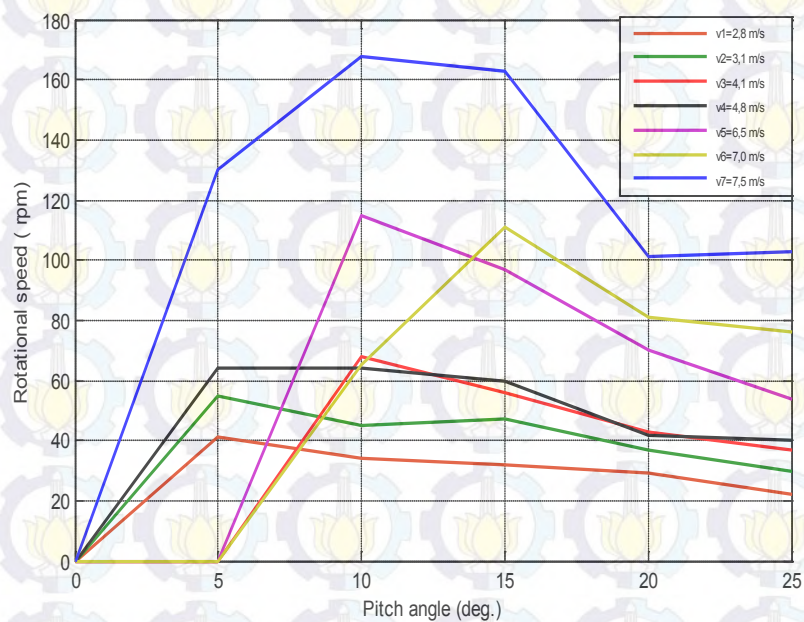


Gambar 4.19. Hasil simulasi variasi koefisien daya C_p terhadap TSR

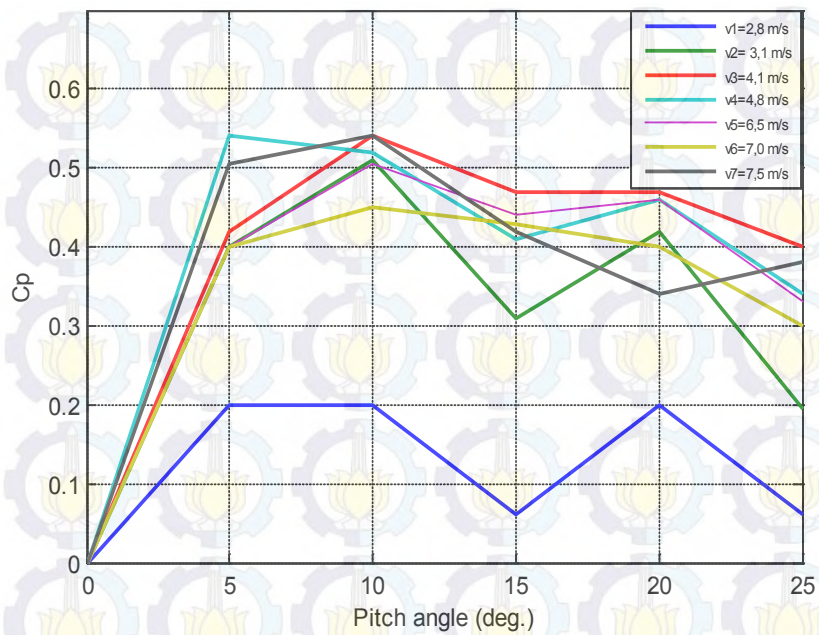


Gambar 4.20. Daya angin terhadap kecepatan rotasi dengan variasi kecepatan angin

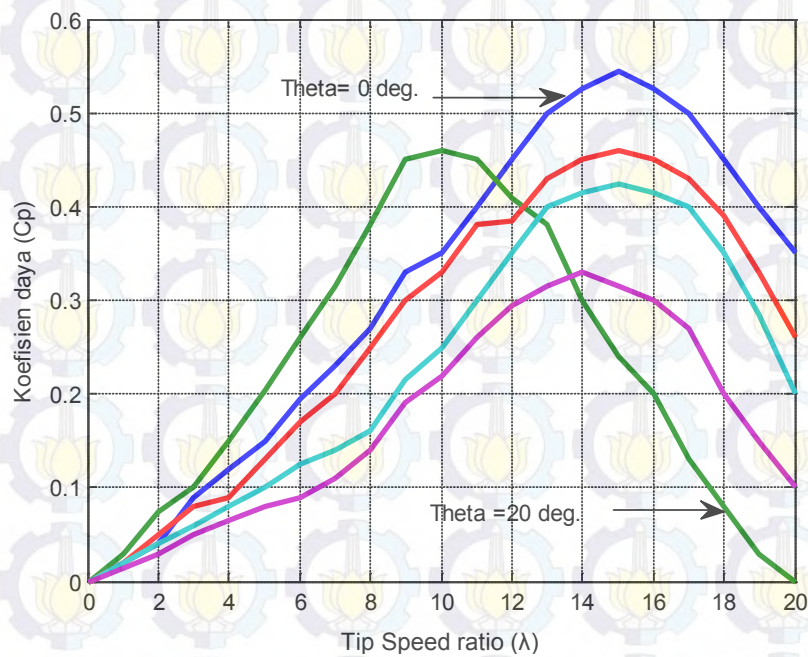
Pengujian prototipe turbin angin menghasilkan data uji, ketika data tersebut telah diolah data tersebut dapat digunakan untuk mencari hubungan: kecepatan rotasi terhadap sudut pitch blade dengan variasi kecepatan angin, koefisien daya turbin angin terhadap sudut pitch blade pada variasi kecepatan angin dan koefisien daya turbin (C_p) terhadap tip speed ratio (TSR) diilustrasikan oleh Gambar (4.21-4.23).



Gambar 4.21. Kecepatan rotasi terhadap posisi sudut blade dengan variasi kecepatan angin

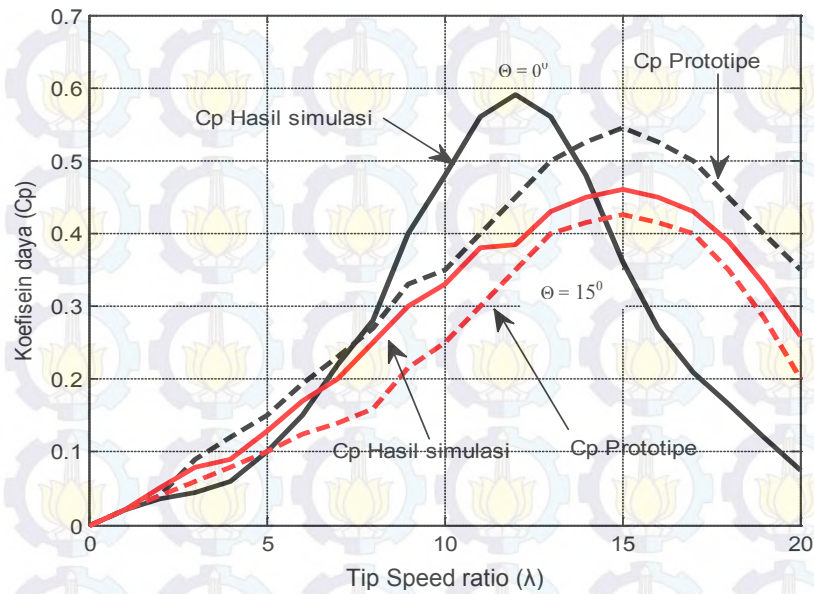


Gambar 4.22. Koefisien daya terhadap posisi sudut pitch blade pada variasi kecepatan angin



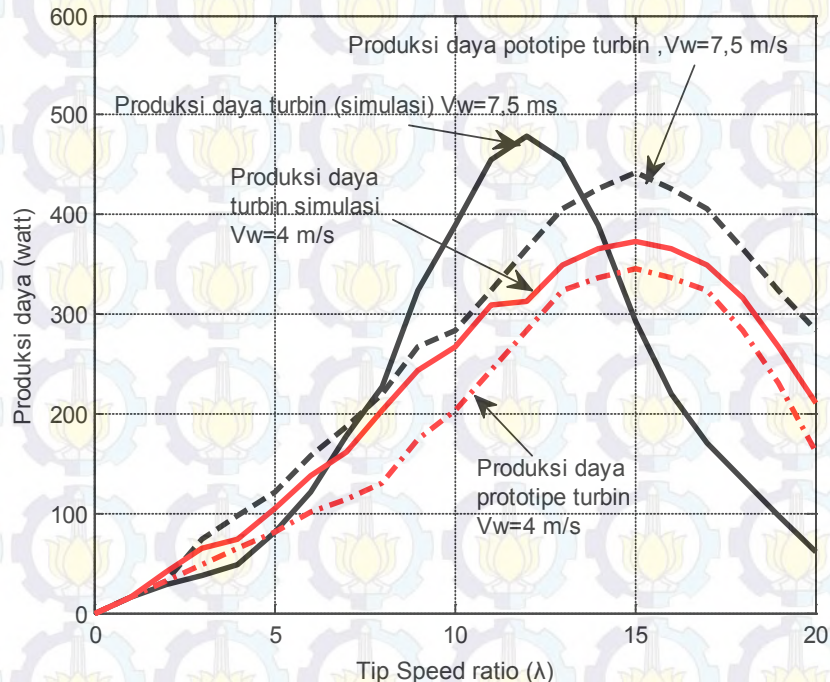
Gambar 4.23. Variasi koefisien daya terhadap TSR pada variasi sudut pitch

Gambar 4.24 mengilustrasikan perbandingan koefisien daya turbin angin (C_p) hasil simulasi terhadap prototipe turbin angin untuk posisi sudut pitch blade ($\theta=0^\circ$) dan posisi sudut ($\theta=15^\circ$)



Gambar 4.24. Hubungan C_p terhadap TSR pada (0° dan 15°) turbin simulasi dan prototipe

Perbandinga produksi daya turbin angin dari model simulasi dibanding dengan produksi daya angin prototipe turbin angin diilustrasikan oleh Gambar 4.25.



Gambar 4.25. Hubungn produksi daya angin Vs TSR pada turbin angin simulasi dan prototipe pada variasi kecepatan angin 4 m/s dan 7,5 m/s.

Hasil perancangan turbin angin melalui simulasi mampu menghasilkan nilai C_p maksimum = 0,59 dan dari prototipe turbin menghasilkan C_p maksimum 0,545. Perbedaan

nilai C_p dari keduanya sebesar 4,5% untuk posisi sudut $\theta=0^\circ$. Ketika posisi sudut blade 15° , turbin angin hasil simulasi memiliki $C_p=0,47$ dan pada prototipe memiliki nilai $C_p=0,42$, sehingga perbedaan nilai C_p pada kecepatan angin 4 m/s. nilainya = 5 %. Sehingga perbedaan C_p pada kecepatan angin 7,5 m/s dan 4 m/s nilainya 0,5 %.

Pada pemberian kecepatan angin 7,5 m/s., Turbin angin hasil simulasi mampu menghasilkan produksi daya sebesar =479 Watt, dan dari prototipe turbin menghasilkan produksi daya = 426 Watt. Untuk pemberian kecepatan angin 4 m/s. pada turbin hasil simulasi menghasilkan produksi daya sebesar =373 Watt, dan untuk prototipe turbin angin = 345 Watt. Dengan demikian, apabila perbedaan produksi daya dinyatakan dalam persen, maka untuk kecepatan angin 7,5 m/s.= 11,06 % dan untuk kecepatan angin 4 m/s = 6,97 %

4.5. Optimisasi Daya Prototipe Turbin Angin (Kasus V)

Posisi sudut pitch turbin angin optimum, adalah posisi sudut pitch blade yang mampu menghasilkan produksi daya angin maksimum ketika dikenai kecepatan angin tertentu. Untuk mengetahui posisi sudut pitch blade optimum dievaluasi dengan dua pendekatan. Pendekatan pertama melalui hubungan koefisien daya terhadap kecepatan angin pada posisi sudut pitch blade variatif. Pendekatan kedua melalui hubungan antara RPM terhadap kecepatan angin pada posisi sudut pitch blade variatif. Dari pendekatan pertama diketahui bahwa posisi sudut pitch blade optimum mampu menghasilkan koefisien daya maksimum yang berada pada seluruh rentang kecepatan angin (2,8–7,5) m/s pada posisi sudut pitch blade: 10, 15, dan 20 derajat. Pada kecepatan angin 2,8 m/s, turbin angin dengan posisi sudut pitch blade 10, 15, dan 20 memiliki koefisien daya relatif rendah, tetapi nilai C_p yang dihasilkan berada diatas 0.3. Pendekatan kedua melalui hubungan RPM, kecepatan angin dan posisi sudut pitch blade, dilakukan melalui pendekatan daerah kerja turbin $5^\circ-30^\circ$, nilai sudut pitch optimum berada pada rentang kecepatan angin (2.8-7.5) m/s. TSR maksimum dicapai ketika kecepatan angin 7.5 m/s. dengan posisi sudut pitch $5^\circ-70^\circ$. Adapun untuk posisi sudut pitch blade $75^\circ-90^\circ$, menghasilkan TSR =0. Posisi sudut *pitch* yang mampu menghasilkan putaran maksimum berada pada range $5^\circ-70^\circ$. Koefisien daya turbin angin pada setiap titik kecepatan angin dan sudut pitch blade dihitung melalui hubungan koefisien daya, kecepatan angin dan sudut pitch blade seperti diilustrasikan oleh Gambar (4.22-4.25). Hubungan koefisien daya maksimum terhadap kecepatan angin pada semua posisi sudut pitch blade ditunjukkan oleh Tabel 4.7. Dan hubungan posisi sudut pitch blade optimum dengan variasi kecepatan angin Tabel 4.8.

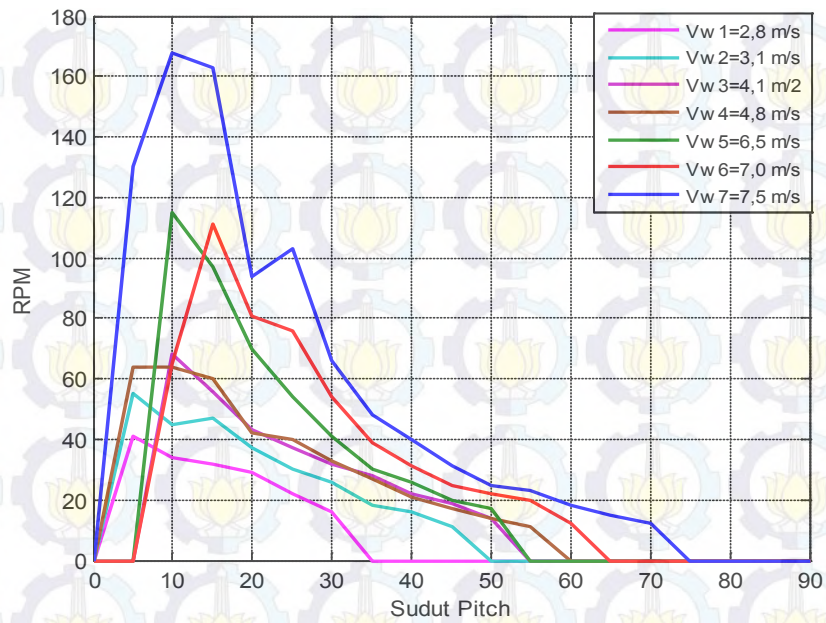


Fig. 4.26. Hubungan posisi sudut pitch blade terhadap RPM prototipe plant-2

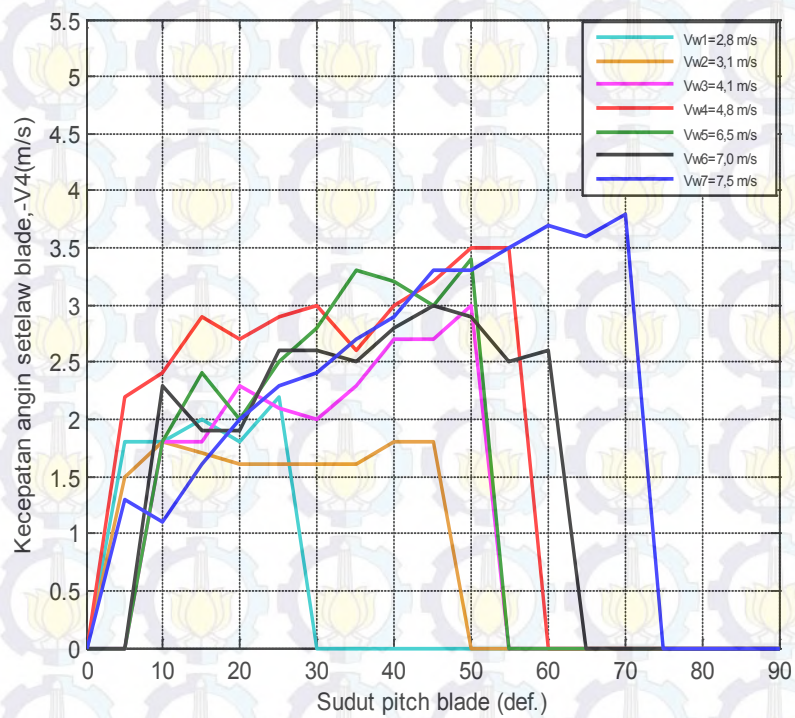


Fig. 4.27. Hubungan Sudut pitch blade terhadap kecepatan angin setelah blade (v_4)

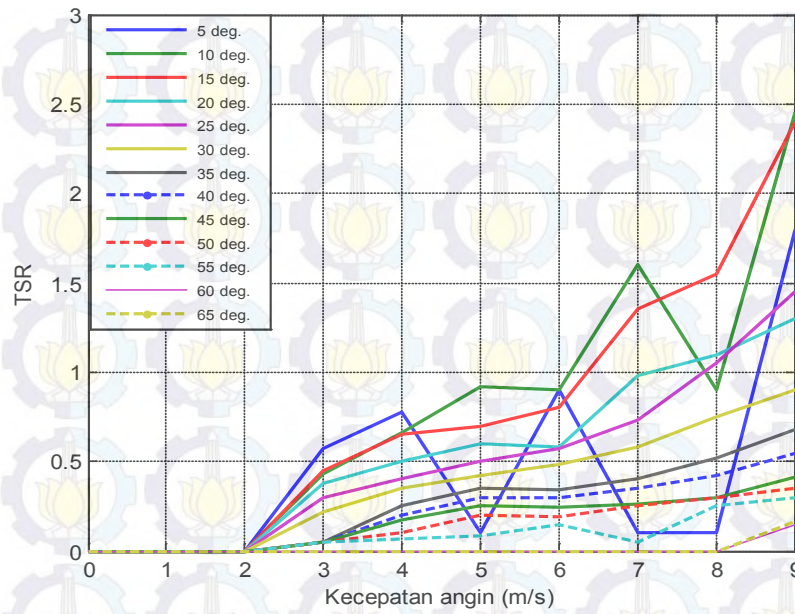


Fig. 4.28. Hubungan kecepatan angin terhadap TSR pada variasi sudut pitch

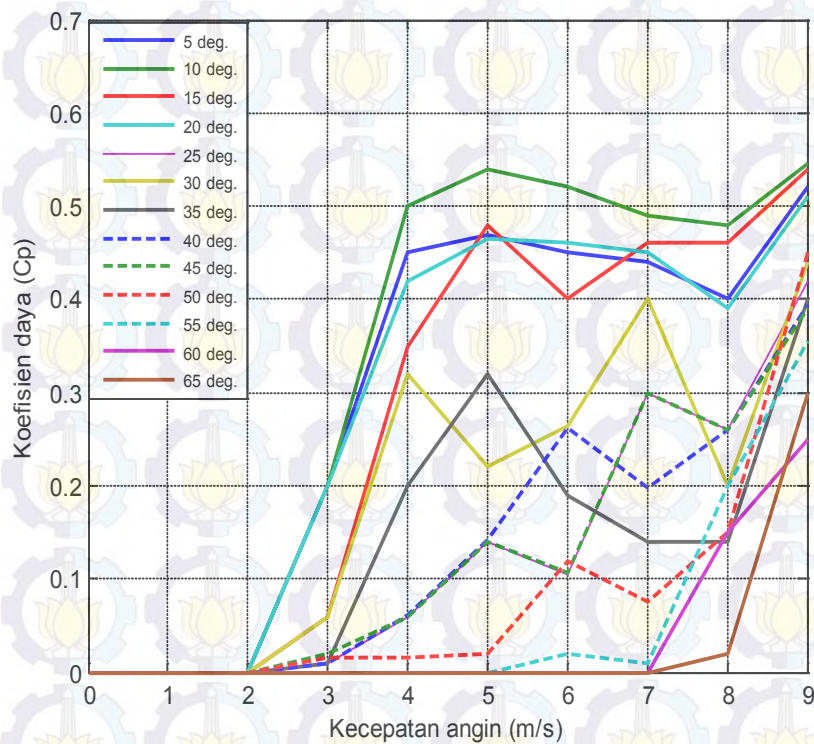


Fig. 4.29. Hubungan kecepatan angin terhadap Cp pada variasi sudut pitch

Diketahui bahwa turbin angin yang dibangun memiliki koefisien daya yang besar, mengingat turbin angin sumbu horizontal umumnya memiliki koefisien daya maksimum dalam kisaran 0,35-0,40. Prototipe turbin angin yang dibangun mampu menghasilkan nilai koefisien daya maksimum berada pada rentang posisi sudut *pitch* blade 10^0 - 20^0 . Ketika kecepatan angin 7.5 m/s dan posisi sudut blade berada pada rentang 10^0 - 15^0 turbin angin mampu menghasilkan $C_p = 0,545$, sedangkan ketika kecepatan angin 7,5 m/s dan ketika sudut *pitch* blade berada pada posisi 20^0 , turbin angin mampu menghasilkan $C_p = 0,510$.

Tabel 4.7. Koefisien Daya Maksimum pada Setiap Posisi Sudut Pitch Blade

Sudut (o)	Nilai C_p maksimum	Kecepatan Angin (m/s)
5	0,523	4,8
10	0,545	7,5
15	0,545	7,5
20	0,510	7,5
25	0,398	4,1
30	0,473	7,5
35	0,435	7,5
40	0,394	7,5
45	0,435	7,5
50	0,435	7,5
55	0,352	7,5
60	0,262	7,5
65	0,308	7,5
70	0,214	7,5

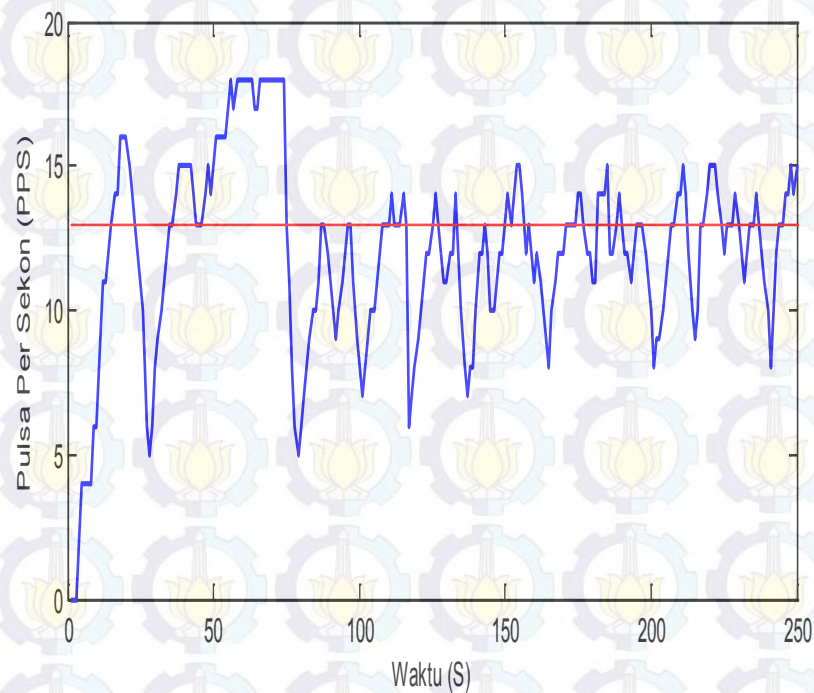
Tabel 4.8. Posisi Sudut Pitch Blade Optimum dengan Variasi Kecepatan Angin

Kecepatan angin (m/s)	Sudut <i>pitch</i> optimum (o)
2,8	10,35
3,8	10,37
4,1	13,10
4,8	10,15
6,5	13,16
7,0	16,19
7,5	10,87

4.6. Kontrol Logika Fuzzy Plant-1 (Kasus VI)

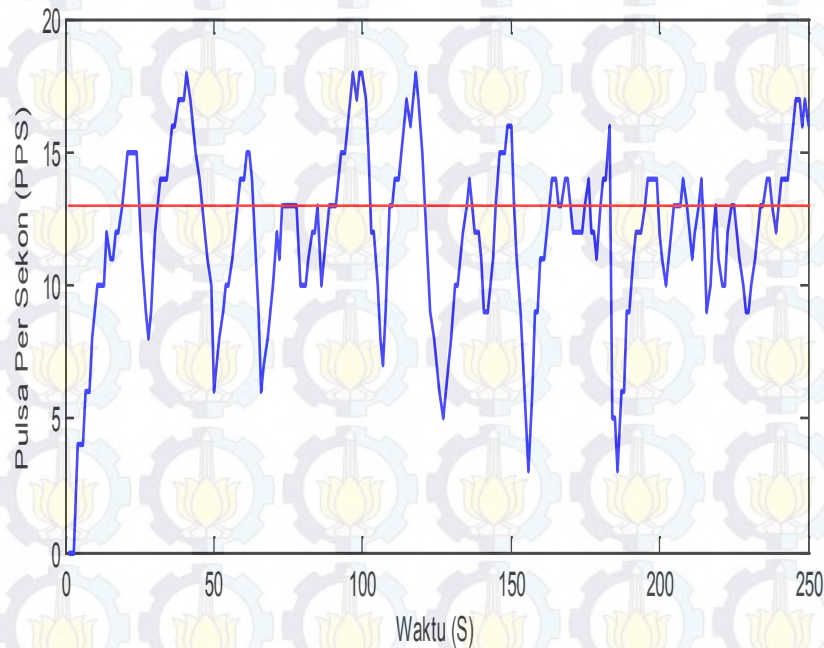
Pengujian sistem kontrol logika fuzzy pada pengendali posisi sudut blade turbin angin dilakukan dengan cara meniupkan angin melalui blower dengan variasi kecepatan angin yang dapat diatur. Pada pengujian sistem turbine angin plant-1a, turbin dikenai kecepatan angin pada range (3,5-5,5) m/s. Respon kecepatan sudut turbin angin yang ditimbulkan oleh perbedaan kecepatan angin sebelum dan sesudah blade direkam. Pada percobaan satu siklus pengamatan disetting dalam durasi 4 menit. Pengujian sistem dilakukan dengan menerapkan kontrol logika fuzzy yang melibatkan fungsi keanggotaan mengacu sudut pitch penuh 0° - 90° yang selanjutnya disebut desain KLF-1a, diikuti pengujian sistem kontrol logika fuzzy dengan range fungsi keanggotaan yang dipilih pada sudut pitch 0° - 62° , selanjutnya disebut desain KLF-1b. KLF-1b merupakan penyempurnaan KLF-1a, atau selanjutnya disebut KLF plant-1.

Pengujian KLF-1a dilakukan dalam tiga keadaan berbeda. Pengujian pertama, turbin angin diberi hembusan angin dengan kecepatan 5 m/s. ditengah-tengah kegiatan pengujian pada detik ke-115 kecepatan angin dikurangi menjadi 4 m/s, keadaan ini dilakukan untuk melihat respon sistem kontrol terhadap gangguan kecepatan angin yang turun. Dari sistem monitor dapat diamati bahwa PPS mengalami penurunan sampai mencapai angka 11 PPS. Pada keadaan tersebut sistem kontrol memberi aksi terhadap turbin angin sehingga sistem kembali menuju titik setimbang yang diilustrasikan oleh Gambar 4.30.

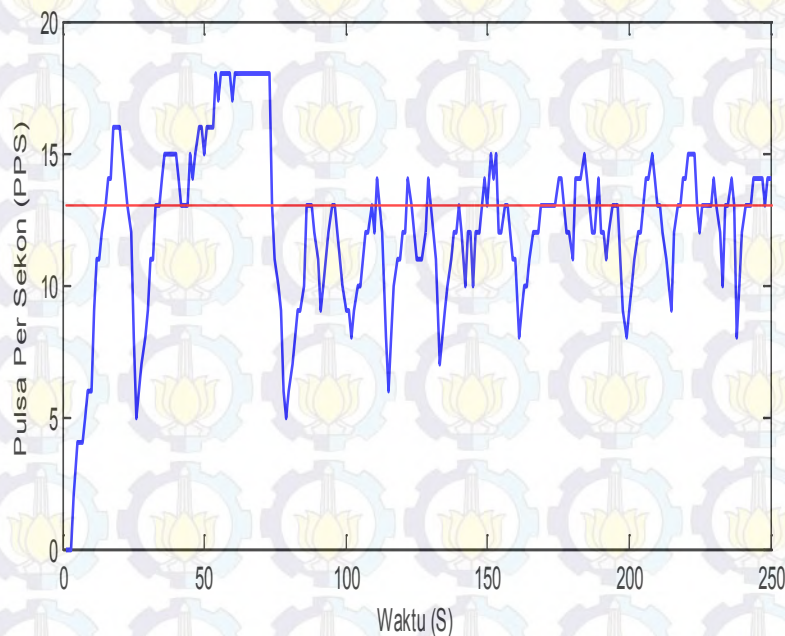


Gambar 4.30. Respon KLF-1a terhadap penurunan kecepatan angin (5-4) m/s.

Gambar 4.31. mengilustrasikan hasil uji sistem dengan memberi perubahan kecepatan angin (4-5) m/s. yang dijalankan pada detik ke-124, pembacaan PPS naik sehingga mencapai nilai 18 PPS dan tetap berosilasi . Pengujian ketiga dilakukan dengan memeberi kecepatan angin secara fluktuativ dengan kecepatan (3,5-5,5) m/s. pada Gambar 4.32. Hasil pengujian menunjukkan sistem tetap berosilasi dan tidak mampu mencapai keadaan mantap.



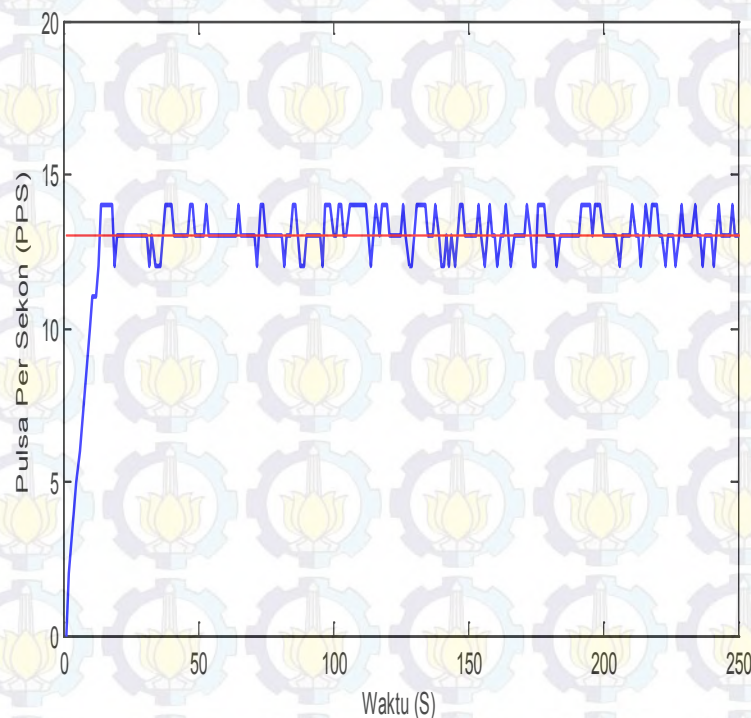
Gambar 4.31. Respon KLF-1a terhadap kenaikan kecepatan angin (4-5) m/s.



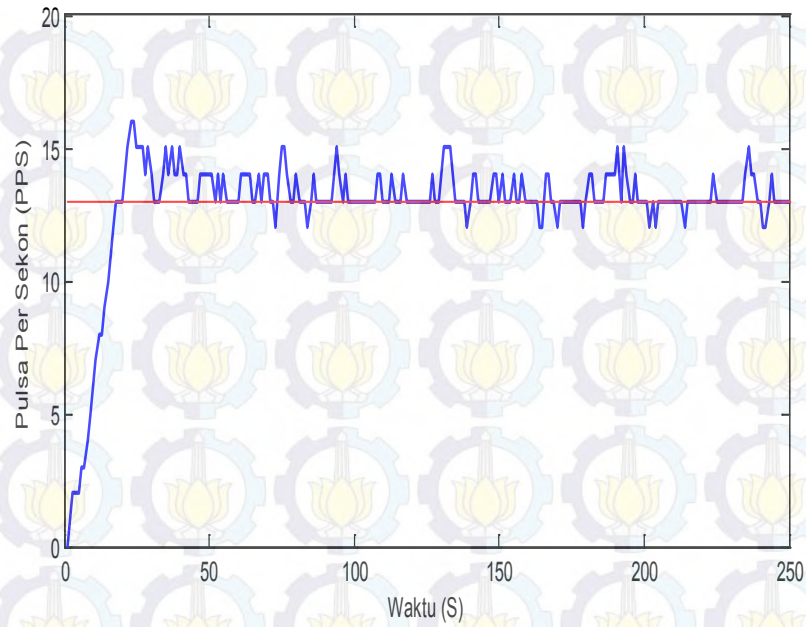
Gambar 4.32. Respon KLF-1a terhadap kecepatan angin fluktuativ (3.5-5.5) m/s.

Pengujian sistem dengan KLF-1b dilakukan dalam tiga keadaan yang sama seperti pada pengujian pada sistem dengan KLF-1a. Pada Gambar 4.33 ditunjukkan hasil pengujian sistem dengan mengubah kecepatan angin (5-4) m/s. Eksekusi perubahan dilakukan pada detik ke-117. Pada keadaan tersebut terjadi penurunan pembacaan mencapai 11 PPS, Setelah keadaan tersebut sistem kontrol melakukan aksi kendali sehingga sistem kembali menuju posisi keadaan mantap. Demikian pula ketika dilakukan pengujian terhadap sistem untuk kenaikan kecepatan angin dari (4-5) m/s, dilakukan eksekusi pada detik ke-132. Sistem memberikan respon seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.34. Pada keadaan tersebut terjadi kenaikan pembacaan PPS hingga mencapai nilai 16. Pada keadaan tersebut sistem kontrol melakukan aksi kendali sehingga sistem mampu menuju keadaan mantap. Pengujian dengan kecepatan angin fluktuatif dilakukan dengan menghembuskan angin pada range antara (3.5-5.5) m/s. Sistem memberi respon seperti terlihat pada Gambar 4.33.

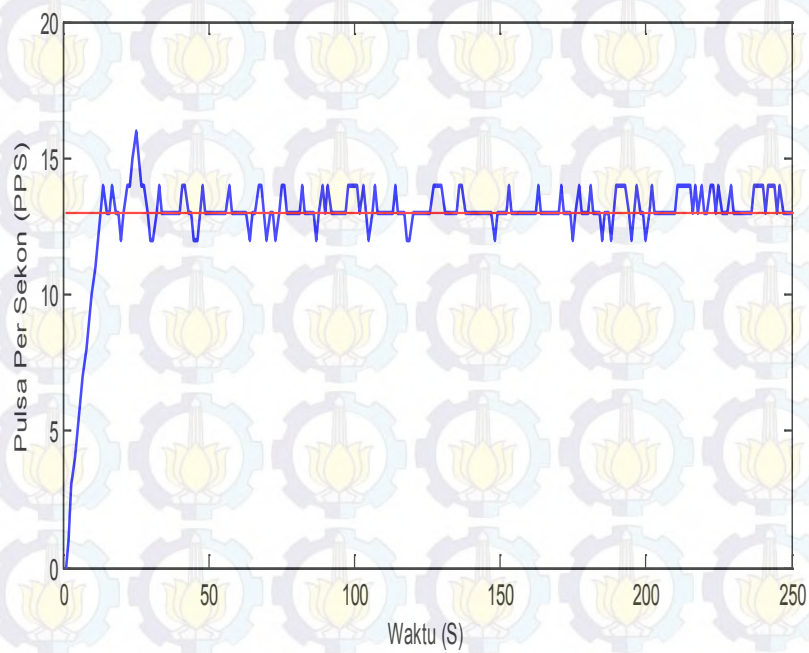
Dari kegiatan pengujian yang telah dilakukan, maka dilakukan analisis terhadap kinerja turbin angin yang meliputi: maksimum overshoot, rise time, settling time, error steady state maupun *integral time absolute error* (ITAE). Adapun kinerja sistem yang meliputi hasil pengujian sistem dengan KLF-1a dan KLF-1b ditunjukkan dalam Tabel 4.9.



Gambar 4.33. Respon KLF-1b terhadap kecepatan angin fluktuasi (3,5 -5,5) m/s



Gambar 4.34. Respon sistem KLF-1b terhadap kenaikan kecepatan angin 4 ke 5 m/s.



Grafik 4.35. Respon KLF-1b terhadap penurunan kecepatan angin (5-4) m/s.

Tabel 4.9. Karakteristik Respon KLF-1a dan KLF-1b

Jenis Kontroler	Rise Time (sec.)	Maximum Overshoot (PPS) %	Settling Time (sec.)	ESS (%)	ITAE
KLF plant-1a	18	5	87	6.61	25016
KLF plant-1b	14	1	20	3.64	328

Rise time adalah waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10 sampai 90 % atau 0 sampai 100 % harga akhir, maximum overshoot adalah harga puncak maksimum dari kurva respon yang diukur dari satu, settling time adalah waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan menetap dalam daerah disekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan persen mutlak dari harga akhir, error steady state (ess) adalah kesalahan dalam keadaan mantap 5 % atau 2%, ITAE adalah integral time absolut error. Dari Tabel 4.9. KLF-1b lebih baik untuk semua kriteria dibanding KLF-1a. KLF-1b memiliki rise time 4 detik lebih cepat, maximum overshoot lebih kecil 4 %, settling time 67 detik lebih cepat dan selisih error steady state mencapai 2.97 %. Kinerja sistem juga terlihat pada ITAE KLF-1a memiliki nilai relatif tinggi 25016 dibandingkan ITAE KLF-1b 328. Sistem KLF-1a belum mampu mencapai keadaan mantap, sehingga dikembangkan KLF-1b. Kinerja sistem KLF-1b, mampu memberi aksi kontrol cepat dan tepat, kriteria kinerja sistem dengan ESS dibawah 5% dapat dicapai dan sistem mampu menuju keadaan mantap. [18].

Koefisien power dapat diperoleh melalui perhitungan yang terkait dengan data kecepatan angin. Pengukuran kecepatan ditentukan pada jarak 2 meter sebelum dan sesudah blade. Pada posisi tersebut kecepatan angin berada pada posisi kecepatan mantap dengan kecepatan angin 5 m/s. dan posisi sudut blade 33.6° dan pembacaan PPS pada sistem turbin angin sama dengan 13 PPS ditetapkan sebagai set poin. Dari eksperimen yang dilakukan diperoleh data pembacaan kecepatan angin rata-rata sebelum dan sesudah blade 5,36 m/s dan 3,42 m/s. Berdasar nilai tersebut maka koefisien power (C_p) diperoleh .

$$C_p = \frac{P1 - P4}{P1} = \frac{(51,330 - 40,002)(\rho \pi R^2)}{51,330 (\rho \pi R^2)} = 0,22$$

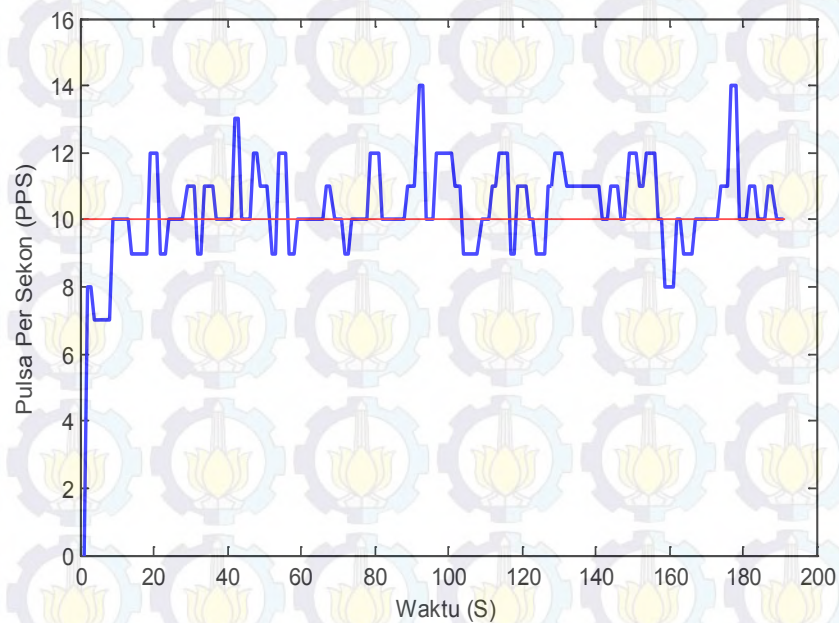
Daya angin yang mampu diekstrak oleh turbin angin untuk kecepatan angin 5 m/s adalah .

$$P = 1/2 \times 1,225(\text{kg/m}^3) \times 0,22 \times 3,14(0,5)^2 \text{ m}^2 \times 5^3 (\text{m/s})^3 = 13,22 \text{ Watt}$$

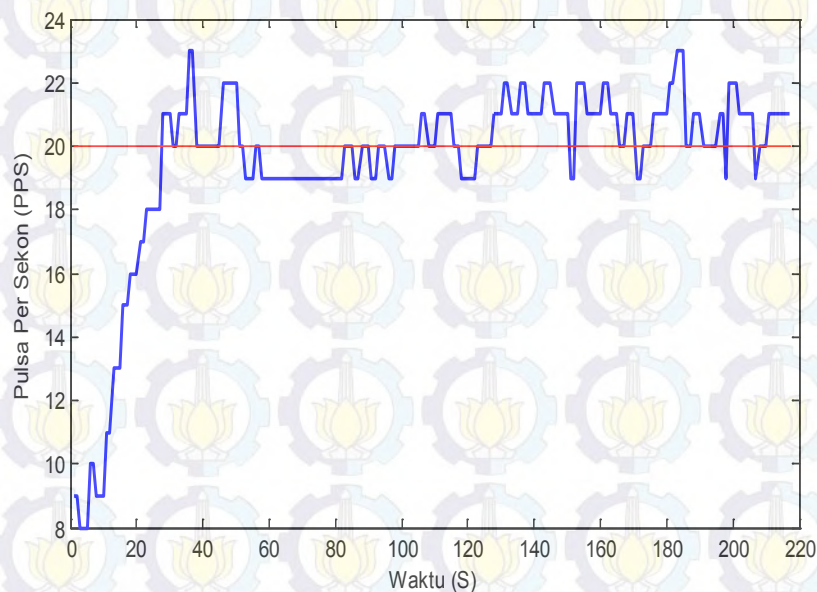
4.7. Kontrol Logika Fuzzy Plant-2 (Kasus VII)

Pengujian turbin angin plant-2 dilakukan pada setpoint sebagai berikut: 10, 20, 30 dan 40 PPS. untuk kecepatan angin dalam range (2,8-7,5) m/s. Pemilihan nilai tersebut dikaitkan dengan kemampuan blower pembangkit kecepatan angin. Ketika sebuah blower disetting dengan mode rendah, maka sistem dapat menghasilkan kecepatan angin 2,8 m/s, ketika blower disetting pada mode medium blower akan menghasilkan kecepatan angin 4 m/s dan ketika blower disetting pada mode tinggi akan menghasilkan kecepatan angin sebesar 7,5 m/s. Gambar 4.32. menampilkan respon sistem turbin angin yang masih banyak mengalami osilasi dibandingkan ketiga gambar yang lain, 4.33, 4.34. dan 4.35. Keadaan tersebut

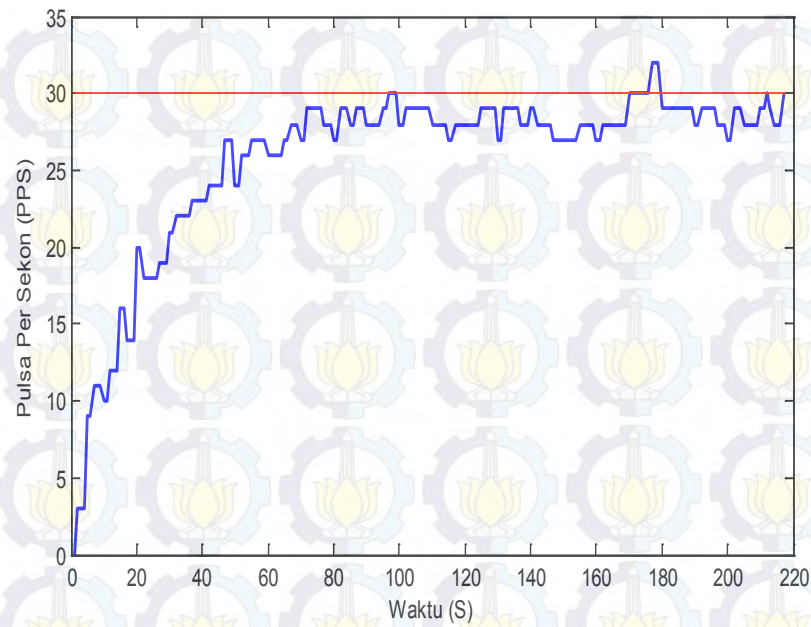
disebabkan oleh penggambaran skala error yang tampak pada setpoint rendah. Pada gambar yang lebih detail besarnya osilasi sistem tampak lebih besar. Meskipun demikian nilai kesalahan pada beberapa kondisi respon sistem diatas, nilainya hampir sama. Nilai kesalahan tersebut terjadi disebabkan oleh fungsi keanggotaan zero pada sistem KLF yang memiliki rentang antara -2 sampai 2 PPS. Rentang nilai tersebut diambil berdasarkan pada kegiatan penelitian yang telah dilakukan secara terus menerus dan berulang sehingga dapat diperoleh nilai yang optimum.



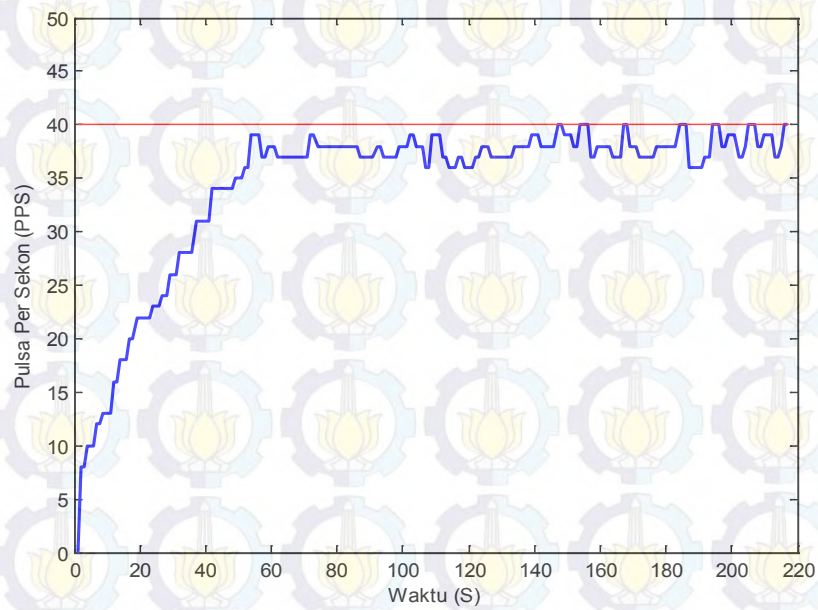
Gambar 4.36. Respon KLF plant-2 pada setpoint 10 PPS



Gambar 4.37. Respon KLF plant-2 pada setpoint 20 PPS



Gambar 4.38. Respon KLF plant-2 pada setpoint 30 PPS

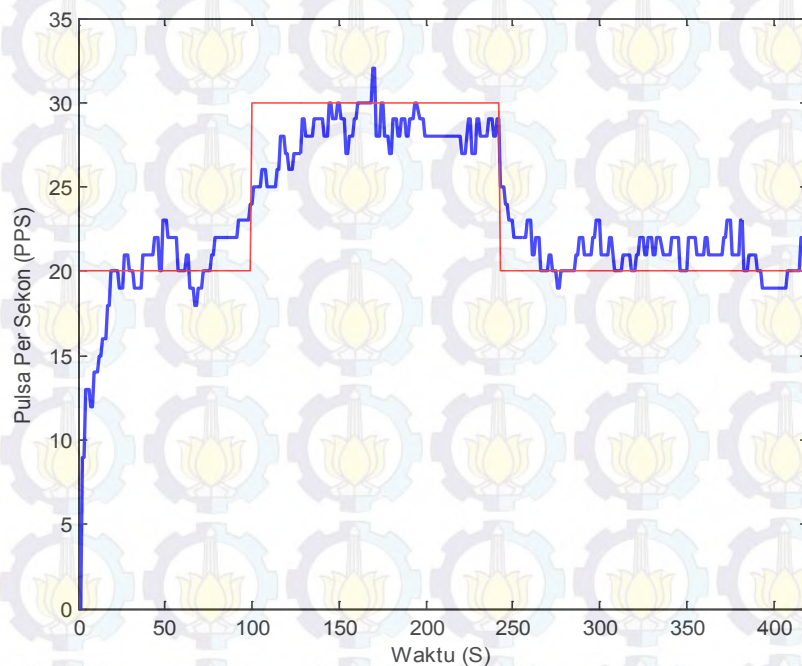


Gambar 4.39. Respon KLF plant-2 pada setpoint 40 PPS

Tabel 4.10. Karakteristik Respon Kontrol Logika Fuzzy Plant-2

Setpoin (pps)	Rise Time (sec.)	Maximum Overshoot (%)	Settling Time (sec.)	ESS (%)	ITAE
10	20	20	22	8,57	10875
20	22	5	32	4,18	10925
30	100	0	60	4,65	30887
40	50	0	55	4,56	39275

Ujian *tracking* sistem turbin angin merupakan bagian dari pengujian kontrol logika fuzzy secara menyeluruh. Apabila dua parameter lewatan maksimum dan kesalahan mantap sudah kecil, maka pengujian dianggap berhasil. Pengujian dilakukan dengan cara mengubah nilai setpoint, ketika sistem telah mampu mencapai keadaan mantap. Maka setpoint yang ditetapkan (20-30) PSS. Untuk mengetahui kinerja sistem yang lebih lengkap ketika terjadi perubahan beban dan ketika sistem mengalami perubahan set poin (20-30) PPS, maka kecepatan angin juga diubah dari (6,5-7,0) m/s. dan untuk perubahan set poin dari (30–20) PPS. kecepatan angin dibuat tetap 7 m/s. Hasil uji kinerja setpoint *tracking* ditampilkan Gambar 4.40. Berdasarkan Gambar 4.40. kontrol logika fuzzy plant-2 mampu mengikuti setpoint yang diberikan. Waktu yang diperlukan untuk melewati lintasan naik setpoint (20-30) PPS, KLF memerlukan waktu lebih lama dibanding pada kondisi turun dari (30-20) PPS. Kondisi tersebut disebabkan oleh ketersediaan energi aktuator yang diperlukan untuk merespon sistem nilainya lebih besar dibanding ketika terjadi penurunan kecepatan sudut. Kontrol logika fuzzy memerlukan energi lebih besar ketika terjadi peningkatan kecepatan angin, pada keadaan tersebut diperlukan energi lebih besar untuk memutar posisi sudut pitch blade turbin angin. Sehingga waktu yang diperlukan untuk menurunkan setpoint dari (30-20) PPS lebih cepat.



Gambar. 4.40. Respon KLF plant-2 terhadap tracking (20-30) PPS

Tabel 4.11. Karakteristik Respon FLC-3 Uji Traking

Jenis Pengujian (pps)	Rise Time (sec.)	Max. Overshoot (%)	Settling Time (sec.)	ESS (%)	ITAE
0-20	25	5	25	5,00	25
20-30	50	10	52	6,61	140
30-20	20	5	22	2,50	80

Dengan merekam parameter kecepatan angin sebelum dan sesudah blade, kecepatan sudut dan posisi sudut, maka C_p turbin angin dapat ditebelkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12. Hubungan posisi sudut pitch dan koefisien daya turbin angin

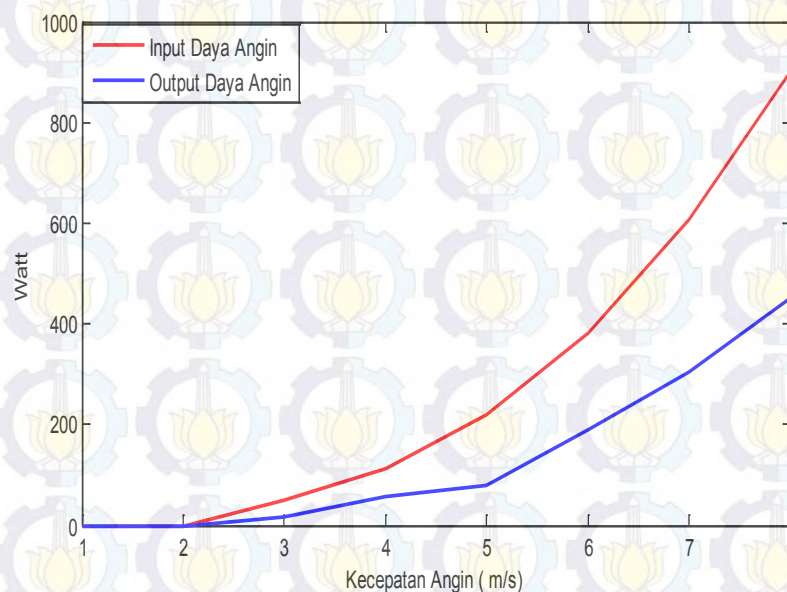
Sudut (°)	Koefisien Daya (C_p)	Kecepatan Angin sebelum blade (m/s)	Kecepatan Angin setelah blade (m/s)
5	0,545	7,5	1,1
10	0,545	7,5	1,2
15	0,545	7,5	1,1
20	0,510	7,5	1,6
25	0,398	7,5	2,0

Produksi daya angin maksimum turbin angin plant- 2 dapat diperoleh sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho_{air} C_p A_r V_w^3$$

$$= \frac{1}{2} \times 1,225 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 0,545 \times 3,14 \text{ (m}^2\text{)} \times (7,5)^3 \text{ (m/s)}^3 = 426 \text{ Watt}$$

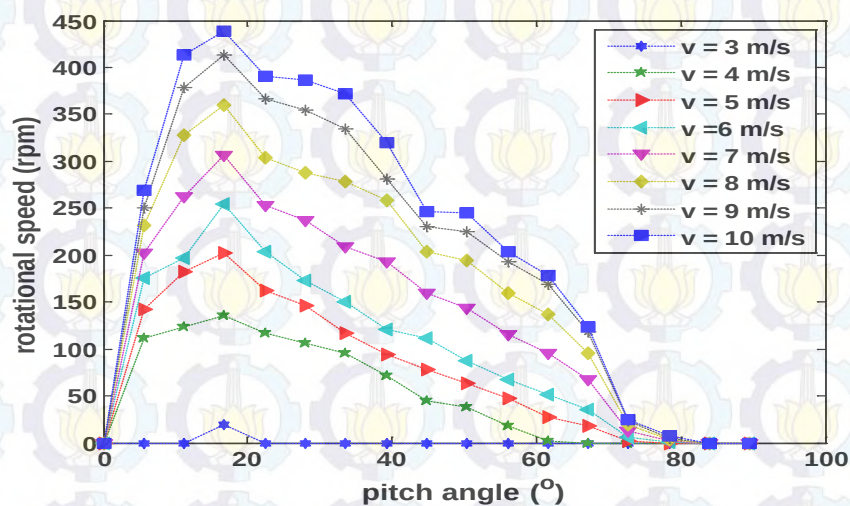
Gambaran umum energi angin yang mampu diekstrak oleh turbin angin plant-2 dengan C_p maksimum (0,545) dan kecepatan angin 7,5 m/s ditunjukkan oleh Gambar 4.41.



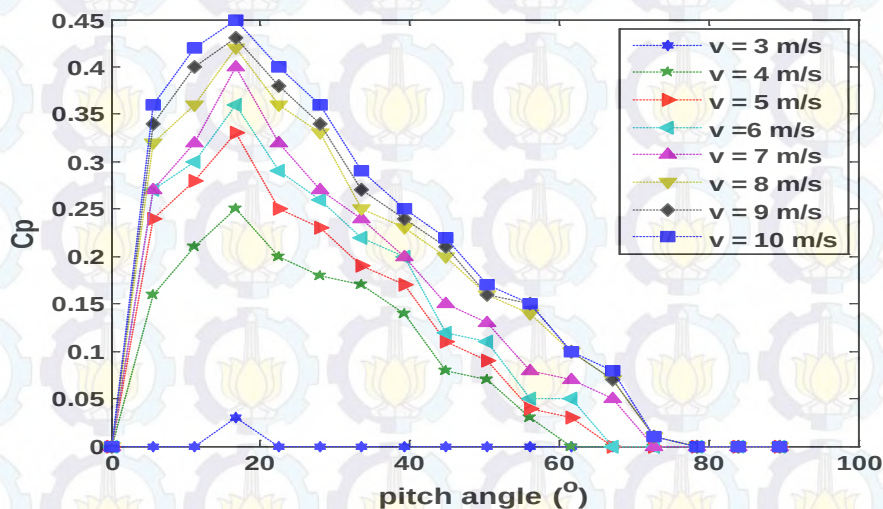
Gambar 4.41. Hubungan kecepatan angin terhadap produksi daya angin plant-2

4.8. Instalasi Turbin Angin di Surabaya (Kasus VIII)

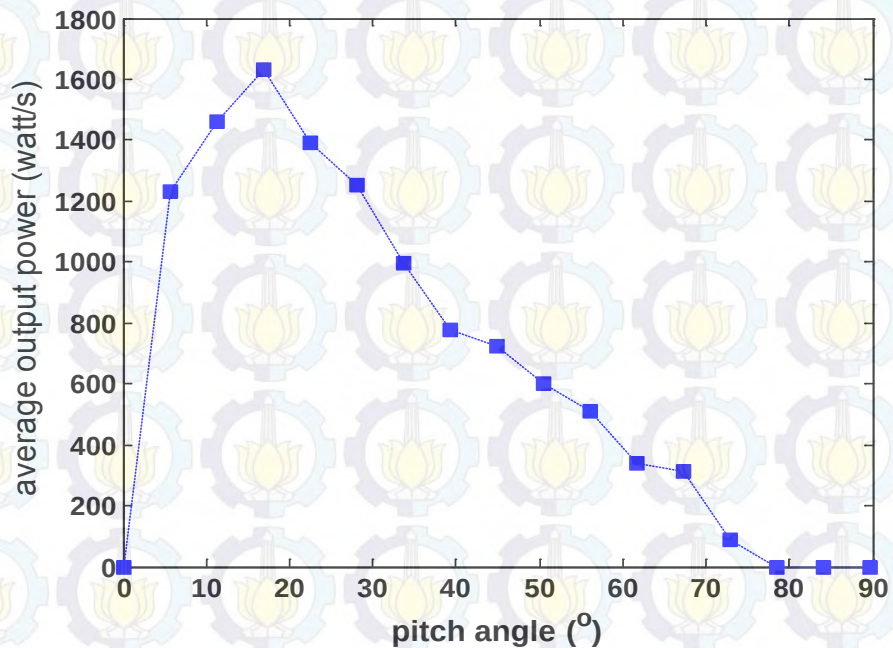
Hasil pengujian prototipe SKEA yang telah dibangun meliputi: prototipe plant-1 dan prototipe plant-2 dengan kecepatan angin bervariasi 1-10 m/s. berasal dari ladang angin Surabaya. Hembusan angin diberikan pada variasi posisi sudut blade dan kecepatan angin, menghasilkan kecepatan rotasi (RPM) terekam dalam sistem ditunjukkan oleh Gambar 4.42. Diketahui bahwa ketika turbin angin mendapat kecepatan angin rendah < 2 m/s, turbin angin belum mampu menghasilkan kecepatan rotasi. Hasil kecepatan rotasi dilaporkan untuk variasi kecepatan angin dan posisi sudut pitch. Turbin angin memiliki kecepatan rotasi signifikan pada tiupan angin antara 3-10 m/s. Koefisien C_p dengan variasi posisi sudut pitch blade turbin angin diilustrasikan oleh Gambar 4.42. Hubungan produksi daya dan posisi sudut diilustrasikan Gambar 4.43.



Gambar 4.42. Kecepatan rotasi turbin angin terhadap kecepatan angin plant-1

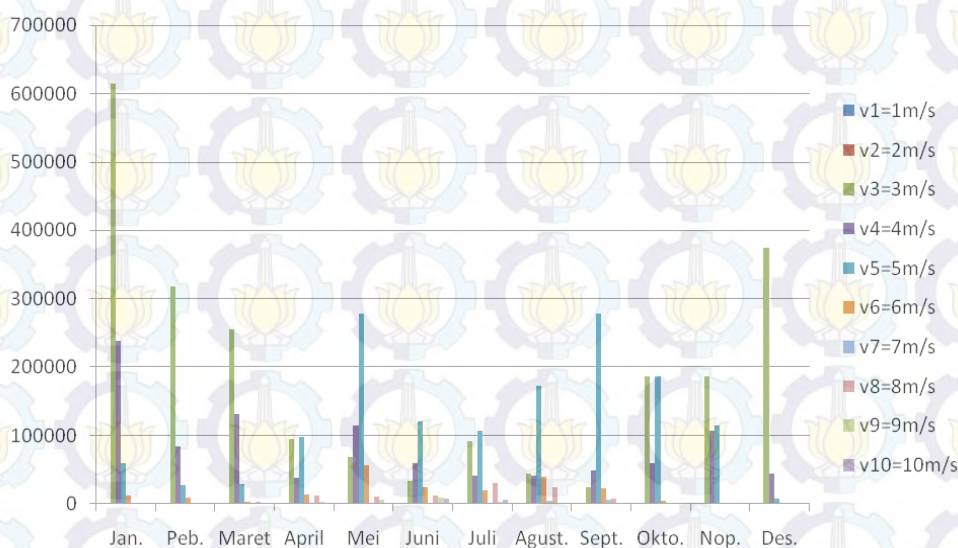


Gambar 4.43. Koefisien daya terhadap posisi sudut blade plant-1



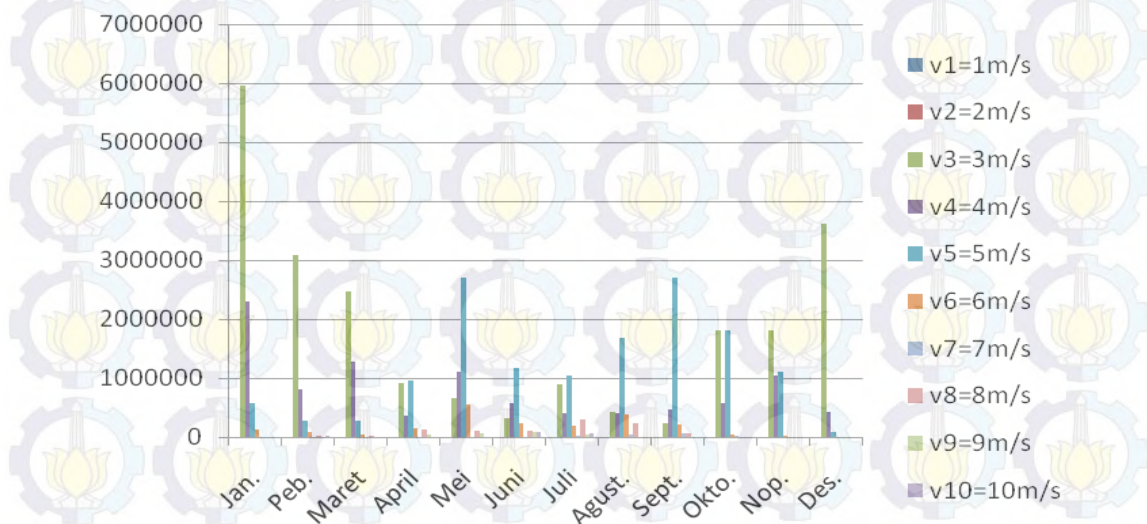
Gambar 4.44. Keluaran daya rerata terhadap posisi sudut blade plant-1

Gambar 4.45. mengilustrasikan produksi daya angin bulanan plant-1 yang diinstalasi pada ladang angin Surabaya. Oleh karena ladang angin memiliki kecepatan angin dominan >2 m/s. maka produksi daya angin maksimum dikontribusi oleh kecepatan angin 3 m/s. pada bulan Januari, Pebruari dan Desember, disusul kecepatan angin 5 m/s pada bulan Mei dan September. Produksi daya angin terbesar mencapai 600.000 watt/bulan.



Gambar 4.45. Produksi daya angin bulanan plant-1 untuk ladang angin Surabaya (Watt)

Gambar 4.46. mengilustrasikan produksi daya angin bulanan plant-2 yang diinstalasi pada ladang angin Surabaya. Pada kecepatan angin dominan produksi daya angin dikontribusi oleh kecepatan angin 3 m/s. pada bulan Januari, Pebruari dan Desember, disusul kecepatan angin 5 m/s pada bulan Mei dan September. Pada bulan Januari kecepatan angin 3m/s berkontribusi daya angin mencapai 6000.000 watt, atau 6000 kWatt.



Gambar 4.46. Produksi daya angin bulanan plant-1 untuk ladang angin Surabaya (Watt)

Tabel 4.13. menampilkan produksi daya angin plant-1, dengan variasi C_p maksimum 0,225 nilai C_p menengah 0,15 dan C_p terendah 0,10. Turbin angin yang dirancang menggunakan generator listrik dengan efisiensi 60 %, dan elektronika daya buck konverter memiliki efisiensi 30 %, maka produksi listrik ditampilkan pada tabel 4.16.

Tabel 4.13. Produksi daya angin pada plant-1 dengan C_p variatif Tiap Bulan

No.	Bulan	P(kWh) untuk $C_p=0,23$	P(kWh) untuk $C_p=0,15$	P(kWh) untuk $C_p=0,10$
1.	Januari	926	617	411
2.	Pebruari	442	294	196
3.	Maret	423	282	188
4.	April	262	175	117
5.	Mei	536	357	238
6.	Juni	269	179	119
7.	Juli	302	201	134
8.	Agustus	329	220	146
9.	September	389	259	173
10.	Oktober	440	293	196
11.	Nopember	410	274	182
12.	Desember	428	285	190
Jumlah		5155	3447	2291

Tabel 4.14. Produksi daya listrik pada plant-1 dengan C_p variatif Tiap Bulan

No.	Bulan	P (kWh) untuk $C_p=0,23$	P (kWh) untuk $C_p=0,15$	P (kWh) untuk $C_p=0,10$
1.	Januari	167	111	74
2.	Pebruari	79	53	35
3.	Maret	76	51	34
4.	April	47	31	21
5.	Mei	96	64	43
6.	Juni	48	32	21
7.	Juli	54	36	24
8.	Agustus	59	40	26
9.	September	70	47	31
10.	Oktober	79	53	35
11.	Nopember	74	49	33
12.	Desember	77	51	34
Jumlah		773	516	344

Tabel 4.15. Produksi daya angin pada plant-2 dengan C_p variatif Tiap Bulan

No.	Bulan	P (kWh) untuk $C_p=0,545$	P (kWh) untuk $C_p=0,40$	P (kWh) untuk $C_p=0,225$
1.	Januari	8968	6538	3703
2.	Pebruari	4278	3140	1766
3.	Maret	4102	3011	1693
4.	April	2541	1865	1049
5.	Mei	5190	3809	2143
6.	Juni	2602	1910	1074
7.	Juli	2925	2147	1208
8.	Agustus	3192	2343	1318
9.	September	3767	2765	1555
10.	Oktober	4264	3129	1760
11.	Nopember	3977	2919	1664
12.	Desember	4144	3042	1711
Jumlah		49951	36661	20622

Tabel 4.16. Produksi daya listrik pada plant-1 dengan C_p variatif Tiap Bulan

No.	Bulan	P (kWh) Untuk $C_p=0,545$	P (kWh) Untuk $C_p=0,40$	P (kWh) Untuk $C_p=0,225$
1.	Januari	1614	1186	666
2.	Pebruari	770	565	318
3.	Maret	738	542	305
4.	April	457	336	189
5.	Mei	934	686	386
6.	Juni	468	344	193
7.	Juli	527	386	217
8.	Agustus	575	422	237
9.	September	678	498	280
10.	Oktober	767	563	317
11.	Nopember	716	548	308
12.	Desember	746	548	308
Jumlah		7496	5499	3093

Produksi daya listrik bulanan oleh plant-1, nilai maksimumnya berada pada bulan Januari sebesar 167 kWh/bulan pada bulan Januari, dan terendah pada bulan April sebesar 47 kWh/bulan, untuk C_p maksimum. dan untuk C_p minimum nilai daya terbesar berada pada bulan Januari sebesar 74 kWh/bulan dan produksi daya terendah pada bulan April dan Juni sebesar 21 kWh/bulan. Produksi daya listrik bulanan oleh plant-2, nilai maksimumnya berada pada bulan Januari sebesar 1614 kWh/bulan dan terendah pada bulan April sebesar 457 kWh/bulan, untuk C_p maksimum. Pada nilai C_p terendah, produksi daya maksimum berada pada bulan Januari sebesar 666 kWh/bulan, dan C_p terendah pada bulan Juni sebesar 189 kWh/bulan. Perbedaan Produksi daya listrik maksimum Plant-1 dibanding plant-2 adalah 167 kWh/bulan dibanding 1614 kWh/bulan, atau kurang lebih 1:10, adapun perbedaan produksi daya minimum dari plant-1 dibanding plant-2 adalah 666 kWh/bulan dibanding 74 kWh/bulan atau dengan perbandingan 9:1.

V. Kesimpulan

Berdasar penelitian evaluasi data cuaca, peramalan kecepatan angin dan arah angin, disain optimum turbin angin, penerapan kontrol logika fuzzy dan instalasi turbin angin pada ladang angin maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Evaluasi data kecepatan angin (kasus I) pada ladang angin Sampang, Mojokerto dan Nganjuk. Diketahui bahwa ladang angin Nganjuk memiliki kecepatan angin rata-rata terbesar = 4,1 m/s dan nilai ketidakpastian pengukuran = 0,171, faktor cakupan =2 dan tingkat kepercayaan = 95 %. Sehingga ladang angin Nganjuk memiliki potensi terbesar untuk instalasi turbin angin
2. Peramalan kecepatan angin pada (plan-1) pada lokasi Nganjuk dengan JST yang memiliki tiga input dan satu output dinilai berhasil yang diindikasikan oleh hasil uji nilai RSME = 0,017 dan nilai VAF= 99,10 dengan epochs=286.
3. Peramalan kecepatan angin pada (plan-2) pada lokasi Karangates-Malang dengan JST yang memiliki tiga input dan dua output dinilai berhasil yang diindikasikan oleh nilai RSME pengujian untuk kecepatan angin = 0,06 dan nilai VAF= 75,73 dengan epochs=700 dan untuk arah angin nilai RSME = 0,11 dan VAF=80,50 dengan epochs = 700
4. Hasil desain turbin angin dengan simulasi mampu menghasilkan nilai $C_p=0,59$ dan mampu menghasilkan daya angin = 479 watt/s pada kecepatan angin 7,5 m/s. dan =373 watt/s untuk kecepatan angin 4 m/s.
5. Hasil pengujian protipe turbin angin mampu menghasilkan nilai $C_p=0,545$ dan mampu menghasilkan daya angin = 426 watt/s pada kecepatan angin 7,5 m/s. dan =345 watt/s untuk kecepatan angin 4 m/s.
6. Aplikasi kontrol logika fuzzy pada plant-1 mampu menghasilkan koefisien daya=0,22 dan kinerja sistem kontrol dapat mencapai kesetabilan yang diindikasikan : oleh nilai lewatan maksimum dalam waktu 14 detik, maksimum overshoot 1 %, *error steady state* 3,64 % dan ITAE=328.
7. Aplikasi kontrol logika fuzzy pada plant-2 mampu menghasilkan koefisien daya maksimum pada set poin 10-40 PSS variasi dengan $C_p = 0,545$ dan kinerja sistem kontrol dapat mencapai kesetabilan yang diindikasikan oleh nilai lewatan maksimum tekecil = 20 detik, maksimum overshoot 5 %, *error steady state* 4,18 % dan ITAE =10875. Respon untuk uji tracking dengan set poin variasi 0-30, menghasilkan

lewatan maksimum 25 detik, overshoot maksimum = 5 %, *error steady state* = 2,5 % dan ITAE = 25.

8. Turbin angin plant-1 mampu menghasilkan produksi daya angin maksimum = 167 kWh/bulan pada nilai C_p maksimum, dan = 74 kWh/bulan pada nilai C_p minimum. Turbin angin plant-2 mampu menghasilkan daya angin maksimum = 1614 kWh/bulan pada nilai C_p maksimum dan daya angin minimum = 457 kWh/bulan, untuk nilai C_p minimum.

Apabila Produksi daya maksimum Plan-1 dibanding dengan plant-2, maka diperoleh 167 kWh/bulan dibanding 1614 kWh/bulan, kurang lebih 1:10, adapun perbedaan produksi daya minimum dari plant-1 dibanding dengan plant-2 adalah : 74 kWh/bulan dibanding 666 kWh/bulan atau dengan perbandingan 1:9.

Daftar Lampiran :

Lampiran -1. Spesifikasi Prototipe Turbin Angin Plant-1

Spesifikasi
Blade
Span = 50 cm
Blade = 3
Airfoil = NACA 0012
Blade Shaft = Stainless Steel, $\varnothing$ 1 cm, l = 10 cm
Material = Nylon PE 1000
Servo
Motor Servo = GWS Servo S03
Dimensi: p = 4,05 cm, l= 2 cm, h=3,8 cm
Tegangan = 6 VDC (max)
Power Suplay = 6 V
Berat = 45 gr.
Torsi = 3,4 kg-cm
Gear Servo = Nylon, $\varnothing$ 1cm, l=1,5 cm.
Center Plate
$\varnothing$ 18 cm, t = 1 cm,
Bahan = Teflon
Rotor Shaft
Pipa Stainless Steel, $\varnothing$ 1,5 cm, t = 2 mm, p = 30 cm
Main Plate
$\varnothing$ 40 cm, t=0,3 cm
Bahan = Plat Besi
Tiang Penyangga
Pipa besi $\varnothing$ 8 cm, t=0,15 cm
Kaki
$\varnothing$ 50 cm, t=0,10 cm
Bahan = plat besi
Rational Centre
2 buah Slip Carbon Brusher
Merk : Bosch

Lampiran - 2. Spesifikasi Prototipe Turbin Angin Plant-2

Spesifikasi	
Rotor Blade	
Span = 85 cm	
Blade = 3	
Airfoil = non-uniform NREL, S835 (root), S833 (primary), S834 (tip) Tapered, no-twist.	
Blade Shaft = Stainless Steel, $\varnothing$ 10 mm, l = 15 cm	
Material = Fiberglass	
Pitch Setting	
Motor Servo = GWS Servo S125-1T/2BB/F 360 Deg	
Driver = Microcontroller ATmega8535L	
Angle rotation = 360°	
Power Suplay = 6 V	
Torque = 6.60 N m.	
Gear box = Nylon, 1:1.25	
Rotary Sensor	
Rotary Encoder = Relative, 20 slate, $\varnothing$ 40 mm	
PhotoInterrupter = Sharp GP1S53, 5 mm gap,	
IR (Tx) Phototransistor (Rx)	
Center Plate & Hub Cover	
Center Plate, t = 20 mm, $\varnothing$ 28 cm	
Material = Poly Vinyl Chloride (PVC) Grey	
Hub Cover Material = Fiberglass	
Rotor Shaft	
Stainless Steel, $\varnothing$ 15 mm, t = 2 mm, l = 55 cm	
Shaft holder = bearing NTN 6203LU	
Rotary Connector	
Carbon Brush Holder = Bosch dan Black Dekker	
Carbon Brush = Makita	

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nama : Ir. Ali Musyafa', M Sc.
NIP : 19600901 198701 1 001
Tempat dan Tanggal Lahir : Jombang, 01 September 1960
Agama : Islam
Golongan / Pangkat : Pembina Utama Muda (IV/c)
Jabatan Fungsional Akademik : Lektor Kepala
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Alamat Kantor : Jl. Arif Rahman Hakim, Keputih Sukolilo Surabaya
Telp./Faks. : 031-5947188
Alamat Rumah : Jl. Teknik Sipil V-11
Perum ITS Keputih Sukolilo, Surabaya, 60111
Telp./Faks.: 03-5966138
Alamat e-mail : musyafa@ep.its.ac.id
alimusyafa@yahoo.com

Nama Istri : Irawati Agustin, S Si.
Nama Anak : 1. Muhammad Bahrudin Majid
2. Tajuddin Ahmad Rafi'

Riwayat Pendidikan Formal :

- Institut Teknologi Sepuluh Nopember, S-3 Teknik Elektro, 2012
- Institut Teknologi Bandung, Bandung, S-2 Teknik Elektro, 1990
- Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, S-1 Teknik Fisika, 1986
- SMA PGRI Jombang, 1981
- Pendidikan Administrasi Keuangan (Beasiswa, SCF-UK) 1976-1977.
- SMP Muhammadiyah Jombang, 1975
- SD Muhammadiyah, Jambu-Jombang, 1972.

Riwayat Pekerjaan :

1986 - Sekarang : Dosen Jurusan Teknik Fisika ITS
1992 - 1994 : Peneliti pada ASEAN-EC Energy Management Training and Research Centre (AEMTRC) Jakarta.

Penelitian :

Publikasi hasil penelitian di Jurnal Nasional Terakreditasi:

- [1]. **A. Musyafa'**, I Made Yulistya Negara, Imam Robandi, 2011" Wind-Electric Power Potential Assessment for Three Locations in East Java-Indonesia " . *The Journal Technology and Science*, IPTEK. Vol.22 . No.3 Published, August 2011.
- [2]. **A.Musyafa'**, I.M.Y.Negara, Imam Robndi , " Design of Pitch Angle wind Turbine Position for Maximum Energy Extract in Small Scale Wind Energy Conversion System,Jurnal Telkomnika, *Proses review*.

Publikasi hasil penelitian di Jurnal Internasional :

- [1].**A.Musyafa'**, A.Harika, I.M.Y.Negara, Imam Robandi,2010, "Pitch Angle Control of Variable Low Rated Speed Wind Turbine Using Fuzzy Logic Control" *International Journal Of Engineering & Technology IJET-IJENS* Vol:10 No:05, pp.21-24. (ISSN : 2077-1185)., *Published, October 2010*
- [2]. **A.Musyafa'**, I.M.Y.Negara, Imam Robandi " Design Optimal of Adaptive Control and Fuzzy Logic Control on Torque-Shaft Small Scale Wind Turbine" , 2011, *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*, CJEEE Vol. 2 No.6, pp. 202-208. (ISSN : 1923-0540). *Published, June 2011*
- [3].**A.Musyafa'**, I.M.Y.Negara, Imam Robandi "Design Optimal in Pitch-Controlled Variable-Speed under rated wind speed WECS using Fuzzy Logic Control " , Australian journal of Basic and Applied Science (AJBAS), (*Indexed Scopus & Thomson R.*)(ISSN: 1991-8178. *Published August 2011*.
- [4]. **A.Musyafa'**, I.M.Y.Negara, Imam Robandi " A wind turbine for low rated wind speed region in East Java" IJAR,Azerbaijan (ISSN: 2075-4124) (*Indexed Thomson Reuters etc.* ISSN: 2075-4124,E-ISSN: 2075-7107, *Published, September 2011*.
- [5]. **A.Musyafa'**, I.M.Y.Negara, Imam Robandi " Power Maximization Fuzzy Logic Control of Small Scale Wind Turbine Using Permanent Magnet Synchronous Generator , IREE (*Indexed Scopus& Thomson* , *Submit 30 Juni 2011, surat pemberitahuan papaer terkirim, 2 Juli 2011*) (ISSN : 1827-6660). *proses review*.

Publikasi hasil penelitian di Seminar Nasional :

- [1]. **A.Musyafa'**, Agus Dharma, I.Made Yulistiya Negara, Imam Robandi, Wind Energy potential Assasment in three location: Sampang, Mojokerto and Nganjuk –East Java./ Kajian Potensi Tenaga Angin di Tiga Lokasi, Sampang, Mojokerto dan Nganjuk di Jawa Timur, Proceeding National conference , Fakultas Teknologi Industri – ITS Surabaya, Juli 2009,pp.A-07,1-8.
- [2]. Soedibyo, **A. Musyafa'**, Imam Robandi, M Ashari, Modeling and Microhydro power plant control type Run of river./ Pemodelan Dan Pengendalian Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Jenis *Run Of River*, Proceedings National session of Conference on Information Technology and Electrical Engineering, Yogyakarta, 4 August 2009, pp.82-86.
- [3] **A.Musyafa'**, Soedibjo, I.Made Yulistiya Negara, Imam Robandi, Design of pitch angle fuzzy logic control of speed variable wind turbine / Perancangan Kontrol Logika Fuzy Sudut Angguk Sebagai Variabel Kecepatan Turbin Angin, Prosiding Seminar Nasional Pascasarjana IX, Agustus 2009,pp.ELK-22,1-6

- [4]. **A. Musyafa'**, Agus Dharma, Imam Robandi, Measurement Uncertainty of wind speed condition in three location in East Java, Proceedings The 10th Seminar On Intelligent Technology and Its Application " Surabaya 14th October 2009, pp.080.1-6.
- [5]. **A Musyafa'**, Husna, I.Made Yulistiya Negara, Imam Robandi," Fuzzy PID Controller for Shaft Torque Wind Turbine" Proceedings of National Seminar on AppliedTechnology,Science, and Arts (1st APTECS), Surabaya 22 Dec.2009, ISSN 2086-1931. Pp.3-..
- [6]. **A. Musyafa'**, Agus Dharma, I.Made Yulistiya Negara, Imam Robandi, " Maximum Power Point Tracking Using PID and Fuzzy Logic Control for Grid-Connected Photovoltaic System" Proceedings of National Seminar on AppliedTechnology,Science, and Arts (1st APTECS), Surabaya 22 Dec.2009, ISSN 2086-1931. Pp.5 -..
- [7]. Tamaji, **A. Musyafa'**, Agus Dharma, Imam Robandi," Controller Design SMIB by Direct Feedback Linierization" Proceedings of National Seminar on AppliedTechnology,Science, and Arts (1st APTECS), Surabaya 22 Dec.2009, ISSN 2086-1931. Pp.25 -..
- [8]. **A. Musyafa'**, I.Made Yulistiya Negara, Imam Robandi, " Wind Energy Developmant in Indonesia / Pengembangan Energi Angin di Indonesia" Proceedings of Seminar Nasional Teknologi Industri XV, Surabaya 12 Mei 2011, InstitutTeknologi Sepuluh Nopember Surabaya.ISSN,2088-4087. pp.11-.12.

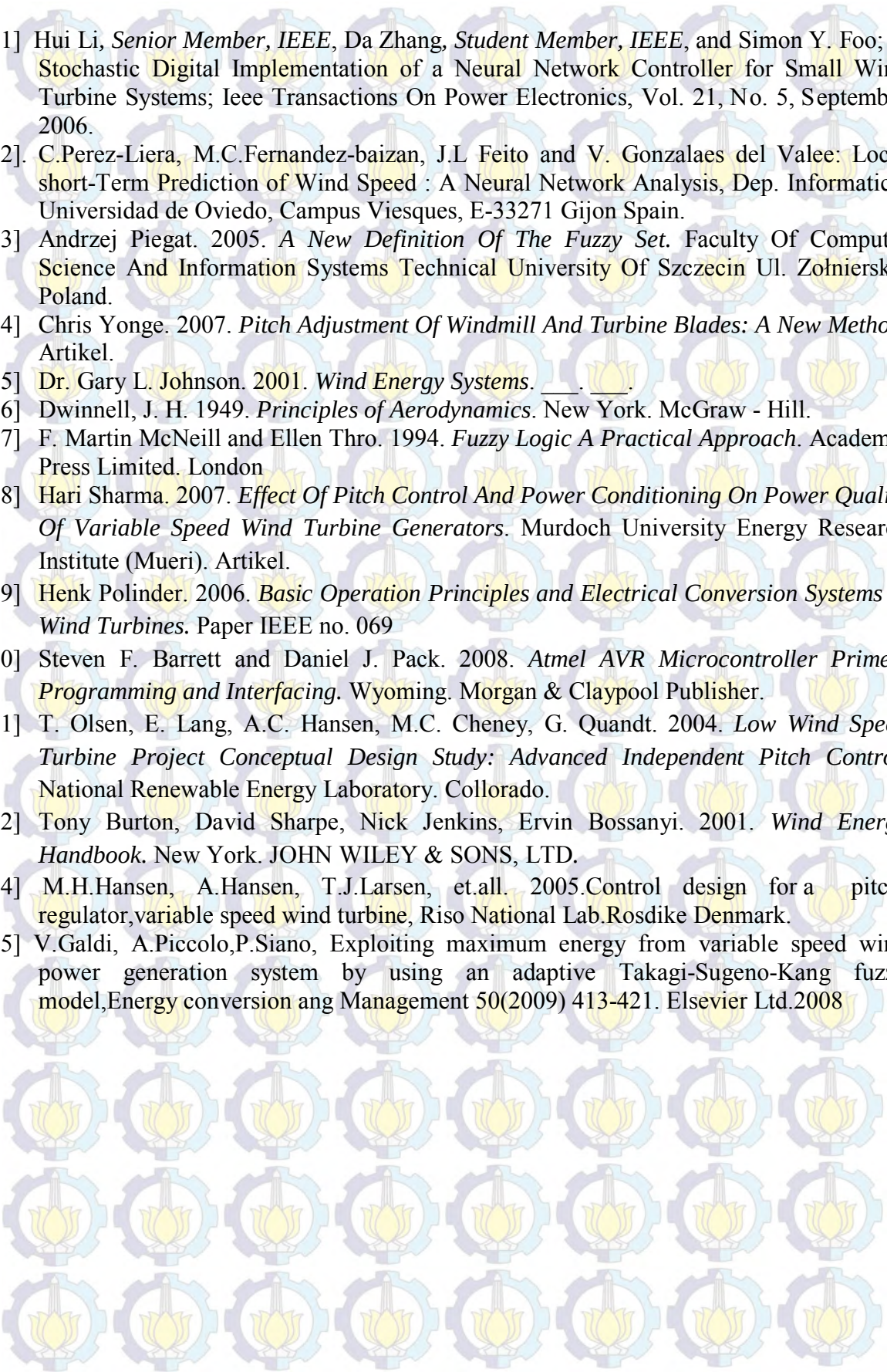
Publikasi hasil penelitian di Seminar Internasional :

- [1]. **A.Musyafa'** , Chilfah B., Agus Dharma, Imam Robandi, " Local Shot-Term Wind Speed Prediction in the Nganjuk City (East java) using Neural Network", Proceedings The 6th International conference on Numerical Analysis in Engineering, Lombok, May 15th -16th 2009, pp.A.33, 1-6.
- [2]. **A.Musyafa'**, Soedibjo, I.Made Yilistiya Negara, Imam Robandi, " Integrated Buck Converter and Wind Turbine Control System Medium Scale (100W) For Optimization Wind Power and Electricity Power", Proceedings International session of Conference on Information Technology and Electrical Engineering, Yogyakarta, 4 August 2009, pp.36-42.
- [3]. **A.Musyafa'**, I.Made Yulistiya Negara, Imam Robandi, "Mapping of Wind Speed and Direction at Karangates-Malang Location, East Java-Indonesia Using Neural Network, The ICAST 2011 School of Shandong University (China), Graduate School of Science and Technology of Kumamoto University (Japan). Poster.
- [4] **A.Musyafa'**, Farid, RM. I.M.Y.Negara, Imam Robandi," Design of Pitch Angle Wind Turbine for Maximum Energy Extraction Production " Annual Meeting Developing Sustainability, 5-7 October 2011, at The Institute of Marine Science , Zanzibar, Tanzania.

Daftar Pustaka

- [1] R.Ata, Y.Kocyigit, An adaptive neuro-fuzzy inference system approach for prediction on tip speed ratio in wind turbines, *Expert systems with Application* 37 (2010) 5454 - 5460, Elsevier Ltd.2010
- [2] Robandi I., *Desain Sistem Tenaga Modern*, CV.Andi Offset, Yogyakarta,2006.
- [3] Evgenije Adzic,Zoran Ivanovic, Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control, *Ada Polytechnica Hungarica*, Vol.6 No.1, 2009
- [4] OnderOzgener, A small wind turbine system (SWTS) application and its performance analysis, *Energy Conversion & management* 47 (2006) 1326-1337 elsevier 2006
- [5] DJLPE, *National Energy Policy 2005-2025 – Indoensia*, Directorate General of electricity and Energy using, Jakarta, 2004
- [6] F. D. Bianchi, R. J. Mantz, C. F. Christiansen, Power regulation in pitch-controlled variable-speed WECS above rated wind speed, *Renewable Energy* 29(2004)1911-1922
- [7] K.R. Ajao, Comparison of Theoretical and Experimental Power output of a Small 3-bladed Horizontal-axis Wind Turbine, *Journal of American Science* 2009; 5(4): 79-90, Marsland Press
- [8] A.Pintea, D.Pepescu, P.Borne, Modeling and control of wind turbines, 12th symposium Large Scale systems Theory and App, France hal-00512206 Version 1 -27 Aug 2010
- [9] Helen Markou, Torben J.Larsen, Control Strategies for operation of pitch regulated turbines above cut-out wind speeds, Riso-DTU, Denmark, PSO-project 2009
- [10] V Calderaro, V Galdia,A.Piccoloa, andP. Siano,a, A fuzzy controller for maximum energy extraction from variable speed wind power generation system, DIIE, University of Salerno-Italy, 31 October 2007
- [11] Wikipedia, Renewable energy from wikipedia , the free encyclopedia, [//Renewable_energy.htm](http://Renewable_energy.htm), 19/02/2011
- [12] LAPAN, Kebijakan Energi Nasional, <http://www.energi-angin.com>
- [13] Ousif El-Tous, Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine, *American J.of Engineering and Applied Sciences* 1(20:118-120,2008
- [14] Jason H.Laks, Lucy Y.Pao, and Alan D.Wright, Control of wind turbine : Past, Present, and Future, *Elect.and Computer Eng.Dep. Univ.of Colorado*, 2009
- [15] David G.Wilson, et.al, Optimized active aerodynamic blade control for load alleviation on large wind turbines, *AWEA Windpower 2008 conference & exhibition*, Houston,Texas, June 1-4 , 2008
- [16] Ghanim Putrus, et al, Maximum power point tracking for variable-speed fixed-pitch small wind turbines, *CIREN 20th International conference on electrician engineering*, paper 0542, Prague 8-11 June 2009
- [17] Cheng Xiao, Lei Zhang, Junqiu Yan, Fuzzy PID Controller for Wind Turbine, 2009 Second International on Intelligent Networks and Intelligent System, DOI 10.1109/ICINIS 2009.28, 2009 IEE
- [18] A.Musyafa, A.Harika, I.M.Y.Negara, I. Robandi, Pitch Angle Control of Variable Low Rated Speed Wind Turbine Using Fuzzy Logic Control, *International Journal Of Engineering & Technology IJET-IJENS* Vol:10 No:05, October 2010.
- [19] Andrew Kusiak, Wenyan Li, Zhe Song, Dynamic control of wind turbines, *Renewable energy* XXX (2009) 1-8, Elsevier 2009

- [20] E.Muljadi, Pitch-Controlled Variable-speed Wind Turbine Generator, *IEEE Transactions on Industry Applications* Vol.37,N0.1 January-February 2001
- [21] J. Zhang, M. Cheng, Z. Chen, X. Fu, Pitch Angle Control for Variable speed Wind Turbine, *DRPT2008 6-9 April 2008 Nanjing China*
- [22] B.Neamanee, S.Sirisumranukul, S.Chatratana, Control performance analysis of feedforward and maximum peak power tracking for s mall-and medium-sized fixed pitch wind turbines, *ICARCV*, IEEE.2006
- [23] Amal Z.Mohamed, Mona N.Eskander, Fadia A.Ghali, Fuzzy logic control maximum power tracking of a wind energy system, *Renuwable energy* 23(2001) 235-245
- [24] Quincy Wang, An Intelegant maximum power extraction algoritm for inverter-based variable speed wind turbine system,2004 IEEE.
- [25] S ecretariat@wwindea.org. , *World Energy Report 2009*, Charles-de-Gaulle-Str.5 (53113) Bonn Germany, 2009.
- [26] H. Suharta, *Eneyg Data-indonesia*, B2TE-BPPT, Puspitek Serpong, Tangerang(15314), Indonesia, *Wind Energy Workshop JHCC*.18-19 June 2009.
- [27] O. Ozgener, A small wind turbine system (SWTS) application and its performance analysis, *Energy Conversion & Management Journal* 47(2006) 1326-1337.
- [28] J. H. Laks, L. Y. Pao, and A. D. Wright, Control of Wind Turbine:Past,Present, and Future, US National Science Foundation(NSF Grant CMMI-0700877) 2009.
- [29] A. S. Yilmas, Z. Ozer, Pitch angle control in wind turbine above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural network, *Expert System with Application* 36(2009) 9767-9775.
- [30] C. Xiao, L. Zhang, J. Yan, Fuzzy PID Controller for W ind Turbine, *Second Intrnational Conference on Intelegant Networks and Intelegant System*. DO1 10.1109/ICINIS.2009.
- [31] F. M. McNeil and E. Thro, *Fuzzy logic a practical approach*, Academic Press Ltd., London, 1994.
- [32] Musyafa'.A , Chilfah B., Agus Dharma, Imam Robandi, Local Shot-Term Wind Speed Prediction in the Nganjuk City (East java) using Neural Network, *Proceedings The 6th International conference on Numerical Analysis in Engineering*, Lombok, May 15th -16th 2009, pp.A.33, 1-6.
- [33] Nørgaard, M. 2000. Neural Network Based System Identification TOOLBOX for Use with MATLAB, Version 2. D enmark: Department of Automation. Department of Mathematical Modeling. Technical University of Denmark.
- [34] Y. Himri *et.at*. "Wind power potential assesment for three locations" Elsevier,2007
- [35] Bongani Malinga,"Modeling and Control of a Wind Turbine as a Distributed Resource" IEEE 2003.
- [36] Lucian Mihet ; "Wind Turbine Generator Modeling and Simulation Where Rotational speed in the Controlled Variable" IEEE 2004.
- [37] MD Arifujiyaman;" Modeling and Control of Small Wind Turbine" CCECE/CCGEL – IEEE 2005.
- [37] Gary L.Johnson, "Wind Energy Systems" Manhattan KS, 2006.
- [38] S. Jiao, " Bosst Vonverter Design For 20 KW Wind Turbine Generator, NT Centre For Energi , Darwin NT.0909, 2008
- [39] Cook, RR, *Assessment of Uncertainties of Measurement for Calibration and Testing Laboratories*, National Association of Testing Authorities (NATA), Australia, 1999
- [40] Kittipong Methaprayoon, *Member, IEEE*, Chitra Yingvivatanapong, *Member, IEEE*, Wei-Jen Lee, *Fellow, IEEE*, and James R. Liao,*Member*; An Integration of ANN Wind Power Estimation Into Unit Commitment Considering the Forecasting Uncertainty; Iee Transactions On Industry Applications, Vol. 43, No. 6, November/December 2007.

- 
- [41] Hui Li, *Senior Member, IEEE*, Da Zhang, *Student Member, IEEE*, and Simon Y. Foo; A Stochastic Digital Implementation of a Neural Network Controller for Small Wind Turbine Systems; *Ieee Transactions On Power Electronics*, Vol. 21, No. 5, September 2006.
- [42] C.Perez-Liera, M.C.Fernandez-baizan, J.L Feito and V. Gonzalaes del Valee: Local short-Term Prediction of Wind Speed : A Neural Network Analysis, Dep. Informatica, Universidad de Oviedo, Campus Viesques, E-33271 Gijon Spain.
- [43] Andrzej Piegat. 2005. *A New Definition Of The Fuzzy Set*. Faculty Of Computer Science And Information Systems Technical University Of Szczecin Ul. Zołnierska, Poland.
- [44] Chris Yonge. 2007. *Pitch Adjustment Of Windmill And Turbine Blades: A New Method*. Artikel.
- [45] Dr. Gary L. Johnson. 2001. *Wind Energy Systems*. ____.
- [46] Dwinnell, J. H. 1949. *Principles of Aerodynamics*. New York. McGraw - Hill.
- [47] F. Martin McNeill and Ellen Thro. 1994. *Fuzzy Logic A Practical Approach*. Academic Press Limited. London
- [48] Hari Sharma. 2007. *Effect Of Pitch Control And Power Conditioning On Power Quality Of Variable Speed Wind Turbine Generators*. Murdoch University Energy Research Institute (Mueri). Artikel.
- [49] Henk Polinder. 2006. *Basic Operation Principles and Electrical Conversion Systems of Wind Turbines*. Paper IEEE no. 069
- [50] Steven F. Barrett and Daniel J. Pack. 2008. *Atmel AVR Microcontroller Primer: Programming and Interfacing*. Wyoming. Morgan & Claypool Publisher.
- [51] T. Olsen, E. Lang, A.C. Hansen, M.C. Cheney, G. Quandt. 2004. *Low Wind Speed Turbine Project Conceptual Design Study: Advanced Independent Pitch Control*. National Renewable Energy Laboratory. Collorado.
- [52] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi. 2001. *Wind Energy Handbook*. New York. JOHN WILEY & SONS, LTD.
- [54] M.H.Hansen, A.Hansen, T.J.Larsen, et.all. 2005. Control design for a pitch-regulator, variable speed wind turbine, Riso National Lab. Rosdike Denmark.
- [55] V.Galdi, A.Piccolo, P.Siano, Exploiting maximum energy from variable speed wind power generation system by using an adaptive Takagi-Sugeno-Kang fuzzy model, *Energy conversion ang Management* 50(2009) 413-421. Elsevier Ltd. 2008