



Tesis-TE 142599

# **Simulasi Pengendali Sudut *Pitch Blade* pada Turbin Angin dengan *Flower Pollination Algorithm* (FPA) untuk Mengoptimalkan Konversi Daya Listrik**

DWI LASTOMO  
NRP.2214201015

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Dr.Eng. Ir. Imam Robandi, M.T.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016



Tesis-TE 142599

# **Simulation of Pitch Angle Blade Controller Wind Turbine Using Flower Pollination Aalgorithm (FPA) for Optimizing Power Conversion**

DWI LASTOMO  
NRP.2214201015

ADVISOR  
Prof. Dr.Eng. Ir. Imam Robandi, M.T.


MASTER PROGRAM  
POWER SYSTEM ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2016

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Oleh:  
Dwi Lastomo  
NRP. 2214201015

Tanggal Ujian : 13 Januari 2016  
Periode Wisuda : Maret 2016

Disetujui Oleh:

  
1. Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, M.T.  
NIP. 196308171990031001

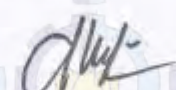
(Pembimbing)

  
2. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.  
NIP. 195512071980031004

(Penguji)

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

(Penguji)

  
4. Heri Survoatmojo, ST., MT., Ph.D  
NIP. 198006032006041003

(Penguji)

Disetujui Program Pascasarjana  
  
Prof. Ir. Erichang Mulyant, M.Sc, Ph.D  
NIP. 196012021987011001  
PROGRAM PASCASARJANA

# **SIMULASI PENGENDALI SUDUT PITCH BLADE PADA TURBIN ANGIN DENGAN *FLOWER POLLINATION ALGORITHM (FPA)* UNTUK MENGOPTIMALKAN KONVERSI DAYA LISTRIK**

Nama : Dwi Lastomo  
NRP : 2214 201 015  
Dosen Pembimbing : Prof.Dr. Eng. Ir.Imam Robandi, M.T.

## **ABSTRAK**

Telah dilakukan penelitian berupa simulasi untuk mengendalikan sudut *pitch blade* pada turbin angin. Penelitian ini bermaksud untuk mengoptimalkan proses konversi daya listrik. Pengendalian sudut *pitch blade* pada turbin angin dilakukan dengan *PI-Controller*. Nilai konstanta  $K_p$  dan  $K_i$  dari *PI-Controller* diperoleh secara optimal dengan algoritma penyerbukan bunga (*Flower Pollination Algorithm (FPA)*).

Simulasi dilakukan dengan variasi kecepatan angin untuk memperoleh sudut *pitch blade* yang optimal. Analisis yang digunakan adalah analisis kestabilan *steady state* untuk memperoleh *eigen value* dan *damping ratio*. Sedangkan untuk analisis kestabilan transient dilakukan analisis *overshoot*, *settling time*, *rise time*, dan parameter lainnya. Hasil parameter dari simulasi dengan FPA, dibandingkan dengan coba-coba (*manual tuning*) dan *Particle Swarm Optimization (PSO)*. Semua simulasi dilakukan dengan simulink dan m.file dari software matlab.

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis, dapat disimpulkan bahwa sistem stabil *steady state* karena memiliki nilai negatif untuk semua *eigen value*. Nilai *damping ratio* juga lebih besar dari 0,05 yang menandakan sistem teredam dengan baik. Pada analisis transient baik untuk frekuensi maupun sudut *pitch blade*, FPA memberikan respon *settling time* yang lebih cepat dan *overshoot* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan PSO dan *manual tuning*.

*Kata kunci: sudut pitch blade, flower pollination algorithm, turbin angin.*

# SIMULATION OF PITCH ANGLE BLADE CONTROLLER WIND TURBINE USING FLOWER POLLINATION ALGORITHM (FPA) FOR OPTIMIZING POWER CONVERSION

Author : Dwi Lastomo

Student ID Number : 2214 201 015

Advisor : Prof.Dr. Eng. Ir.Imam Robandi, M.T.

A research of simulation pitch angle blade of wind turbine had been done. The purpose of the research was to optimize the conversion of power. The controller of pitch angle wind turbine was PI-Controller. The value of gain  $K_p$  and  $K_i$  was obtained optimally by Flower Pollination Algorithm (FPA)

The simulation was done by using variation of wind speed to obtain the optimum pitch angle blade. In this simulation, the steady state and transient stability analysis were applied. Damping ratio and eigen value were obtained to observe the steady state stability. The parameter of transient stability such as: settling time, rise time, and overshoot etc. were obtained by using manual tuning, FPA, and PSO. The parameters result of tuning were compared. All the simulation run in simulink and m.file of matlab.

Based on the simulation and analysis result, it could be concluded that the system was stable steady state. It was shown by all real component of negative eigen value. The damping ratio of the system was more than 0.05 and less than 1 so the system was damped well. In transient analysis in pitch angle blade and rotor frequency, FPA gave the fastest settling time and the lowest overshoot response than manual tuning and Particle Swarm Optimization (PSO).

*Keywords: pitch angle blade, flower pollination algorithm, wind turbine*

## KATA PENGANTAR

Assamu'alaykum warahmatullahi wabarakatu

Alhamdulillahirabbil'aalamin, puji syukur senantiasa penulis panjatkan kepada Allah Swt. karena dengan rahmat dan karunianya, penulis mampu menyelesaikan tesis dengan judul:

### **SIMULASI PENGENDALI SUDUT *PITCH BLADE* PADA TURBIN ANGIN DENGAN *FLOWER POLLINATION ALGORITHM (FPA)* UNTUK MENGOPTIMALKAN KONVERSI DAYA LISTRIK**

Penyusunan tesis ini merupakan salah satu syarat bagi penulis untuk memperoleh gelar Magister Teknik (MT) pada bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga, Program Pascasarjana Jurusan Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tesis ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu, penulis membutuhkan saran dan kritik untuk kesempurnaan karya ini dan karya selanjutnya. Semoga buku ini memberi manfaat bagi mahasiswa teknik elektro dan semua pihak yang berminat pada bidang energi terbatukan khususnya kestabilan dan pengaturan.

Akhir kata, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, kakak, dan istri tercinta yang terus menerus mengirimkan do'a dan dukungan serta motivasi tiada henti selama proses perkuliahan di ITS Surabaya
2. Prof. Dr. Imam Robandi selaku dosen pembimbing yang telah memberikan waktu untuk bimbingan dan arahan serta motivasi yang senantiasa mencerahkan selama menjadi anggota PSOC Laboratory.
3. Dr. Dwi Ratna selaku dosen wali di PraS2 Matematika-Teknik Elektro dan Prof. Erna Ketua Jurusan Matematika ITS Surabaya beserta seluruh dosen dan staf karyawan atas kerjasama selama menjalani perkuliahan .
4. Dr. Rony Seto Wibowo, selaku dosen wali di S2 Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro FTI ITS beserta seluruh dosen dan staf karyawan atas kerjasama selama menjalani perkuliahan.

5. Dikti Kemenristek-DIKTI, Dr. Melania S.M. dan Prof. Lilik Hendrajaya, selaku manajemen Beasiswa Pra-S2 Saintek yang sudah memberikan kesempatan dan kepercayaan kepada saya untuk menerima beasiswa ini.
6. Politeknik Negeri Madiun selaku institusi dan Alm. Budi Tjahjono, MM selaku direktur pemberi rekomendasi serta seluruh dosen dan staf karyawan, sehingga saya bisa menerima beasiswa PraS2 Saintek.
7. Teman-teman Teknik Sistem Tenaga angkatan 2013, 2014, dan 2015 seperti: Yuli, Yanuar, Echa, Seto, Nesya, Abil, Farid, Aji, Multazam, Budi Amri, Bambang, Budi Triyono, Irwan, Ayus, Yoa<sub>K</sub>m, Vicky, Jauhari, Muy, Daeng, Alif, Nita, Nuha, Robert, Abdillah, Maya, Sahriar, Dapis, dll.
8. Mamber dan Alumni PSOC S1, S2, S3 seperti: Pak Aji, Pak Udin, Bu Nur, Pak Machrus, Wandu, Taufiq, Rian, Suharto, Rodhi, Irna, Herlambang, Imron, Pak Jamal, Pak Izza, Pak Yose, Pak Darman, Hedy, Lexy dan David.

Semoga tesis ini memberi manfaat bagi semua pembaca dan Allah Swt membalas kebaikan semua pihak yang membantu terselesaikannya tesis ini.

Surabaya, Januari 2016

Dwi Lastomo

## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	i
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR SINGKATAN.....	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	xv
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
BAB 2. KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	3
2.1. <i>Road Map</i> Penelitian.....	3
2.2. Sejarah Turbin Angin.....	3
2.3. Blade Turbin Angin.....	5
2.4. Posisi Sudut <i>Pitch Blade</i> .....	6
2.5. Prinsip Kerja Turbin Angin.....	8
2.6. Permodelan Matematika Turbin Angin.....	9
2.7. Kontroler P-I-D.....	11
2.8. Algoritma Optimisasi.....	15
2.9. Algoritma Optimisasi Metaheuristik.....	16
2.10. Randomisasi.....	19
2.11. Karakteristik Penyerbukan Bunga.....	22
2.12. <i>Flower Pollination Algorithm</i> .....	24
2.13. Kestabilan.....	27
BAB 3. METODA PENELITIAN.....	29
3.1. Plant Sistem.....	29
3.2. Diagram Alir Penelitian.....	32
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1. Analisis Kestabilan Steady State.....	33
4.2. Analisis Kestabilan Transient <i>Control System</i> pada Sudut <i>Pitch Blade</i> .....	35



4.3. Analisis Dinamis Sistem Tenaga untuk Rotor Generator.....	39
4.4. Analisis Pengoptimalan Konversi Energi Melalui Frekuensi.....	40
4.5. Kondisi Tanpa Pengendali.....	41
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	43
5.1. Kesimpulan.....	43
5.2. Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN .....	49
BIOGRAFI PENULIS.....	61
ADDENDUM.....	63
INDEX.....	65

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Perbandingan Turbin Angin Sumbu Vertikal dengan Horizontal.	5
Gambar 2.2.	Vektor Gaya pada Blade.....	6
Gambar 2.3.	Posisi Sudut pada Pitch Blade.....	6
Gambar 2.4.	Skema Pengendali Sudut Pitch Blade pada Turbin Angin.....	10
Gambar 2.5.	Diagram Blok Pengendali Sudut Pitch pada Blade Turbin Angin	10
Gambar 2.6.	Diagram Blok Kontroler Proporsional.....	12
Gambar 2.7.	Diagram Blok Kontroler Integral.....	13
Gambar 2.8.	Diagram Blok Kontroler Diferensial.....	14
Gambar 2.9.	Diagram blok kontroler PI.....	15
Gambar 2.10.	Grafik Distribusi Lévy dengan $\mu = 2$ dan $\gamma = 1$ .....	20
Gambar 2.11.	Gerak Brown dan Lévy Flights pada Ruang 2 Dimensi.....	21
Gambar 2.12.	Pseudo Code FPA.....	27
Gambar 3.1.	Diagram blok sistem pengendali pitch blade pada turbin angin dengan <i>PI-Manual Tuning</i> .....	29
Gambar 3.2.	Diagram blok sistem pengendali pitch blade pada turbin angin Dengan PI-FPA.....	30
Gambar 3.3.	Diagram blok sistem pengendali pitch blade pada turbin angin dengan PI-PSO.....	30
Gambar 3.4.	Diagram alir penelitian.....	32
Gambar 4.1.	Plot Eigen Value pada Sistem Turbin Angin.....	34
Gambar 4.2.	Perbandingan <i>Overshoot</i> dan <i>Settling Time</i> Sudut <i>Pitch Blade</i> ....	36
Gambar 4.3.	Kondisi Sudut Pitch Blade saat Kecepatan Angin 15 meter/detik	38
Gambar 4.4.	Perbandingan <i>Overshoot</i> dan <i>Settling Time</i> Frekuensi Rotor.....	39
Gambar 4.5.	Diagram Simulink Sistem Tanpa Pengendali.....	41
Gambar 4.6.	Sudut Pitch Blade Ketika Kecepatan Angin 3meter/detik.....	42
Gambar 4.7.	Respon Frekuensi Rotor ketika Kecepatan angin 3 meter/detik....	42

## DAFTAR TABEL

Tabel2.1. Perbandingan Turbin Angin Sumbu Vertikal dengan Horizontal .....	4
Tabel2.2. Analogi Penyerbukan Bunga dengan Optimisasi.....	25
Tabel2.3. Parameter Flower Pollination Algorithm.....	26
Tabel4.1. Hasil Analisis Kestabilan Steady State pada Sistem Turbin Angin.....	33
Tabel4.2. Perbandingan Nilai $K_p$ dan $K_i$ Semua Metod Optimisasi.....	35
Tabel4.3. Perbandingan Sudut Pitch pada Blade Turbin Angin.....	35
Tabel4.4. Perbandingan Sudut Pitch pada Blade Turbin Angin dengan Limiter..	36
Tabel4.5. Perbandingan Parameter Analisis Transien pada Sudut <i>Pitch Blade</i> ....	37
Tabel 4.6. Perbandingan Parameter Analisis Transient Sudut <i>Pitch Blade</i> dengan Limiter.....	38
Tabel 4.7. Perbandingan Parameter Analisis Dinamis pada Frekuensi Rotor.....	39
Tabel 4.8. Kondisi Badai sehingga Rotor Berhenti Berputar.....	40

## DAFTAR SINGKATAN

BMKG : Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

CDI : *Comprehensive Damping Index*

FPA : *Flower Pollination Algorithm*

HAWT : *Horizontal Axis Wind Turbine*

IEEE : *The Institute of Electrical and Electric Engineering*

ITAE : *Integral Time Absolute Error*

NACA : *National Advisory for Aeronautic*

PI : *Proportional Integral*

PLTB : Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

PSO : *Particle Swarm Optimization*

SKEA : Sistem Konversi Energi Angin

TSCF : *Terra Squere Cubic Feed*

VAWT : *Vertical Axis Wind Turbine*

## DAFTAR SIMBOL

$\omega_{rot}$  : *angular speed rotor* (rad/sec)

$\eta$  : efisiensi (%)

$\lambda$  : *tip speed ratio* (pu)

$\lambda_0$  : *optimal tip ratio* (pu)

$\zeta$  : damping ratio

$\theta$  : pitch angle blade (derajat)

$v$  : kecepatan angin (meter/detik)

$v_0$  : optimum wind speed (meter/detik)

$\rho$  : kerapatan udara ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_p$  : koefisien daya pada turbin angin

$J_g$  : momen inersia generator ( $\text{kgm}^2$ )

$J_r$  : momen inersia rotor ( $\text{kgm}^2$ )

$\gamma$  : konstanta redaman aerodinamis

$\omega_2$  : frekuensi generator turbin angin

$H_w$  : momen inersia generator turbin angin

$K_{FC}$  : konstanta *fluid coupling* turbin angin

$K_{p1}$  : nilai gain *controller* integral

$T_{p1}$  : konstanta 1 *hydraulic pitch aktuator*

$K_{p2}$  : nilai gain *controller* proporsional

$T_{p2}$  : konstanta 2 *hydraulic pitch aktuator*

$K_{p3}$  : konstanta data fit pitch response

$K_{pc}$  : konstanta *blade characteristic*

$\Delta P_w$  : perubahan daya angin

$\Delta P_m$  : perubahan daya input blade

$\Delta P_{load}$  : perubahan daya beban



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB 1 PENDAHULUAN

Permasalahan lingkungan saat ini sudah menjadi kajian internasional. Perubahan iklim karena pemanasan global membuat para ahli melakukan riset untuk mengendalikan emisi bahan bakar fosil (R. Ata, Y. Kocyigit, 2010). Pengendalian polusi, efisiensi sumber daya, regulasi, dan kebijakan telah mengarahkan dan menekankan agar masyarakat dunia beralih dari bahan bakar fosil ke sumber energi baru dan terbarukan (Onder Ozgener, 2006).

Di Indonesia, cadangan bahan bakar fosil meliputi: minyak bumi, gas alam, dan batu bara akan habis dalam 50 tahun ke depan. Adapun rinciannya sebagai berikut: minyak bumi dengan cadangan 7,7 milyar barel akan habis pada 2025. Gas alam dengan cadangan 165 *terra square cubic feed* (TSCF) akan habis pada 2055. Batu bara dengan cadangan 18 milyar ton, namun tingkat polusinya tinggi. Kondisi seperti ini, membuat pemerintah menggeser kebijakan energi. Dengan merencanakan 17% energi baru terbarukan pada tahun 2015, menjadi 25% (DJLPE, 2004).

Pertumbuhan ekonomi Indonesia yang pesat, memerlukan ketahanan energi yang andal. Tidak hanya itu, pesatnya pertumbuhan penduduk dan juga naiknya tingkat kesejahteraan mendorong peningkatan kebutuhan energi listrik. Menurut kajian BPPT (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi), Indonesia diperkirakan akan defisit energi pada 2030. Kondisi ini, mendorong pemerintah membuat kebijakan mendasar tentang energi secara khusus energi angin telah dicanangkan sebagai sumber energi bersih dan sumber energi masa depan.

Sebaran penduduk Indonesia yang tidak merata, mempersulit kebijakan pembangunan infrastruktur kelistrikan. Banyak pulau-pulau di Indonesia tidak berpenduduk tetap. Penduduk Indonesia terpusat di Pulau Jawa, Madura, dan Bali (65%) serta kota-kota besar di Pulau Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua. Dari 17.000 pulau di Nusantara, 6000 diantaranya tidak berpenduduk tetap.

Beberapa tantangan tersebut, mendorong energi baru dan terbarukan menjadi topik yang sedang giat diteliti. Sejak tahun 2008, topik permasalahan

lingkungan dan krisis energi serta pencarian sumber energi baru terbarukan menjadi topik paling populer. Energi baru dan terbarukan merupakan sumber energi yang berasal dari sinar matahari, angin, panas bumi, air terjun, gelombang laut, dan lain-lain. Pada tahun 2010, konsumsi energi baru terbarukan global mencapai 16,2% (312 GW) dari seluruh energi yang digunakan secara global. Pertumbuhan energi baru terbarukan terutama angin (PLTB) pada 2010 mencapai 23,6%, dari 159 GW pada 2009 menjadi 198 GW pada 2010 sekaligus menyumbang 2,5% dari total energi dunia (V, Calderaro, 2007). Kondisi ini menempatkan PLTB menjadi energi baru terbarukan yang paling pesat dan layak untuk diteliti lebih lanjut.

Permasalahan yang ingin diselesaikan pada penelitian ini, yaitu: bagaimana metode *Flower Pollination Algorithm* mengoptimalkan konversi energi angin menjadi listrik melalui pengontrolan sudut *Pitch blade* pada turbin angin. Pada sudut berapakah *Pitch blade* paling optimal dengan variasi kecepatan angin. Bagaimanakah perbandingan parameter kestabilan *transient* sistem kontrol antara metode *PI-Flower Pollination* dengan *PI-PSO* dan *PI-manual tuning*

Pada penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan ekstraksi energi kinetik angin menjadi energi listrik dengan metode *PI-Flower Pollination Algorithm*, mengontrol sudut *Pitch blade* dengan *Flower Pollination Algorithm* dengan menentukan nilai  $K_p$  dan  $K_i$ , serta membandingkan *overshoot* dan *settling time* pada antara metode *PI-Flower Pollination* dengan *PI-PSO* dan *PI-Manual Tuning*.

Penelitian ini dapat berkontribusi untuk pemerintah, industri, akademisi atau peneliti, dan masyarakat yang ingin mengembangkan PLTB. Pemerintah, membantu pemerintah untuk memberikan rekomendasi dalam menentukan kebijakan terkait energi baru terbarukan terutama PLTB. Industri, membantu industri untuk membuat peralatan/instrument yang lebih efisien dalam proses ekstraksi energi mekanik angin menjadi energi listrik. Peneliti dan akademisi, membantu memperkaya khasanah keilmuan dan referensi bagi peneliti, dosen, dan mahasiswa. Masyarakat, membantu masyarakat untuk bisa membuat PLTB secara swadaya.



## BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

### 2.1. Penelitian yang Telah Dilakukan Peneliti Sebelumnya

Beberapa penelitian yang telah dilakukan antara lain:

- a) Permorma dinamik Sistem Pembangkit *Wind-Disel* dengan CES Hasil yang diperoleh untuk sistem turbin angin *stand alone* dengan *capacitive energy storage* memiliki overshoot lebih kecil dan *settling time* lebih cepat saat terjadi perubahan frekuensi rotor. (S.C. Tripathy, 1999)
- b) Kendali Sudut *Pitch Blade* pada Turbin Angin Berdasarkan Kendali PI/FL untuk Sistem Konversi Energi Angin. FLC menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan PI. (Kumar, 2015)
- c) Rancang Bangun Kontrol Logika Fuzzy Pada Sudut Angguk Turbin Angin untuk Optimisasi Daya Listrik. Koefisien daya hampir sempurna pada prototype yaitu: 0,545 dari 0,593. (Musyafa' Ali, 2012)
- d) Pengoptimalan Desain Kendali PID pada Motor DC Menggunakan Flower Pollination Algorithm. Memberikan hasil optimisasi FPA lebih baik dalam overshoot dan settling time dibanding *Artificial Bee Colony* (ABC) dan *Cuckoo Search Algorithm* (CSA) (Lastomo Dwi, 2015)
- e) Optimisasi Arus Lebih dengan *Flower Pollination Algorithm*. Memeberikan hasil optimisasi TDS *Flower Pollination Algorithm* lebih baik daripada Program Linier. (Trivedi, Indrajit N,2015)

### 2.2. Sejarah Turbin Angin (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu)

Turbin angin merupakan mesin konversi energi tertua di dunia (KR Ajao 2009). Saat ini, turbin angin adalah Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) yang perkembangannya paling signifikan. Kondisi ini disebabkan karena memiliki sitem yang bersih, mudah perawatannya, dan ekonomis. (A. Pintea,et al, 2010).

Denmark merupakan negara pertama yang memanfaatkan angin sebagai pembangkit listrik. Pada tahun 1890, telah dibangun turbin angin untuk pembangkit listrik dengan diameter 23 m. Pada tahun 1910, dibangun beberapa ratus turbin angin dengan kapasitas 5-25 kW. Pada tahun 1925, di Amerika

Serikat telah dijual secara komersial PLTB dengan dua maupun tiga *blade*. Merk yang terkenal adalah *Winchanger* dengan kapasitas 200-1200 W disusul *Jacobs* dengan kapasitas 1500-3000 W.

Saat ini, turbin angin sudah menyebar baik ke daerah beriklim subtropis maupun tropis baik yang memiliki kecepatan angin kurang dari 10 meter/detik maupun berkecepatan 12-50 meter/detik. Persebarannya pun tidak hanya di darat, tapi juga di laut (Helen Markou, et al, 2009). Jumlah ekstraksi energi listrik dari turbin angin di seluruh dunia mencapai 196 GW pada tahun 2010 dan diperkirakan akan terus tumbuh serta menjadi primadona jangka panjang (World Energy Report, 2009).

Di Indonesia, turbin angin yang sudah terpasang mencapai 1,4MW pada tahun 2010. Adapun variasi kapasitas turbin angin adalah 50 W sampai 10 kW dengan ukuran diameter *blade* berkisar antara 0,8 – 7,5 meter. Turbin angin tersebut, dipasang pada daerah dengan kecepatan angin sebagai berikut:

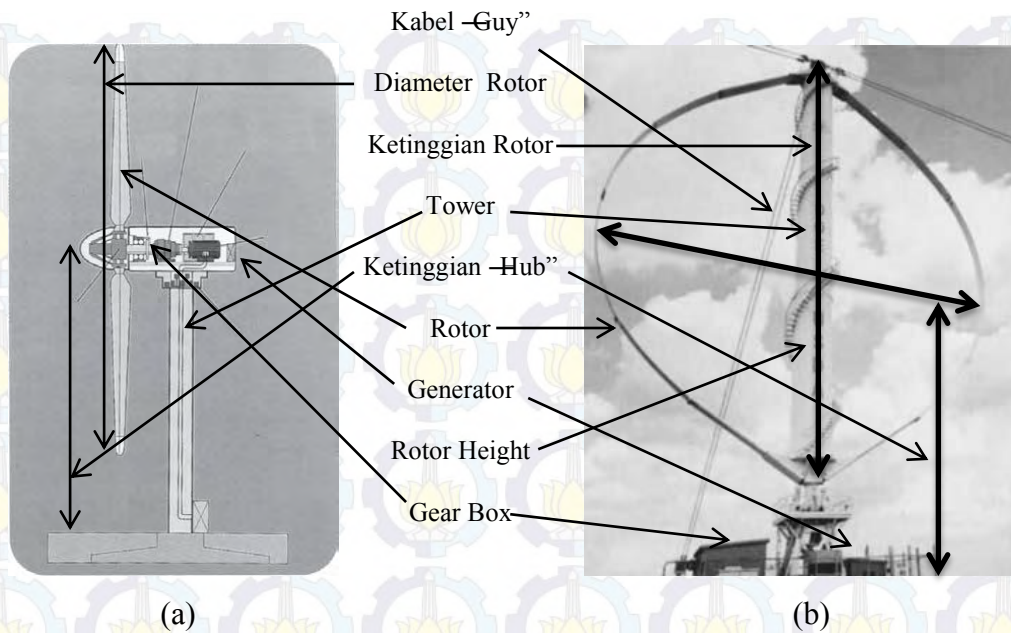
1. Zona I : 2,5-4 meter/detik
2. Zona II : 4-5 meter/detik
3. Zona III : 5 meter/detik <

Sedangkan untuk pengembang SKEA, pemerintah Indonesia telah mencanangkan bahwa instalasi turbin angin pada tahun 2025 dapat mencapai 5 MW yang terhubung dengan jaringan listrik nasional dan 250 MW tidak terhubung dengan jaringan listrik nasional. Pengembangan ini, telah dilakukan oleh LAPAN yang didukung oleh lembaga penelitian lain (DJLPE,2004).

Tipe turbin angin dibedakan berdasarkan arah orientasi porosnya, yaitu: vertikal (VAWT: *vertical axis wind turbine*) dan horizontal (*horizontal axis wind turbine*). Tabel 1 merupakan perbandingan antara VAWT dengan HAWT:

Tabel 2.1. Perbandingan turbin angin sumbu vertikal dengan sumbu horizontal

Parameter	Sumbu Vertikal	Sumbu Horizontal
kecepatan angin	< 5 meter/detik	semua bisa
Bentuk	Sederhana	lebih kompleks
daya output	mencapai 0,5 MW	mencapai 5MW
prinsip kerja	Sama	Sama



Gambar 2.1. Perbandingan Turbin (a) Sumbu Horizontal (b) dengan Sumbu Vertikal (Patel, Mukund R., Ph.D., P.E 2006)

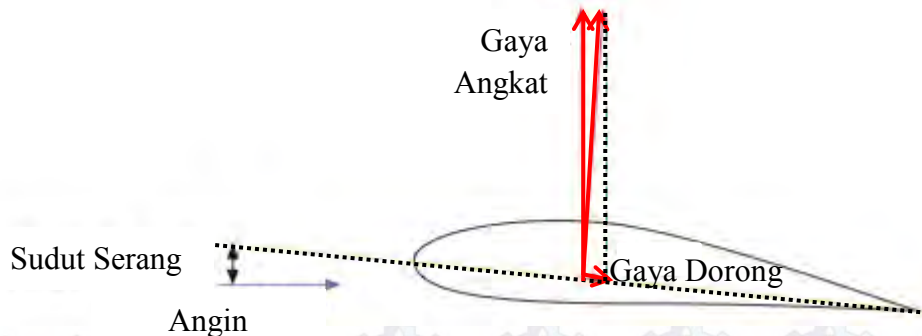
### 2.3. Blade Turbin Angin

*Blade* adalah komponen utama turbin angin untuk menangkap komponen energi angin. Energi tersebut dikonversi menjadi energi mekanik yang dilanjutkan menjadi energi listrik. Oleh karena itu, sangat penting memperhatikan desain *blade* pada turbin angin. Adapun hal-hal penting yang perlu diperhatikan adalah bahan, ukuran, jenis, dan jumlah *blade*. Pada turbin angin sumbu horizontal, terdapat tambahan syarat, yaitu: jari-jari dan jumlah *blade*, sudut *Pitch*, panjang *chord*, jenis *aerofil*, dan bahan baku *blade*.

Turbin dengan jumlah *blade* lebih banyak, maka akan menghasilkan jumlah torsi yang besar. Kondisi ini sering dipakai untuk keperluan mekanik seperti pompa air. Sedang jumlah *blade* yang sedikit (dua atau tiga buah) sering dipakai untuk pembangkitan listrik. Kondisi torsi rendah pada jumlah *blade* yang sedikit mengakibatkan putaran rotor yang lebih besar. Kondisi ini dapat ditunjukkan dengan hubungan nilai efisiensi( $\eta$ ), *tip speed ratio* ( $\lambda$ ), dan torsi ( $C_Q$ ). Jumlah *blade* yang banyak menghasilkan torsi yang besar, namun belum tentu turbin tersebut memiliki efisiensi yang besar, begitu pula sebaliknya. Jumlah *blade* yang banyak, cocok untuk kecepatan angin yang rendah. Jumlah *blade* yang

sedikit, sulit untuk bekerja optimal saat kecepatan angin kurang dari 5 meter/detik.

Ketika *blade* terkena angin dari arah depan, maka *blade* akan menghasilkan vektor gaya angkat (lift)  $L$ , dan dorong (drag)  $D$ . Perubahan gaya angkat dan gaya dorong, dipengaruhi secara langsung oleh bentuk geometri *blade*, kecepatan angin, dan arah angin terhadap garis utama *blade*. Akibat dari perubahan gaya angkat dan gaya dorong, maka kecepatan sudut dan nilai torsi akan berubah pula. Kondisi kemiringan sudut *blade* terhadap arah datangnya angin sangat penting, karena akan berpengaruh terhadap sudut serang ( $\alpha$ ). Sudut serang ini lah yang mempengaruhi besarnya nilai kecepatan sudut rotor yang nantinya berbanding lurus terhadap nilai energi listrik yang dihasilkan.



Gambar 2.2. Vektor gaya pada *blade* (Ali Musyafa', 2012)

Jumlah *blade* dan besarnya rotor sangat berpengaruh dalam proses konversi energi pada turbin angin. Makin besar diameter rotor, memerlukan ukuran diameter *blade* yang lebih besar. Semakin besar ukuran rotor, semakin besar koefisien daya. Kondisi ini menyebabkan kecepatan turbin menjadi semakin rendah. Umumnya, untuk turbin angin sumbu horizontal memiliki *blade* minimal 3. Penentuan jumlah *blade* disesuaikan dengan lokasi daerah instalasi akan dibangun dan juga estetika. (Musyafa', Ali, 2012)

#### 2.4. Posisi Sudut *Pitch Blade*

Penentuan sudut *pitch blade* pada turbin angin mengacu pada sudut serang dari *blade* terhadap aliran fluida yang melintasinya. Pada turbin angin, pengaturan sudut *pitch blade* dilakukan untuk menyesuaikan ekstraksi daya yang dihasilkan terhadap kecepatan angin yang berfluktuasi. Pada kondisi badai, sudut

*Pitch* diatur secara paralel terhadap arah angin agar turbin angin tidak berputar melebihi ambang batas.

Desain turbin angin harus mempertimbangkan *chord*. Bagian pangkal *blade* yang memiliki kemampuan menangkap energi angin bernilai paling kecil sedang pada ujung *blade* memiliki kemampuan yang paling besar. Pada ujung *blade*, akan menghasilkan torsi yang lebih besar. Dengan menggunakan geometris *blade* yang pangkalnya lebih lebar dibanding ujungnya, maka turbin akan berputar lebih mudah walaupun kecepatan anginnya kecil. Karena bagian ujung *blade* adalah penghasil torsi terbesar, maka penghitungan geometris *blade* harus dihitung dengan cermat. Jenis *chord* yang desainya semakin mengecil pada ujungnya sedang bagian pangkalnya lebar, memberikan keuntungan, seperti:

- efisiensi turbin angin meningkat
- tahan terhadap tegangan
- mampu berputar pada kecepatan angin rendah, sehingga munculah torsi
- mampu menahan beban mekanik

Penentuan jumlah *blade* pada rotor, dapat dilakukan dengan persamaan "Betz" sebagai berikut (David G. Wilson, 2008):

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

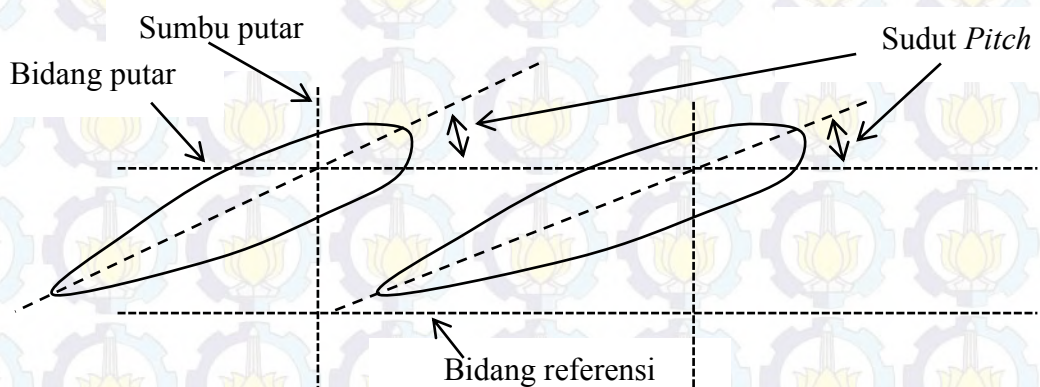
C : Panjang Chord (m)

R : radius total rotor (m)

r : radius pada segmen chord yang dihitung (m)

$\lambda$  : *Tip Speed Ratio*

B : Jumlah *blade* pada rotor



Gambar 2.3 Posisi sudut *Pitch* blade

## 2.5. Prinsip Kerja Turbin Angin

Daya angin yang dapat ditangkap dan diekstrak oleh sistem turbin anginsumbu horizontal dirumuskan sebagai berikut (J.H. Laks, et al, 2009)

$$P = \frac{1}{2} \rho_{udara} C_P A_r V_W^3 \quad (2.2)$$

Dari persamaan tersebut, diketahui bahwa selain bergantung pada kecepatan angin juga bergantung pada nilai  $C_p$  (*Coefficient Power*). Makin besar nilai  $C_p$  makin besar daya listrik yang diperoleh dari turbin angin. Besaran  $C_p$  merupakan fungsi dari *tip ratio* [ $\lambda$ ] dan sudut *Pitch* [ $\theta$ ], sehingga persamaan 2.2. dapat ditulis menjadi (A. Pintea, et al, 2010):

$$P = \frac{1}{2} \rho_{udara} C_{P(\lambda, \theta)} A_r v_W^3 \quad (2.3)$$

$\lambda$  dapat dirumuskan sebagai berikut:

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

Jika  $\omega$  diset sesuai yang diinginkan dan  $R$  *blade* adalah konstan, maka  $C_p$  hanya bergantung pada  $\vartheta$  dan  $\theta$ . Karena  $\vartheta$  tidak dapat dikontrol, maka *Pitch angle*  $\theta$  dikontrol sebagai kompensasi terhadap perubahan kecepatan angin  $\vartheta$ . Untuk memperoleh sudut *Pitch* yang optimal, maka pengambilan data dilakukan dengan kecepatan angin konstan.

Hubungan antara daya hasil ekstraksi  $P$  dengan kecepatan sudut  $\omega$  (rpm) adalah berbanding lurus sesuai persamaan berikut:

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

$\lambda$  : *tip speed ratio*

$\omega$ : kecepatan sudut (rps)

$\vartheta$  : kecepatan angin (meter/detik)

$\tau$  : torsi penggerak rotor yang dibangkitkan akibat putaran chord (Nm)

Produksi daya angin yang ditangkap oleh sebuah HAWT, dapat diturunkan melalui persamaan energi kinetik angin yang bergerak dengan tertentu ke arah sumbu x positif. Persamaan energi untuk udara yang melintas pada turbin angin ditunjukkan sebagai berikut:

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

Daya adalah turunan pertama usaha terhadap waktu

$$P = \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2} \left( \rho_{udara} A_r \frac{dx}{dt} \right) \vartheta_w^2 = \frac{1}{2} \rho_{udara} A_r \vartheta_w^3 \quad (2.7)$$

Hubungan kecepatan angin pada tube angin yang melintasi turbin angin secara ideal:

$$\vartheta_2 = \vartheta_3 = \frac{2}{3} \vartheta_1$$

$$\vartheta_4 = \frac{1}{3} \vartheta_1$$

$$A_2 = A_3 = \frac{2}{3} A_1$$

$$A_4 = \frac{1}{3} A_1 \quad (2.8)$$

Untuk mengetahui seberapa besar daya yang diperoleh dari konversi daya oleh turbin angin, dapat dihitung dengan menghitung kecepatan angin sebelum melewati turbin angin dengan setelah melewati turbin angin. (Gerry L. Johnson, 2001)

Daya listrik yang dapat dikonversi dari daya mekanik angin adalah

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

Untuk mempermudah perhitungan, maka persamaan 2.9 diubah dalam bentuk lain dengan variabel  $V_2$  atau terkait dengan luas area sapuan turbin angin tersebut:

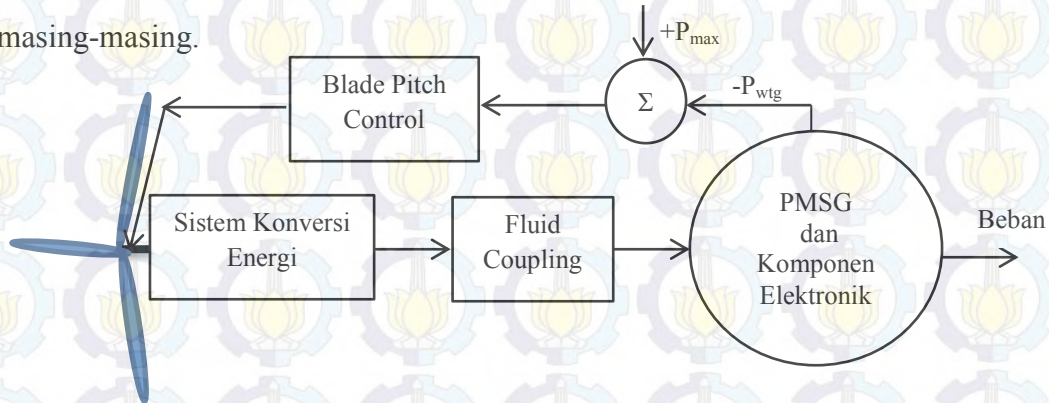
$$P = \frac{1}{2} \rho_{udara} \left[ \frac{8}{9} \left( \frac{2}{3} A_2 V_1^3 \right) \right] = \frac{1}{2} \rho_{udara} \left( \frac{16}{27} A_2 V_1^3 \right) \quad (2.10)$$

Nilai  $\frac{16}{27}$  pada persamaan 2.10 juga bernilai 0,593 yang kemudian dikenal dengan konstanta Betz. Nilai tersebut menunjukkan maksimum efisiensi dari sebuah turbin angin atau  $C_p$  (Coefficient of Power). Pada kenyataan, nilai tersebut (0,593) sulit dicapai.

## 2.6. Permodelan Matematika untuk Turbin Angin

Diagram blok fungsional dari turbin angin ditunjukkan pada Gambar 2.6. diasumsikan bahwa, awalnya, sistem ini di *Steady state (tunak)* ditandai dengan

$\Delta\omega_2$  frekuensi konstan dan turbin angin daya input  $P_m$  konstan. dalam menanggapi fungsi langkah kecil  $\Delta P_{Load}$  gangguan beban diterapkan sistem, penyimpangan parameter dari nilai-nilai *Steady state (tunak)* normal mereka adalah  $w_2$  dan  $P_m$  masing-masing.



Gambar 2.4. Skema diagram pengendali sudut *Pitch blade* pada turbin angin (Haris Kumar, dkk 2015)

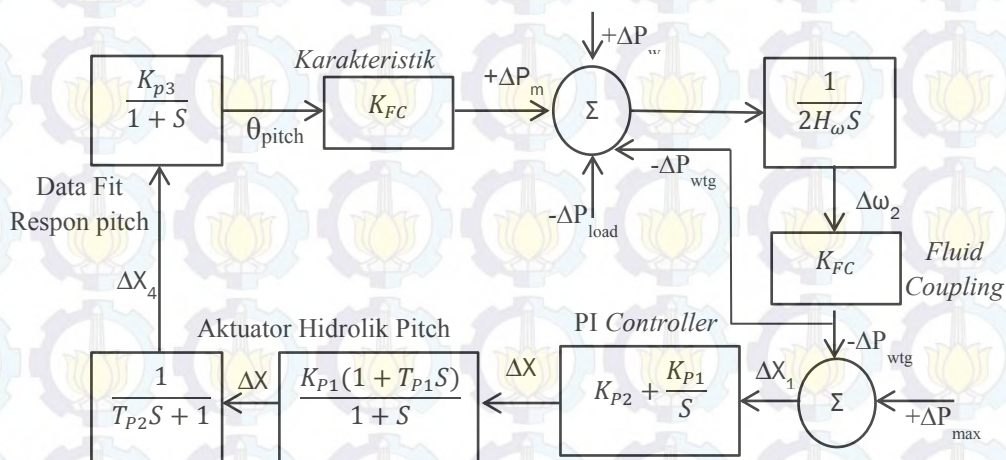
Ketika terjadi perubahan beban secara tiba-tiba, permintaan yang bersifat segera atas kebutuhan tenaga ekstra harus berasal dari momen inersia rotornya generator. Dampaknya, perlambatan generator dan penurunan frekuensi, ditentukan oleh persamaan berikut ini:

$$\frac{d\Delta\omega_2}{dt} = \frac{1}{2H_w} (\Delta P_m + \Delta P_w - \Delta P_{load}) \quad (2.11)$$

$H_w$  = konstanta inersia dari turbin angin dari sistem generator

$\Delta P_w$  = Perubahan input daya angin

$\Delta P_{wtg}$  = Perubahan daya out put dari *fluid coupling*



Gambar 2.5. Diagram Blok untuk pengendali sudut Pitch pada Blade Turbin Angin (Tripathy and Mishra, 1999)



*Fluid Coupling* yang ditunjukkan gambar 2.10 mentransfer perbedaan antara kecepatan sudut turbin dengan frekuensi generator menjadi daya. Blok tersebut terhubung dengan pengendali pitch angle blade yang terdiri dari pengendali proportional and integral. Hubungan tersebut dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\frac{d\Delta x_2}{dt} = K_{p2} \frac{dx_1}{dt} + K_{pl} \Delta x_1 \quad (2.12)$$

di mana

$$\Delta x_1 = \Delta P_{max} - \Delta P_{wtg} \quad (2.13)$$

dan

$$\Delta P_{wtg} = K_{FC} \Delta \omega_2 \quad (2.14)$$

turunkan persamaan 2.15 terhadap t dan substitusikan  $\Delta P_{wtg}$  dan  $\Delta P_{max}$  (seting daya maksimum Pmax selalu konstan,  $\Delta P_{max} = 0$ , sehingga diperoleh:

$$\frac{d\Delta x_1}{dt} = -K_{FC} \frac{d\Delta \omega_2}{dt} \quad (2.15)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.14 dan 2.17 ke persamaan 2.15, maka diperoleh:

$$\frac{d\Delta x_2}{dt} = -\frac{K_{FC} K_{p2}}{2H_\omega} (\Delta P_w + \Delta P_m - \Delta P_{load}) - K_{FC} K_{p1} \Delta \omega_2 \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_3}{dt} &= K_{pl} T_{pl} \frac{d\Delta x_2}{dt} K_{p2} \Delta x_2 - \Delta x_3 \\ &= \frac{-K_{p1} T_{p1} K_{FC} K_{p2}}{2H_\omega} (\Delta P_w + \Delta P_m - \Delta P_{load}) - K_{p1} T_{p1} K_{FC} K_{p2} \omega_2 + K_{p1} \Delta x_2 - \Delta x_3 \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\frac{d\Delta x_4}{dt} = \frac{1}{T_{p2}} (\Delta x_3 - \Delta x_4) \quad (2.18)$$

$$\frac{d\Delta P_m}{dt} K_{P3} K_{PC} \Delta x_4 - P_m \quad (2.19)$$

## 2.7 Kontroler P-I-D

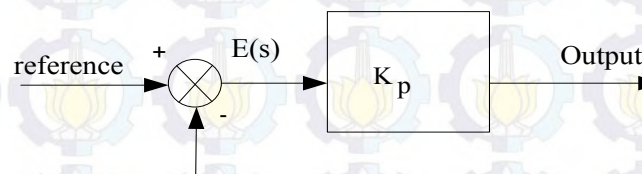
Error dalam suatu sistem dapat menyebabkan sistem tersebut mengalami gangguan dan membuat sistem tidak stabil. Agar sistem tersebut stabil kembali, maka diperlukan suatu kontroler. Fungsi kontroler tersebut adalah untuk

mereduksi sinyal error pada sistem. Suatu sistem kontrol akan semakin baik kinerjanya jika semakin cepat reaksi sistem mengikuti sinyal aktual dan semakin kecil kesalahan yang terjadi. Kontroler yang banyak digunakan saat ini adalah kontroler proporsional integral differensial (PID). Penggunaan kontroler PID sederhana dan dapat meningkatkan performansi sistem dengan cepat.

### 2.7.1 Kontroler Proporsional

Luaran kontroler proporsional adalah hasil kali antara sinyal input dengan gain proporsional. Selain itu, luarannya juga akan sebanding dengan besar sinyal error, yaitu selisih antara harga aktualnya dengan besaran yang *reference*. Perubahan sinyal input tersebut menyebabkan sistem mengubah luaran sebesar konstanta pengali.

Blok diagram hubungan antara besaran aktual, besaran *setting*, dan besaran luaran kontroler proporsional ditunjukkan pada gambar 2.10. Sinyal positif atau negatif yang dikeluarkan kontroler dipengaruhi oleh sinyal *error*, yaitu selisih antara besaran *setting* dengan besaran aktual. Sinyal positif akan mempercepat pencapaian harga *setting*, sedangkan sinyal negatif akan memperlambat tercapainya harga atau performansi sitem yang diinginkan.



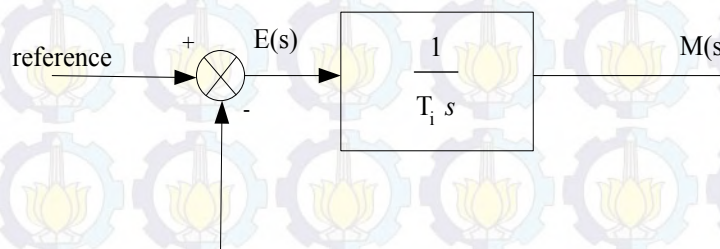
Gambar 2.6. Diagram blok kontroler proporsional

Konstanta proporsional pada kontroler proporsional adalah nilai faktor penguatan terhadap sinyal kesalahan  $K_p$ . Sistem respon yang lambat akan terjadi apabila nilai  $K_p$  kecil karena kontroler proporsional hanya melakukan koreksi kesalahan yang kecil. Sebaliknya jika nilai  $K_p$  dinaikkan maka respon sistem akan menjadi lebih besar. Sedangkan jika nilai  $K_p$  diperbesar sehingga mencapai nilai yang berlebihan, maka akan terjadi osilasi pada respon sistem atau sistem tidak bekerja secara stabil.

### 2.7.2. Kontroler Integral

Kontroler integral berfungsi untuk menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol. Jika sebuah *plant* memiliki unsur integrator ( $1/s$ ) maka akan terjadi luaran sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol. Respon sistem yang demikian dapat diperbaiki dengan kontroler integral.

Luaran pada kontroler integral dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan sinyal kesalahan atau *error*, selain itu luarannya adalah jumlah yang kontinu dari perubahan inputnya. Luaran akan tetap menjaga sistem dalam keadaan stabil sebelum terjadi perubahan masukan jika sinyal *error* tidak mengalami perubahan. Gambar 2.4 adalah blok diagram besaran kesalahan dengan luaran kontroler integral.



Gambar 2.7. Diagram blok kontroler integral

Jika terjadi kesalahan berlipat ganda maka nilai laju perubahan kontroler integral menjadi dua kali semula. Sinyal kesalahan yang relatif kecil dapat menyebabkan laju luaran yang lebih besar apabila nilai konstanta integrator berubah menjadi lebih besar.

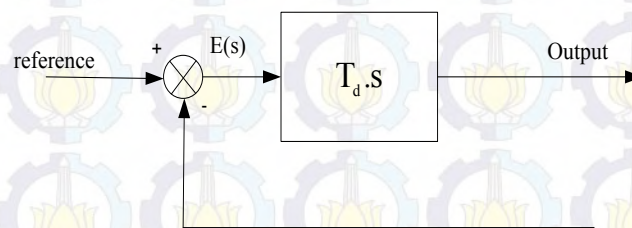
Kontroler integral memiliki beberapa karakteristik yaitu sebagai berikut :

1. Luaran kontroler integral membutuhkan suatu selang waktu yang menyebabkan kontroler ini membuat respon berjalan lebih lambat. Luaran kontroler integral tetap bertahan pada nilai sebelumnya jika sinyal kesalahan berharga nol.
2. Luaran kontroler integral akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi besarnya sinyal kesalahan dan nilai  $K_i$ , apabila harga sinyal kesalahan tidak nol.

3. Semakin besar nilai dari konstanta  $K_i$ , maka mengakibatkan peningkatan osilasi sinyal luaran kontroler integral, dan konstanta  $K_i$  yang berharga besar menyebabkan percepatan hilangnya *offset*.

### 2.7.3. Kontroler Diferensial

Ketika tidak ada perubahan pada sinyal masukan, maka luaran kontroler differensial juga tidak mengalami perubahan. Apabila sinyal masukan mengalami perubahan secara tiba-tiba dan naik (fungsi step), maka sinyal luaran kontroler akan berbentuk impuls. Jika sinyal masukan naik secara perlahan (fungsi ramp), maka sinyal luarannya adalah fungsi *step* yang besar magnitudonya dipengaruhi oleh faktor konstanta differensial  $T_d$  dan kecepatan naik dari fungsi *ramp*.



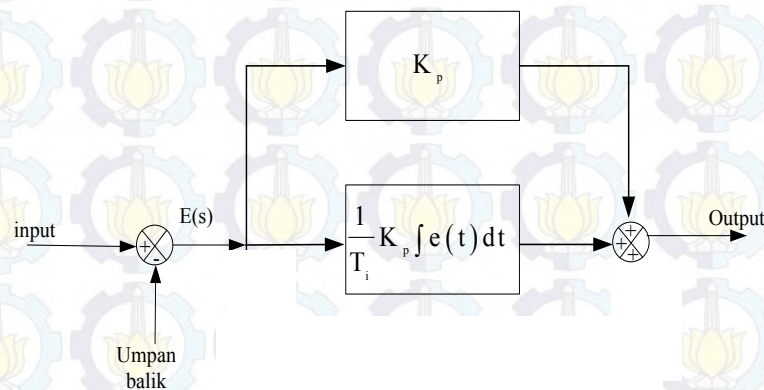
Gambar 2.8. Diagram blok kontroler diferensial

Luaran pada kontroler diferensial tergantung pada nilai  $T_d$  dan laju perubahan sinyal kesalahan apabila terdapat perubahan sinyal kesalahan terhadap waktu. Kontroler differensial tidak akan dapat menghasilkan luaran jika tidak ada perubahan pada masukannya. Kontroler diferensial dapat cenderung membuat sistem lebih stabil karena kontroler ini dapat menghasilkan koreksi yang baik sebelum pembangkit kesalahan menjadi sangat besar

Kontroler diferensial tidak digunakan apabila tidak ada kontroler lain dalam sebuah sistem karena kontroler diferensial berfungsi untuk membuat respon awal suatu sistem lebih cepat, tetapi tidak memperkecil kesalahan pada keadaan tunaknya. Selain itu, kerja kontroler ini hanya efektif pada periode peralihan.

#### 2.7.4. Kontroler Proporsional dan Integral

Kontroler proporsional ditambah integral adalah kontroler yang dapat saling melengkapi masing-masing kontroler P dan I dengan menggabungkan kedua kontroler secara paralel. Komponen-komponen dari kontroler P dan I, masing-masing berfungsi untuk membuat reaksi dari sebuah sistem menjadi lebih cepat, menghasilkan perubahan awal yang besar, serta menghilangkan *offset*.



Gambar 2.9. Diagram blok kontroler PI

Jumlahan luaran kontroler proporsional dan integral adalah luaran kontroler PI. Kedua parameter  $P$ , dan  $I$  sangat mempengaruhi karakteristik kontroler PI. Penentuan konstanta  $K_p$  dan  $T_i$  akan menimbulkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen  $P$  dan  $I$ . Elemen kedua konstanta tersebut dapat dibuat lebih dominan dibanding yang lain. Kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan akan diberikan oleh konstanta yang dominan. (Wendy, 2012)

#### 2.8. Algoritma Optimisasi

Dalam menyelesaikan masalah optimisasi, sudah banyak metode yang dikembangkan para ilmuwan. Dalam (Yang, 2011), metode optimisasi dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai sudut pandang, bergantung pada karakteristik dan fokusnya.

Apabila turunan atau gradien fungsi adalah fokusnya, optimisasi dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Algoritma *gradient-based*, yang membutuhkan informasi gradien. Contohnya adalah algoritma *hill-climbing*. Algoritma ini tidak dapat bekerja jika fungsi yang dihadapi tidak diferensiabel atau tidak kontinu.
2. Algoritma *derivative-free*, yang tidak membutuhkan informasi gradien, tapi hanya membutuhkan nilai dari fungsi itu sendiri.

Algoritma optimisasi juga dapat diklasifikasikan ke dalam algoritma deterministik atau stokastik. Jika suatu algoritma bekerja tanpa ada proses acak di dalamnya, maka algoritma ini bersifat deterministik. Dengan algoritma ini, akan dicapai solusi yang sama dengan titik tebakan awal yang sama. *Hill-climbing* merupakan contoh dari algoritma optimisasi yang deterministik. Di sisi lain, jika ada unsur keacakan dalam algoritma optimisasi, berarti ia bersifat stokastik. Biasanya, algoritma ini mencapai titik yang berbeda setiap kali algoritma ini dieksekusi, walaupun titik tebakan awal yang digunakan selalu sama. Contoh dari algoritma stokastik adalah *Genetics Algorithm* (GA) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO).

## **2.9. Algoritma Optimisasi Metaheuristik**

Aplikasi di bidang teknik dan industri sering melibatkan masalah optimisasi dengan kendala-kendala yang kompleks. Masalah tersebut seringkali bersifat nonlinear, sehingga masalah ini sulit diselesaikan. Metode-metode klasik seringkali tidak dapat bekerja dengan baik dengan masalah-masalah yang nonlinear dan multimodal seperti ini. Salah satu penyebabnya adalah karena di dalam metode klasik seperti metode Newton dibutuhkan informasi gradien—dan di dalam metode lainnya, dibutuhkan Hessian—padahal tidak semua fungsi memiliki gradien di daerah definisinya. Sebab lainnya adalah kekonvergenan metode klasik tersebut biasanya bergantung pada nilai titik tebakan awal, sehingga dalam iterasi prosesnya, ada peluang proses pencarian terjebak di nilai optimum lokal.

Untuk menyelesaikan masalah-masalah sulit yang telah disebutkan di atas, tren para ilmuwan dan teknisi saat ini adalah dengan menerapkan metode metaheuristik. Secara kebahasaan, kata *metaheuristics* berasal dari kata *meta* dan *heuristics*. *Meta* menggambarkan level yang lebih tinggi. Jadi metaheuristik

adalah algoritma heuristik tingkat tinggi. *Heuristics* berasal dari bahasa Yunani "Εὕρισκω", yang berarti menemukan. Heuristik merujuk pada teknik yang berbasis pengalaman *trial-and-error* untuk menyelesaikan dan mempelajari suatu masalah, yang memberikan solusi yang tidak dijamin keoptimalannya, dalam jangka waktu yang cukup layak. Dalam (Judea, 1983), heuristik adalah strategi yang menggunakan informasi yang dengan mudah diakses atau diperoleh untuk mengontrol penyelesaian masalah di dalam kehidupan manusia maupun mesin. Metode heuristik digunakan untuk mempercepat proses untuk menemukan solusi yang cukup baik melalui jalan pintas mental untuk meringankan beban kognitif dalam membuat keputusan. Dalam (Talbi, 2009), disebutkan bahwa metode heuristik didesain untuk memecahkan masalah spesifik. Sedangkan, metaheuristik merupakan algoritma multi-fungsi yang dapat diterapkan di hampir semua masalah optimisasi. Metode ini dapat dipandang sebagai metodologi tingkat tinggi yang dapat digunakan sebagai strategi penunjuk dalam mendesain heuristik yang didasari olehnya.

Dalam (Leonora, et. Al, 2009), disebutkan bahwa metaheuristik berarti prosedur atau algoritma heuristik tingkat tinggi yang didesain untuk menemukan, membuat, atau memilih prosedur atau algoritma heuristik dengan tingkat lebih rendah yang dapat memberikan solusi yang cukup baik untuk masalah optimisasi, khususnya masalah-masalah dengan informasi yang tidak lengkap atau dengan kapasitas komputasi yang terbatas.

Dalam waktu yang cukup singkat, algoritma metaheuristik dapat memberikan solusi *near-optimum* atau solusi yang dekat dengan solusi optimal. Walaupun demikian, tidak ada jaminan bahwa solusi tersebut dapat dicapai. Diharapkan bahwa algoritma-algoritma ini dapat berhasil di sebagian besar eksekusi atau percobaan, tapi tidak setiap saat. Sampai saat ini, hampir semua algoritma metaheuristik cenderung cocok untuk menyelesaikan masalah optimisasi global. Sampai saat ini, telah banyak hasil penelitian yang memperlihatkan bahwa metode metaheuristik ini bersifat sangat efisien. Karena alasan ini juga, literatur dari metode metaheuristik berkembang sangat pesat dalam beberapa dekade terakhir ini.

Dua unsur utama dalam metode metaheuristik adalah intensifikasi dan diversifikasi, atau eksploitasi dan eksplorasi. (Blum dan Roli, 2003, dalam Yang, 2011). Diversifikasi berarti membentuk solusi yang berbeda-beda untuk mengeksplorasi ruang pencarian dalam skala global, sedangkan intensifikasi berarti memfokuskan algoritma dalam mencari solusi di daerah lokal dengan mengetahui bahwa solusi yang baik sudah ada di area tersebut. Dalam setiap iterasi, akan dipilih solusi terbaik. Pemilihan solusi-solusi terbaik ini mengarahkan algoritma untuk mencapai titik optimum, sedangkan adanya kombinasi diversifikasi dan intensifikasi meningkatkan pencarian agar tidak terjebak di optimum lokal sambil meningkatkan akurasi dari solusi. Kombinasi dari dua komponen ini memberikan keyakinan bahwa titik optimal akan dapat dicapai.

Dalam mendesain dan mengembangkan algoritma optimisasi metaheuristik, alam merupakan salah satu inspirasi terbesar bagi para ilmuwan. Alam ini selama milyaran tahun telah menyelesaikan banyak masalah yang kompleks. Sangat banyak sistem biologis yang telah berkembang dengan efisiensi yang menakjubkan dalam memaksimalkan tujuan objektif mereka, seperti reproduksi. Berdasarkan karakteristik-karakteristik dari berbagai sistem biologi yang telah terbukti sukses ini, banyak algoritma yang terinspirasi alam (*nature-inspired*) yang telah dikembangkan di beberapa dekade terakhir ini. (Yang, 2010 dalam Yang, 2012). Sebagai contoh, *Genetics Algorithm* (GA) didasarkan kepada evolusi sistem biologi Darwin, *Particle Swarm Optimization* (PSO) didasarkan kepada perilaku kawanan ikan dan burung, juga *Bat Algorithm* (BA) didasarkan kepada perilaku ekolokasi kelelawar mikro. (Yang, 2012)

*Flower Pollination Algorithm* merupakan salah satu metode optimisasi metaheuristik yang diinspirasi oleh fenomena penyerbukan bunga. Metode ini dikembangkan oleh Xin-She Yang pada tahun 2012 untuk menyelesaikan masalah optimisasi global pada daerah definisi kontinu.

## **2.10. Randomisasi**

Umumnya, metode optimisasi metaheuristik bersifat stokastik. Proses eksplorasi maupun eksploitasi di dalam optimisasi metaheuristik selalu



melibatkan proses randomisasi, termasuk pada proses penyebaran nilai titik awal atau disebut juga dengan agen solusi.

### 2.10.1. Random Walk

*Random Walk* adalah proses acak yang merupakan jumlah dari langkah-langkah acak yang berdistribusi acak. Misalkan  $S_N$  menyatakan jumlah parsial dari  $N$  langkah peubah acak. Maka membentuk random walk,

$$S_N = \sum_{i=1}^N x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_N \quad (2.20)$$

dengan  $x_i$  merupakan langkah yang berdistribusi acak. Relasi ini dapat ditulis dalam bentuk rekursif menjadi:

$$S_{N+1} = S_N + x_{N+1} \quad (2.21)$$

Hal ini menunjukkan bahwa posisi selanjutnya, yaitu  $S_{N+1}$  hanya bergantung pada posisi saat ini  $S_N$ , dan transisi dari posisi saat ini ke posisi selanjutnya  $x_{N+1}$ . Relasi ini menunjukkan bahwa random walk merupakan Rantai Markov, dengan bentuk umum  $S_{i+1} = S_i + \omega_1$  dengan  $S_i$  menyatakan keadaan (state) pada waktu  $t$  dan  $\omega_1$  menyatakan langkah atau variabel acak dengan distribusi tertentu. Random walk disebut sebagai Brownian Motion jika langkah acaknya berdistribusi Gauss dan disebut Lévy Flights jika langkah acaknya mengikuti distribusi Lévy. (Yang, 2010)

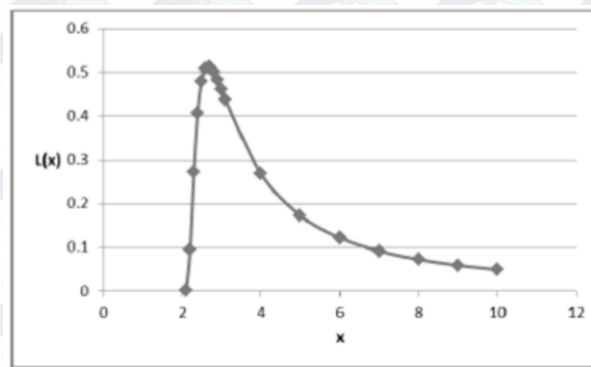
### 2.10.2. Lévy Flights dan Algoritma Mantegna

*Lévy Flights* adalah *random walk* dengan panjang langkah diambil dari distribusi Lévy, yang sering direpresentasikan dalam formula pangkat sederhana  $L(s) \sim |s|^{-1-\beta}$  dengan  $0 < \beta < 2$  adalah satuan indeks.

Distribusi Lévy merupakan distribusi yang nonnegatif dan berekor tebal (*heavy tail*) Berikut ini adalah fungsi kepadatan peluang dari distribusi Lévy.

$$L(x, \gamma, \mu) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \frac{1}{(x - \mu)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(\frac{\gamma}{2(x - \mu)}\right), & 0 < \mu < x < \infty \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2.22)$$

dengan  $\mu > 0$  adalah langkah minimum dan  $\gamma$  adalah parameter skala.



Gambar 2.10 Grafik Distribusi Lévy dengan  $\mu = 2$  dan  $\gamma = 1$

Secara umum, distribusi Lévy didefinisikan dalam bentuk transformasi Fourier:

$$F(k) = \exp(-\alpha|k|^\beta) dk, \quad (2.23)$$

dengan  $\alpha$  yang merupakan parameter skala. Inversi dari integral ini tidak mudah diperoleh, karena bentuk ini tidak memiliki bentuk analitik. Namun, terdapat beberapa kasus khusus terkait dengan nilai  $\beta$ . Jika  $\beta = 2$ , transformasi Fourier membentuk distribusi Normal. Jika  $\beta = 1$  akan diperoleh distribusi Cauchy.

Untuk kasus umum, invers integral

$$L(s) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \cos(ks) \exp(-\alpha|k|^\beta) dk \quad (2.24)$$

dapat diestimasi hanya jika  $s$  bernilai besar. Kita memiliki

$$L(s) \rightarrow \frac{\alpha\beta\Gamma(\beta) \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\pi|s|^{1+\beta}}, s \rightarrow \infty \quad (2.25)$$

Dalam hal ini  $\Gamma(z)$  merupakan fungsi *gamma*

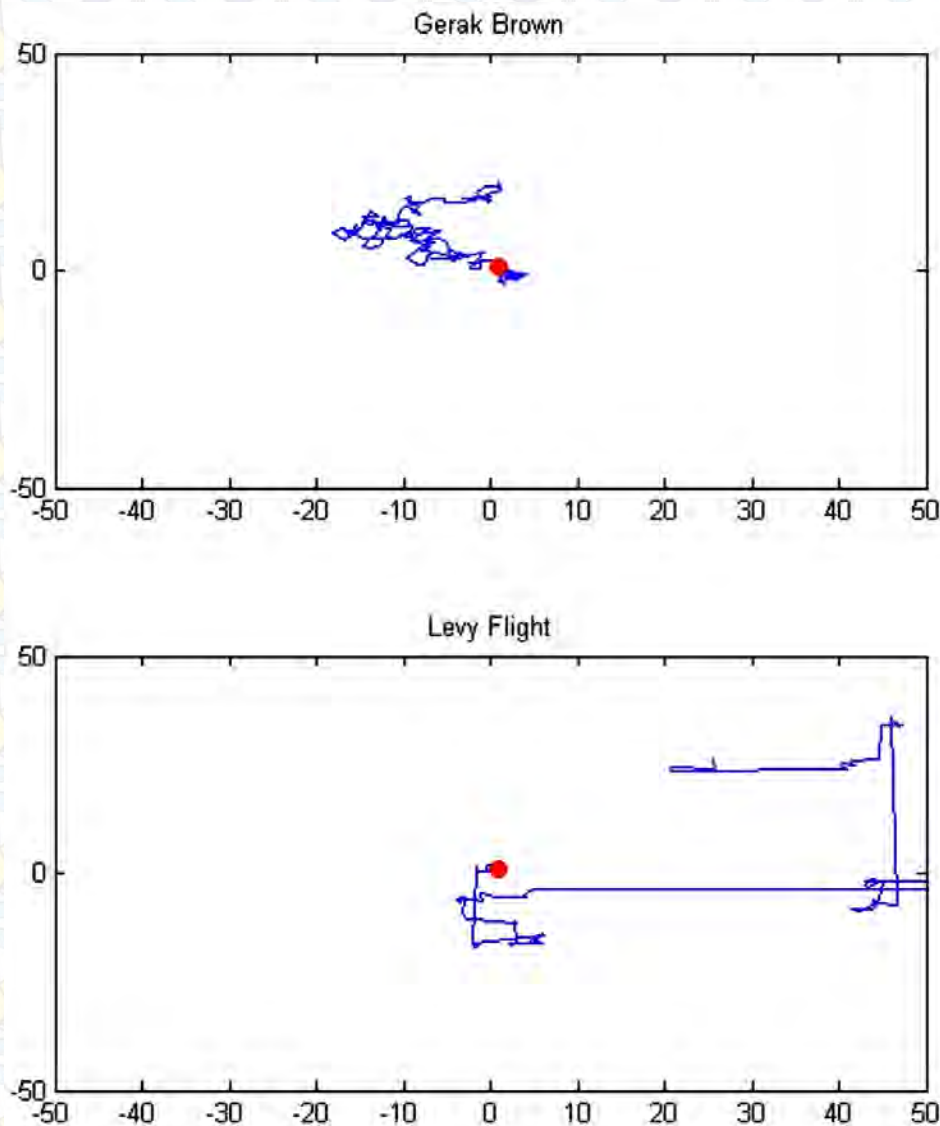
$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (2.26)$$

Untuk kasus  $z=n$  merupakan bilangan bulat,  $\Gamma(n) = (n-1)!$

Dalam (Yang, 2010), disebutkan bahwa Lévy *Flights* lebih efisien daripada Gerak Brown dalam mengeksplorasi ruang pencarian berskala besar yang tidak dikenal. Salah satu argumentasi dari pernyataan ini adalah bahwa variansi dari Lévy *Flights* meningkat jauh lebih cepat daripada variansi dari Gerak Brown.

Gambar 2.2 memperlihatkan jalur perpindahan posisi dari 200 langkah Gerak Brown dengan  $\mu = 1$  dan  $\sigma = 1$  (atas) serta Lévy Flights dimulai dari (0,0) dengan  $\beta = 1$  (bawah). Dapat dilihat dari ilustrasi tersebut, bahwa Lévy Flights dapat melangkah ke titik yang lebih jauh daripada Gerak Brown.

Dari segi implementasi Lévy Flights, terdapat dua hal penting yang perlu diperhatikan, yaitu pemilihan arah dan penentuan langkah acak yang mengikuti distribusi Lévy. Sudah banyak cara yang dikembangkan untuk ini. Salah satu cara yang paling efisien dan cepat adalah dengan menerapkan Algoritma Mantegna untuk simulasi distribusi stabil Lévy yang simetrik. Dalam hal ini ‘simetrik’ berarti bahwa langkah yang dihasilkan bisa positif maupun negatif.



Gambar 2.11 Gerak Brown dan Lévy Flights pada Ruang 2 Dimensi

Di dalam Algoritma Mantegna, panjang langkah  $s$  dapat dihitung dengan

$$s = \frac{u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}}, \quad u \sim N(0, \sigma_u^2), \quad v \sim N(0, \sigma_v^2) \quad (2.27)$$

Dengan

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1 + \beta) \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1 + \beta}{2}\right) \beta 2^{\frac{\beta-1}{2}}}\right\}, \quad \sigma_v = 1 \quad (2.28)$$

Distribusi ini (untuk  $s$ ) memenuhi distribusi Lévy untuk  $|s| > |s_0|$ , dengan  $s_0$  langkah terkecil. Pada prinsipnya,  $|s_0| \gg 0$  namun pada kenyataannya,  $s_0$  dapat diambil cukup kecil seperti  $s_0 = 0,1$  sampai  $1$ . Dalam berbagai penerapan, nilai  $\beta = 1,5$  memberikan hasil yang baik (Mantegna, 1994).

Beberapa studi yang lalu menunjukkan bahwa Lévy Flights dapat memaksimalkan proses pencarian dalam lingkungan yang tidak pasti. Kenyataannya, Lévy Flights telah diobservasi di antara pola-pola pergerakan lalat buah, elang laut, dan laba-laba dalam mencari makanan. Karakteristik Lévy Flights dengan syarat-syarat tertentu juga terlihat di berbagai fenomena fisis seperti difusi molekul fluorescent, perilaku pendinginan, serta noise (Yang, 2010).

### 2.11. Karakteristik Penyerbukan Bunga

Tumbuhan yang memiliki bunga (*spermatophyta*) telah berevolusi selama lebih dari 125 juta tahun. Diperkirakan bahwa terdapat lebih dari 250.000 jenis tanaman berbunga dan sebanyak 80% dari seluruh spesies tumbuhan adalah tumbuhan yang memiliki bunga. Tujuan utama dari adanya bunga pada tumbuhan adalah untuk melakukan reproduksi melalui penyerbukan. Penyerbukan bunga biasanya diasosiasikan dengan perpindahan serbuk sari selaku alat kelamin jantan pada bunga ke putik bunga selaku alat kelamin betina pada bunga. Perpindahan tersebut sering dihubungkan dengan adanya perantara penyerbuk seperti serangga, burung, kelelawar, dan binatang-binatang lainnya (Yang, 2013).

Ditinjau dari perantaranya, terdapat dua proses utama dalam penyerbukan, yaitu penyerbukan abiotik dan penyerbukan biotik. Penyerbukan abiotik adalah penyerbukan yang tidak melibatkan perantara organisme lain. Angin dan difusi membantu penyerbukan tumbuhan-tumbuhan ini, dan rumput adalah salah satu

contohnya. Hanya 10% dari tanaman berbunga yang diserbuki tanpa bantuan organisme lain. Sisanya, yaitu sekitar 90%, melakukan penyerbukan biotik (Glover, 2007).

Penyerbukan biotik adalah penyerbukan yang melibatkan perantara penyerbuk yang berupa makhluk hidup (disebut juga *pollinators*) seperti serangga, burung, dan kelelawar. Dalam hal ini, serbuk sari dari suatu bunga dipindahkan ke bunga lain oleh perantara penyerbuk. Perantara penyerbuk ini bisa bermacam-macam. Diperkirakan terdapat paling tidak 200.000 jenis perantara penyerbuk seperti serangga, kelelawar, dan burung. Salah satu contoh yang bagus adalah lebah madu, dan mereka juga telah mengembangkan *flower constancy*. *Flower constancy* adalah fenomena kecenderungan serangga penyerbuk untuk mengunjungi secara eksklusif jenis-jenis bunga tertentu, dengan mengabaikan spesies bunga lainnya. Fenomena ini dapat menghasilkan keuntungan-keuntungan evolutif untuk spesies bunga yang bersangkutan maupun perantara penyerbuk. Fenomena ini memaksimalkan perpindahan serbuk sari bunga ke tumbuhan yang sejenis, sehingga memaksimalkan banyak kejadian reproduksi dari spesies bunga yang sama. Bagi perantara penyerbuk, fenomena ini juga menguntungkan, karena mereka dapat memperoleh persediaan nektar dengan mudah, dengan memori mereka yang terbatas serta usaha belajar, berpindah, dan eksplorasi yang minimum. Dibandingkan dengan mencari spesies-spesies bunga yang terlihat akan lebih menjanjikan, *flower constancy* membutuhkan lebih sedikit 'biaya' dan lebih menjamin ketersediaan nektar (Waser, 1986, dalam Yang 2013).

Ditinjau dari asal serbuk sari, terdapat tiga cara penyerbukan antar spesies bunga yang sama, yaitu penyerbukan serumah, dan penyerbukan silang. Penyerbukan silang disebut juga dengan allogami, yang berarti bahwa penyerbukan dapat terjadi dari serbuk sari yang berasal dari bunga milik tumbuhan yang berbeda. Sedangkan penyerbukan serumah adalah fertilisasi yang terjadi bila serbuk sari dan putik berasal dari bunga lain maupun bunga yang sama, yang berada pada satu individu. Penyerbukan serumah seringkali terjadi tanpa mediasi hewan penyerbuk apa pun.

Penyerbukan silang dan penyerbukan biotik dapat terjadi pada jarak yang jauh. Hal ini disebabkan oleh kemampuan dari hewan penyerbuk seperti lebah,

kelelawar, burung, dan lalat dapat terbang pada jarak yang jauh, dengan lompatan atau jarak langkah terbang yang mengikuti distribusi Lévy (Pavlyukevich, 2007 dalam Yang, 2013). Lebih jauh, *flower constancy* dapat dipertimbangkan sebagai kenaikan langkah yang menggunakan kesamaan atau perbedaan dari dua bunga. Dari sudut pandang evolusi biologis, tujuan dari penyerbukan bunga adalah berkaitan dengan regenerasi dan seleksi alam. Spesies yang banyak berhasil melakukan penyerbukan adalah spesies yang akan bertahan.

### **2.12. Flower Pollination Algorithm (FPA)**

*Flower Pollination Algorithm* (FPA) dapat diterapkan di masalah optimisasi memaksimalkan maupun meminimumkan. Dilakukan idealisasi dari karakteristik fenomena penyerbukan bunga di subbab sebelumnya, fenomena *flower constancy*, dan kelakuan organisme penyerbuk dengan aturan-aturan sebagai berikut:

1. Penyerbukan biotik dan penyerbukan silang dipandang sebagai penyerbukan global dengan organisme penyerbuk pembawa serbuk sari yang melakukan gerakan *Lévy Flights*
2. Penyerbukan abiotik dan penyerbukan sendiri dipandang sebagai penyerbukan lokal
3. *Flower constancy* dipandang sebagai peluang reproduksi yang proporsional dengan similaritas dari dua bunga yang terlibat
4. Penyerbukan lokal dan global diatur oleh peluang berpindah .

Pada kenyataannya, setiap tanaman dapat memiliki bunga, dan setiap bunga dapat melepaskan jutaan bahkan milyaran gamet serbuk sari. Untuk alasan penyederhanaan, kita juga mengasumsikan bahwa setiap tanaman hanya memiliki satu bunga, dan setiap bunga hanya memproduksi satu gamet serbuk sari. Karena itu, kita tidak perlu membedakan antara sebuah gamet serbuk sari, sebuah bunga, sebuah tanaman berbunga, dan sebuah solusi dari sebuah masalah. Penyederhanaan ini berarti bahwa setiap solusi ekuivalen dengan sebuah bunga atau sebuah gamet serbuk sari.

Berikut adalah analogi penyerbukan bunga dan algoritma optimisasi penyerbukan bunga atau *Flower Pollination Algorithm* (FPA).

Tabel 2.2. Analogi Penyerbukan Bunga dengan Optimisasi

Masalah Optimisasi: $\max \text{ atau } \min f(x_i), x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in S^d \subset R^d, i = 1, 2, \dots, n$	
Fenomena Penyerbukan	Permasalahan Optimisasi
Daerah Cakupan Penyerbukan	Interval nilai $S^d, x \in S^d$
Populasi Bunga	Kandidat Solusi $(x_1, x_2, \dots, x_n)$
Tingkat kecocokan Bunga	Fungsi objektif $f$
Kejadian usaha penyerbukan	Iterasi
Gerak Penyerbukan Bunga	Pencarian Solusi pada Daerah Definisi
Dipilihnya Individu yang cocok	Keadaan Optimum

Terdapat dua langkah kunci di algoritma ini, yaitu penyerbukan global dan penyerbukan lokal. Pada langkah penyerbukan global, serbuk sari dari bunga dibawa oleh hewan penyerbuk seperti serangga, dan serbuk sari dapat melakukan perjalanan jarak jauh karena serangga dapat terbang dan bergerak di daerah yang luas. Proses ini bisa menghasilkan yang paling cocok, yang kita representasikan dengan Aturan pertama, ditambah dengan fenomena flower constancy dapat direpresentasikan secara matematis sebagai:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \gamma L(\lambda) (x_i^t - g^*) \quad (2.29)$$

dengan  $x_i^t$  menyatakan serbuk sari  $i$  atau vektor solusi  $x_i$  pada iterasi  $t$ , dan  $g^*$  adalah solusi terbaik di iterasi yang sedang berlangsung. Parameter  $L$  adalah kekuatan penyerbukan, yang pada dasarnya merupakan besar langkah. Karena serangga dapat bergerak jarak jauh dengan besar langkah yang berbeda, kita dapat menggunakan Lévy Flights untuk meniru karakteristik ini dengan efisien, yakni kita ambil  $L > 0$  dari distribusi Lévy

$$L \sim \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\frac{\pi\lambda}{2})}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}}, (s \gg s_0 > 0) \quad (2.30)$$

di sini  $\Gamma(\lambda)$  adalah fungsi gamma standar, dan distribusi ini berlaku untuk langkah  $s > 0$  yang cukup besar. Di seluruh simulasi pada laporan ini, digunakan Penyerbukan lokal (aturan 2) dan flower constancy dapat direpresentasikan sebagai

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \epsilon (x_j^t - x_k^t) \quad (2.31)$$

dengan  $x_j^t$  dan  $x_k^t$  adalah serbuk sari dari bunga-bunga yang berbeda dari spesies tanaman yang sama. Aturan ini meniru fenomena flower constancy di dalam

lingkungan yang terbatas. Secara matematis, jika  $x_k^t$  dan  $x_k^t$  berasal dari populasi yang sama, maka aturan ini menjadi *random walk* lokal jika kita ambil  $\epsilon$  dari distribusi uniform [0,1].

Kebanyakan aktivitas penyerbukan bunga dapat terjadi di skala lokal maupun global. Dalam prakteknya, bunga-bunga yang tidak terlalu jauh dari bunga asal serbuk sari akan lebih mudah terserbuki daripada bunga yang jauh. Untuk ini, digunakan peluang berpindah, yaitu  $p$ , untuk berpindah dari penyerbukan global ke penyerbukan lokal (Aturan 4). Untuk memulai,  $p=0,5$  dapat dipilih sebagai nilai tebakan awal dalam melakukan studi parameter untuk menemukan interval parameter yang paling tepat. Dari simulasi yang dilakukan oleh Yang (2012), diperoleh bahwa  $p=0,8$  bekerja dengan baik dalam kebanyakan penerapan.

Tabel 2.3. Parameter *Flower Pollination Algorithm*

Parameter	Penjelasan
P	Probabilitas perubahan/peralihan ( <i>switch</i> )
N	Populasi
M	Maksimum iterasi
$\epsilon$	Distribusi Uniform (0-1)
L	Step vektor
rand	Variabel random
$b^*$	Variabel solusi
$x_i^t$	Vektor solusi saat iterasi ke-t
$x_j^t$ dan $x_k^t$	Spesies tanaman yang sama

Adapun pseudo code untuk algoritma penyerbukan bunga dapat dilihat pada tabel sebagai berikut:



```

Objektif min atau max  $f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_d)$ 
Inisiasi populasi n bunga (gamet serbuk sari) sebagai solusi acak

Temukan solusi terbaik  $g_*$  di populasi awal

Definisikan switch probability  $p \in [0,1]$ 

Definisikan kriteria berhenti (akurasi atau iterasi maksimum)

While (t < Iterasi Maksimum)
    For i=1:n (seluruh n bunga dari populasi)
        If rand < p,
            Ambil vektor langkah L berdimensi d yang memenuhi distribusi Levy
            Penyerbukan global  $x_i^{t+1} = x_i^t + \gamma L(\lambda) (x_i^t - g^*)$ 
        Else
            Ambil  $\epsilon$  dari distribusi uniform (0,1)
            Lakukan penyerbukan lokal  $x_i^{t+1} = x_i^t + \epsilon (x_j^t - x_k^t)$ 
        End if
    End for
    Evaluasi solusi baru
    Jika solusi yang baru lebih baik, perbarui solusi ini ke dalam populasi
End while

Temukan solusi terbaik  $g_*$ 

Tampilkan solusi terbaik yang ditemukan

```

Gambar 2.12. Pseudo Code FPA

### 2.13 Kestabilan

Analisis kestabilan untuk sistem ini dilakukan dengan analisis *eigen value*. Untuk melakukan analisis ini, maka perlu dilakukan dengan memodelkan sistem secara matematis kemudian menyusun bentuk *state space*.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.32)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.33)$$

Berdasarkan matriks A, keadaan stabil dapat dipantau melalui persamaan

$$\text{Det}(\lambda I - A) = 0 \quad (2.34)$$

Dengan  $I$  adalah matriks identitas dan  $\lambda$  adalah eigen value dari matrik  $A$ . Dimensi matrik  $A$  mempengaruhi banyaknya eigen value pada sistem. Eigen value memiliki nilai komponen real dan imajiner yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda_i = \sigma_1 + j\omega_i \quad (2.35)$$

Dengan

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (2.36)$$

Keterangan

$\lambda_i$  = eigen value ke- $i$

$\sigma_1$  = komponen real eigen value

$\omega_i$  = komponen imajiner eigen value

komponen real dari eigen value berkaitan dengan konstanta redaman (damping ratio)  $\delta$  sedangkan komponen imajiner berkaitan dengan frekuensi osilasi.

Eigen value untuk komponen real yang negatif menunjukkan sistem stabil steady state. Damping ratio dapat ditentukan dari persamaan berikut

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \omega_i^2}} \quad (2.37)$$

Eigen value dijaga selalu negatif agar sistem tersebut stabil. Nilai damping ratio yang baik sebesar  $0.05 < \zeta_i < 1$  (Graham Rogers, 2004)

Total dari seluruh nilai damping ratio tergantung dari banyaknya eigen value yang disebut Comprehensive Damping Ratio dirumuskan sebagai berikut:

$$CDI = \sum_{i=1}^n (1 - \zeta_i) \quad (2.38)$$

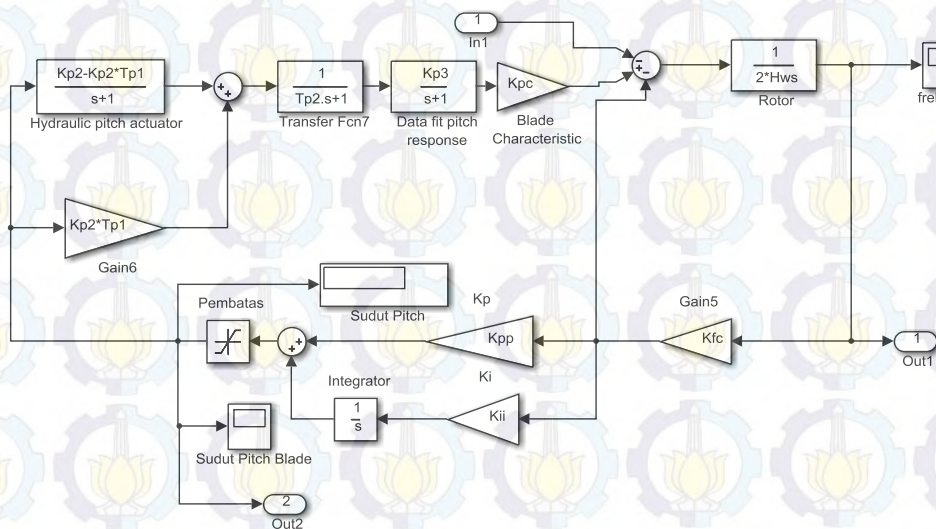
## BAB 3 METODA PENELITIAN

Metode penelitian terdiri dari penentuan plant turbin angin, penentuan parameter variabel simulasi, pengumpulan data melalui simulasi dengan *m.file* dan simulink MATLAB.

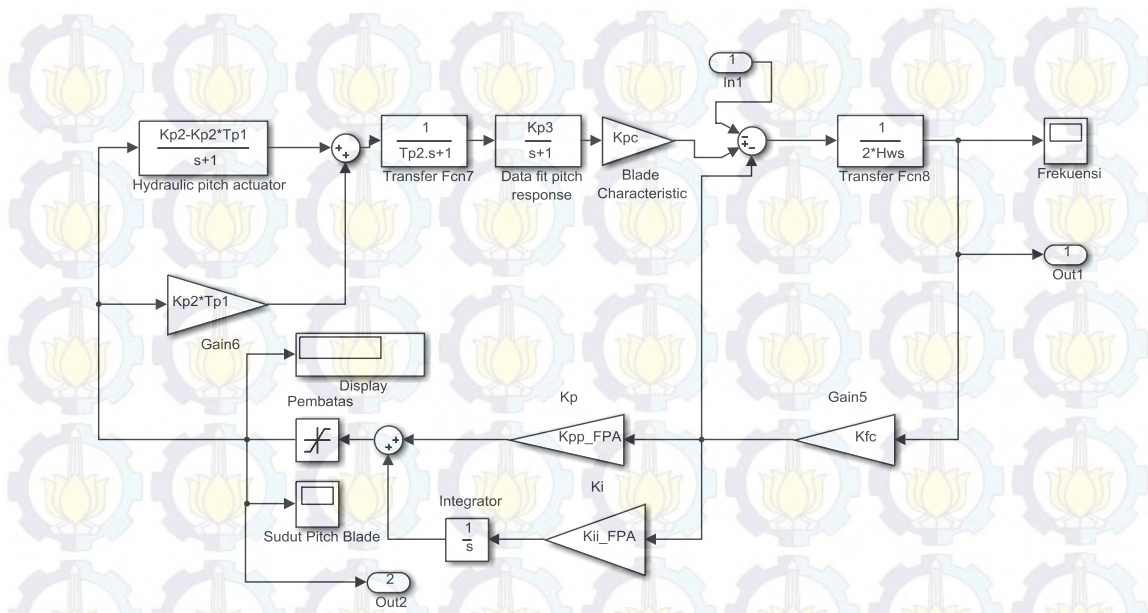
### 3.1. Plant Simulasi

Parameter sistem:

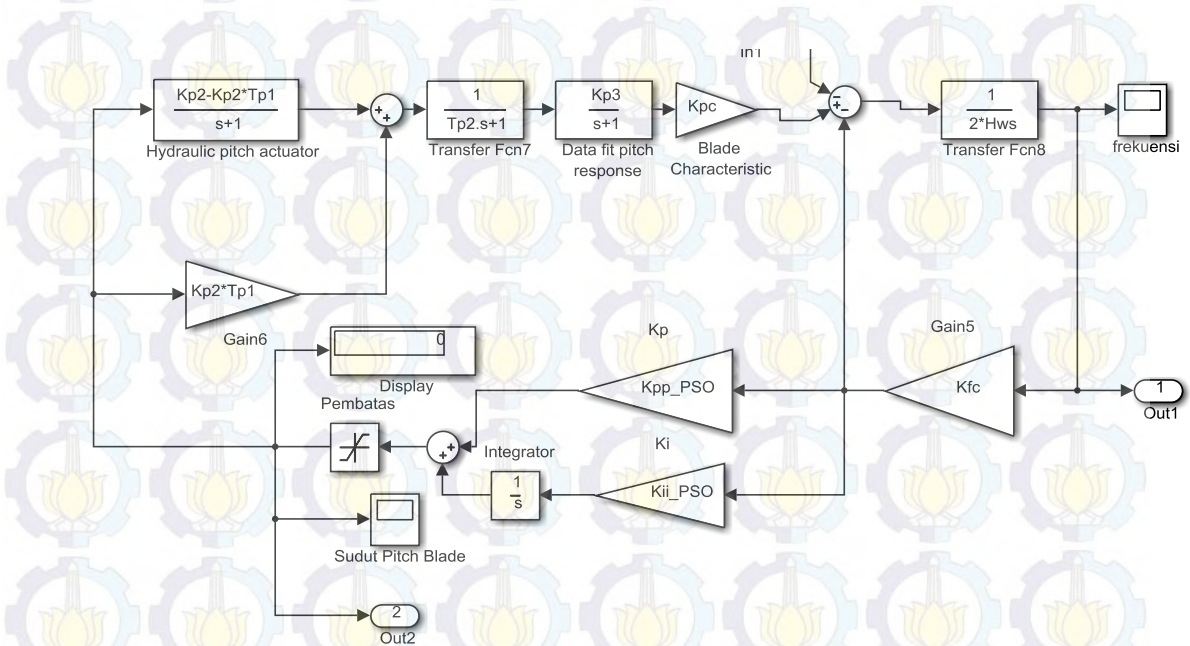
$H_w=3.5 \text{ s}$  ;  $H_d=8.5 \text{ s}$  ;  $K_{fc}=16.2 \text{ Hz/pu.kW}$  ;  $K_{p2}=1.25$   
 $K_{p3}=1.4$  ;  $T_1=0.025$  ;  $K_d=16.5 \text{ Hz/pu. kW}$   
 $T_{p1}=0.6$  ;  $T_{p2}=0.041$  ;  $K_{pc}=0.08 \text{ pu. kW/deg}$



Gambar 3.1. Diagram blok sistem pengendali *Pitch blade* pada turbin angin dengan *PI-Manual Tuning*



Gambar 3.2. Diagram blok sistem pengendali *Pitch blade* pada turbin angin dengan PI-FPA



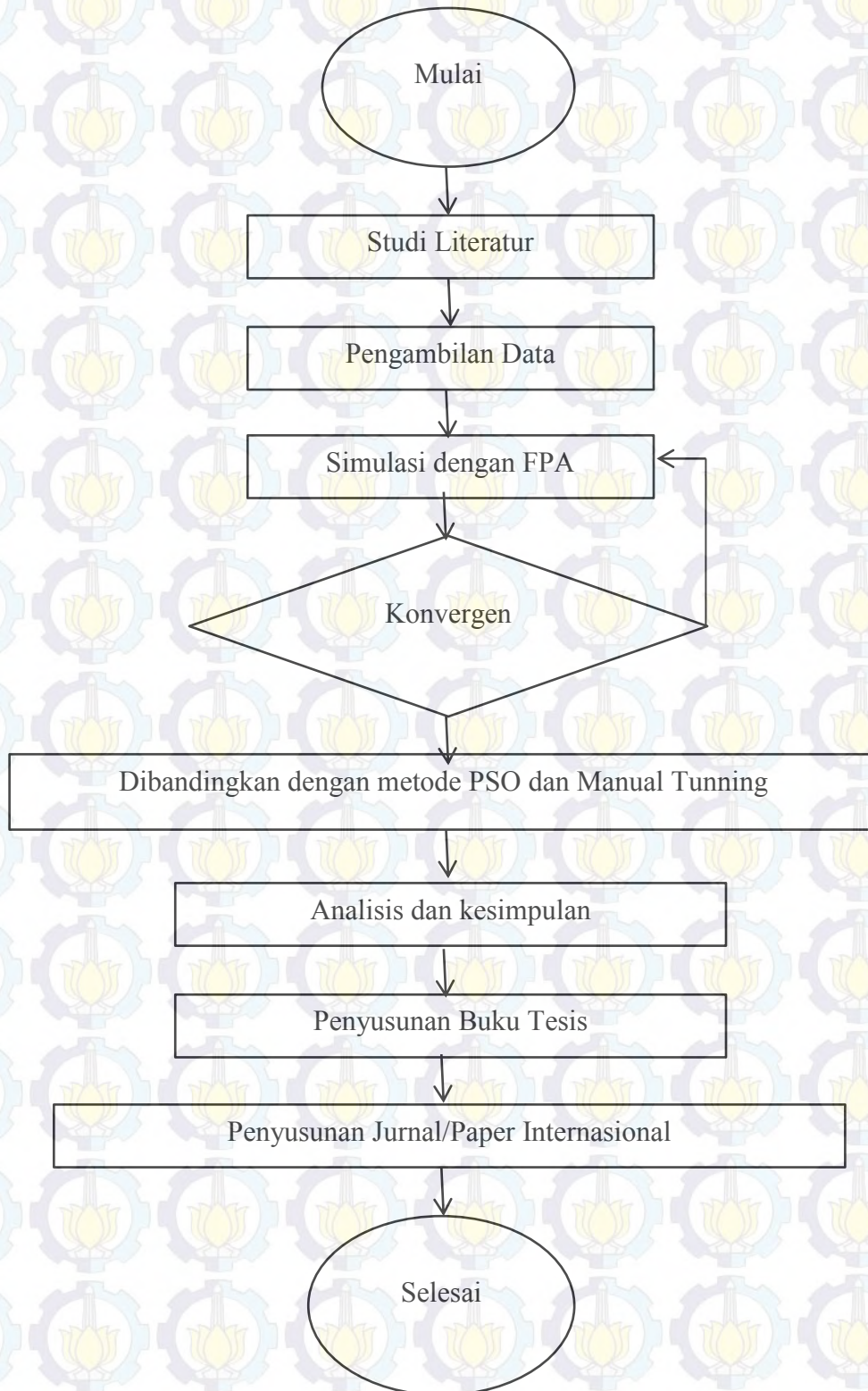
Gambar 3.3. Diagram blok sistem pengendali *Pitch blade* pada turbin angin dengan PI-PSO

### 3.2. State Space Sistem Turbin Angin

Berdasarkan diagram blok pada gambar 3.1 dan persamaan-persamaan 2.12 sampai 2.19 dapat dituliskan matrik *state space* (ruang keadaan) sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_2 \\ \Delta \dot{x}_2 \\ \Delta \dot{x}_3 \\ \Delta \dot{x}_4 \\ \Delta \dot{P}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2H_w} \\ -K_{FC} \cdot K_{P1} & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{FC} \cdot K_{P2}}{2H_w} \\ -K_{p1} \cdot T_{p1} \cdot K_{FC} \cdot K_{P2} & K_{p1} & -1 & 0 & -\frac{K_{p1} \cdot T_{p1} \cdot K_{FC} \cdot K_{P2}}{2H_w} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{p2}} & -\frac{1}{T_{p2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{PC} \cdot K_{P3} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_2 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta x_4 \\ \Delta P_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \\ 1 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_w \\ \Delta P_{load} \end{bmatrix}$$

### 3.3. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.4. Diagram alir penelitian

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Analisis Kestabilan *Steady State* (Tunak)

#### 4.1.1. Analisis *eigen value*

Berdasarkan sistem pada gambar 3.1. dilakukan analisis kestabilan sistem dengan menyelidiki *eigen value* dan *damping ratio*.

Tabel 4.1. Hasil Analisis Kestabilan *Steady State* (tunak)

<i>Eigen Value</i>	<i>Damping</i>	Frekuensi
-2,44e+01	1,00e+00	2,44e+01
-2,61+00	1,00e+00	2,61e+00
-1,33e-01+3,90e-01i	3,22e-01	4,12e-01
-1,33e-01-3,90e-01i	3,22e-01	4,12e-01
-1,46e+00	1,00e+00	1,46e+00

Nilai negatif untuk komponen real *eigen value* memberikan arti stabil pada sebuah sistem, hal ini sesuai dengan persamaan eksponensial negatif:

$$y(t) = \frac{|K(a+jb)|}{b} e^{at} \sin(bt + \alpha) \quad (\text{Ogata, 1995})$$

jika *eigen value* negatif untuk komponen real ( $a$ ) maka grafik akan turun (konvergen) mendekati nilai 0. Kondisi seperti ini menunjukkan sistem akan teredam dengan baik. Jika *eigen value* positif untuk komponen real, maka respon sistem akan divergen menjauhi nilai 0, sehingga sistem tidak akan pernah kembali ke kondisi *steady state*. Jika *eigen value* komponen real ( $a = 0$ ), maka akan beresilasi harmonik, yang berarti sistem tidak akan pernah stabil.

Berdasarkan buku (Kundur,1994) bahwa sistem dikatakan stabil apabila seluruh komponen real dari *eigen value* bernilai negatif. Sistem ini memiliki lima *eigen value* dan seluruhnya bernilai negatif, maka sistem ini dikatakan stabil *Steady state* (tunak).

Untuk memastikan kestabilan pada sistem turbin angin ini, dilakukan pula plot grafik nilai eigen untuk komponen real dan imajiner, seperti yang tersaji pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Plot Nilai Eigen pada Sistem Turbin Angin

Berdasarkan analisis data pada tabel 4.1. dan plot grafik pada gambar 4.1 dapat diketahui bahwa *eigen value* pada sistem turbin angin ini berjumlah lima. *Eigen value* berjumlah lima karena matriks sistem turbin angin berdimensi lima kali lima.

#### 4.1.2. Analisis damping ratio

Nilai *damping ratio* berdasarkan hasil simulasi pada tabel 4.1. menunjukkan nilai yang lebih besar dari pada 0,05. Berdasarkan buku (Rogers,2000), menyebutkan bahwa sistem yang baik memiliki redaman lebih besar dari 0,05 dan kurang dari 1 ( $0,05 < \zeta < 1$ ) sebab jika nilai osilasi berlangsung singkat dan cepat mencapai keadaan *steady state* (tunak).

Nilai *damping ratio* juga dijaga selalu positif. Sebab berdasarkan persamaan hubungan antara *eigen value* komponen real (2.37), *damping ratio*, dan frekuensi osilasi. Jika nilai *damping ratio* dijaga positif, maka nilai *eigen value* tetap negatif sehingga sistem menjadi stabil *steady state*.

Untuk menjaga nilai *damping ratio* tetap bernilai positif dan bernilai lebih besar dari 0,05, maka fungsi objektif menggunakan *Coprehensive Damping Ratio* (CDI). Fungsi objektif CDI dipakai dalam pencarian nilai Kp dan Ki menggunakan FPA dan PSO.



## 4.2. Analisis Kestabilan Transient pada Sudut *Pitch blade* Turbin Angin

### 4.2.1. Penentuan nilai $K_i$ dan $K_p$

Berdasarkan simulasi yang dilakukan dengan rangkaian sesuai gambar 3.1, diperoleh nilai  $K_i$  dan  $K_p$  sebagai berikut:

Tabel 4.2. Perbandingan Nilai  $K_p$  dan  $K_i$  untuk Semua Metoda Optimisasi

Metode Optimisasi	$K_i$	$K_p$
Manual	-3	4
FPA	-1.864	2.13
PSO	-2.3044	3.9342

### 4.2.2. Analisis Parameter Kestabilan *Transient*

Pada simulasi sistem ini, digunakan variasi nilai kecepatan angin antara 3 sampai dengan 9 meter/detik yang merupakan angin rata-rata yang ada di Indonesia dan 15 meter/detik merupakan angin badai. Pada kecepatan ini, diperoleh nilai sudut pada blade untuk ketiga metoda pada tabel 4.3.

Tabel 4.3. Perbandingan Sudut Pitch pada Blade Turbin Angin

Kecepatan angin (meter/detik)	Sudut pada <i>Pitch blade</i> Turbin Angin (derajat)		
	Manual Tuning	FPA	PSO
3	21,46	21,43	21,43
3,5	25,03	25	25,01
4	28,61	28,57	28,58
4,5	32,19	32,14	32,15
5	35,76	35,71	35,72
5,5	39,34	39,29	39,3
6	42,92	42,86	42,87
6,5	46,49	46,43	46,44
7	50,07	50	50,01
7,5	53,64	53,57	53,58
8	57,22	57,14	57,16
8,5	60,8	60,71	60,73
9	64,37	64,29	64,3
15	107,3	107,1	107,2

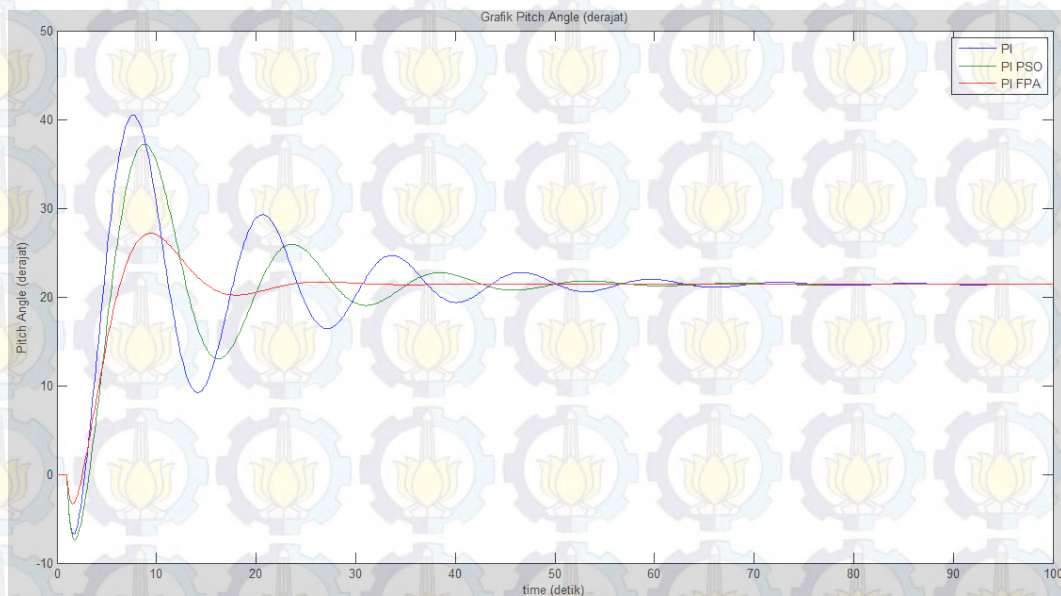
Pada sistem ini dibatasi nilai terbukanya blade antara  $0^0$  sampai  $90^0$ . Hasil perbaikan untuk *pitch blade* pada turbin angin adalah sebagai berikut:

Tabel 4.4. Perbandingan Sudut Pitch pada Blade Turbin Angin dengan Limiter

Kecepatan angin (meter/detik)	Sudut pada <i>Pitch blade</i> Turbin Angin (derajat)		
	Manual Tunning	FPA	PSO
15	90	90	90

Berdasarkan nilai yang ditunjukkan pada tabel 4.3 dan 4.4 dapat dilihat bahwa sistem bekerja baik saat kondisi *steady state*. Baik di sini, mengacu pada kecepatan angin rata-rata yang ada di Indonesia yaitu 3 meter/detik sampai dengan 8 meter/detik dan terbukanya blade antara  $0^0$ - $90^0$ . Pada analisis *steady state* menunjukkan semua metode dalam kondisi andal.

Analisis selanjutnya dilakukan pengamatan *overshoot* dan *settling time* melalui gambar 4.2. sebagai berikut:



Gambar 4.2. Perbandingan *Overshoot* dan *Settling Time* pada Sudut *Pitch Blade*

*Overshoot* dalam sistem ini dibatasi sebesar  $0^0$  sampai  $90^0$ . Saat *overshoot* melebihi batas. Maka blade akan membuka memberi respon sebesar  $90^0$ . Sedangkan jika ada minimum overshoot melebihi  $0^0$  maka akan tetap menutup tetap  $0^0$ .

Berdasarkan grafik plot dari matlab seperti gambar 4.2. diperoleh perbandingan nilai-nilai parameter analisis *transient* sebagai pada tabel 4.5 berikut ini:

Tabel 4.5. Perbandingan Parameter Analisis *Transient* pada Sudut *Pitch Blade*

Kecepatan Angin (meter/detik)	Parameter	Manual	FPA	PSO
3	<i>Overshoot</i>	40,44	27,16	37,22
	<i>Settling time</i>	28,87	12,79	26,12
3,5	<i>Overshoot</i>	40,44	27,16	37,22
	<i>Settling time</i>	28,87	12,79	26,16
4	<i>Overshoot</i>	53,93	36,21	49,62
	<i>Settling time</i>	35,65	13,3	26,1
4,5	<i>Overshoot</i>	60,67	40,73	55,82
	<i>Settling time</i>	35,09	12,78	25,56
5	<i>Overshoot</i>	67,41	45,26	62,02
	<i>Settling time</i>	35,09	12,78	32,04
5,5	<i>Overshoot</i>	74,15	68,23	49,78
	<i>Settling time</i>	35,41	14,15	31,57
6	<i>Overshoot</i>	80,89	54,31	74,43
	<i>Settling time</i>	35,91	13,85	33,36
6,5	<i>Overshoot</i>	87,63	58,84	80,63
	<i>Settling time</i>	35,91	13,44	26,68
7	<i>Overshoot</i>	94,37	63,36	86,84
	<i>Settling time</i>	35,54	12,78	33,05
7,5	<i>Overshoot</i>	101,1	67,89	93,04
	<i>Settling time</i>	41,22	13,3	32,81
8	<i>Overshoot</i>	107,9	72,41	99,24
	<i>Settling time</i>	41,63	13,3	32,68
8,5	<i>Overshoot</i>	114,6	76,94	105,4
	<i>Settling time</i>	42,04	13,73	33,05
9	<i>Overshoot</i>	121,3	81,46	111,6
	<i>Settling time</i>	41,38	13,48	32,92
15	<i>Overshoot</i>	202,2	135,8	186,1
	<i>Settling time</i>	46,98	19,57	33,87

Berdasarkan data yang ada dapat dilihat bahwa nilai saat kecepatan angin mencapai 7,5 meter/detik untuk maual tuning dan PSO memberikan nilai sudut blade yang kritis (dalam nilai toleransi). Nilai *overshoot* FPA tetap tangguh sampai kecepatan angin 9 meter/detik, melebihi kecepatan rata-rata di Indonesia yang sebesar 7-8 meter/detik. Berdasarkan analisis *overshoot*, FPA lebih handal dibandingkan PSO dan manual tuning untuk turbin angin ini.

Tabel 4.6. Perbandingan Parameter Analisis *Transient* pada Sudut *Pitch blade* Setelah Diberi Limiter

Kecepatan Angin (meter/detik)	Parameter	Manual	FPA	PSO
7	<i>Overshoot</i>	90	63,36	86,84
	<i>Settling time</i>	35,54	12,78	33,05
7,5	<i>Overshoot</i>	90	67,89	90
	<i>Settling time</i>	41,22	13,3	32,81
8	<i>Overshoot</i>	90	72,41	90
	<i>Settling time</i>	41,63	13,3	32,68
8,5	<i>Overshoot</i>	90	76,94	90
	<i>Settling time</i>	42,04	13,73	33,05
9	<i>Overshoot</i>	90	81,46	90
	<i>Settling time</i>	41,38	13,48	32,92
15	<i>Overshoot</i>	90	90	90
	<i>Settling time</i>	46,98	19,57	33,87

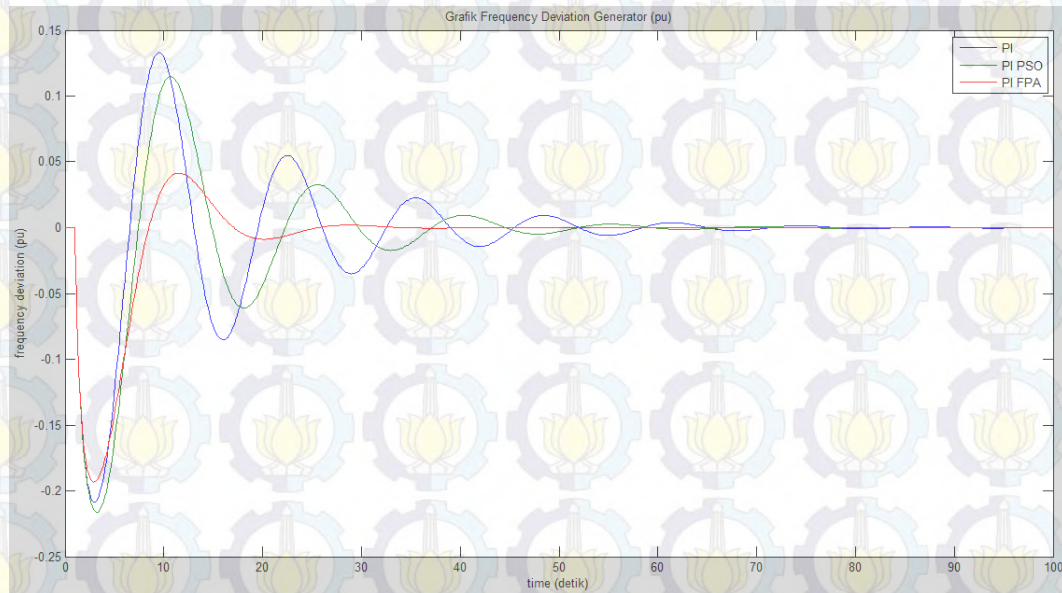
Pada kecepatan angin sebesar 15 meter/detik yang penulis anggap sebagai badai, semua metode yang dipakai menunjukkan hasil simulasi bahwa blade terbuka lebih dari  $90^{\circ}$ . Kondisi ini menunjukkan proteksi pada blade dan generator saat kondisi badai. Pada kondisi membuka  $90^{\circ}$  diharapkan tidak ada angin yang memutar blade, angin seluruhnya diloloskan. Dengan kondisi ini diharapkan blade tetap aman dari patah dan generator aman dari *over frequency*.



Gambar 4.3. Kondisi Sudut Pitch Blade saat Kecepatan Angin 15 meter/detik

### 4.3. Analisis Dinamis Sistem Tenaga pada Rotor Generator

Sedangkan untuk analisis *overshoot* dan *settling time* pada frekuensi generator disajikan pada gambar 4.3. sebagai berikut:



Gambar 4.4. Gambar Perbandingan *Overshoot* dan *Settling time* Semua Metode

Hasil lengkap perbandingan parameter analisis *transient* untuk frekuensi rotor disajikan lengkap dalam tabel 4.6. sebagai berikut:

Tabel 4.6. Perbandingan Parameter Analisis Dinamis pada Frekuensi Rotor

Parameter	Kecepatan (meter/detik)	Angin	Manual	FPA	PSO
<i>Overshoot</i>	3		-0,2085	-0,1934	-0,2161
<i>Settling time</i>			48,45	20,12	40,4
<i>Overshoot</i>	3,5		-0,2433	-0,2256	-0,2522
<i>Settling time</i>			48,45	20,12	40,4
<i>Overshoot</i>	4		-0,278	-0,2579	-0,2882
<i>Settling time</i>			48,45	20,12	40,4
<i>Overshoot</i>	4,5		-0,3128	-0,2901	-0,3242
<i>Settling time</i>			48,45	20,12	40,28
<i>Overshoot</i>	5		-0,3475	-0,3224	-0,3602
<i>Settling time</i>			48,45	20,12	47,91
<i>Overshoot</i>	5,5		-0,3823	-0,3546	-0,3963
<i>Settling time</i>			48,45	20,12	40,4
<i>Overshoot</i>	6		-0,417	-0,3862	-0,4323
<i>Settling time</i>			48,45	20,12	40,4

Parameter	Kecepatan Angin (meter/detik)	Manual	FPA	PSO
<i>Overshoot</i>	6,5	-0,4518	-0,4191	-0,4683
<i>Settling time</i>		55,01	20,12	47,8
<i>Overshoot</i>	7	-0,4865	-0,4513	-0,5043
<i>Settling time</i>		49,39	20,95	41,38
<i>Overshoot</i>	7,5	-0,5213	-0,4835	0,5403
<i>Settling time</i>		49,71	21,35	41,67
<i>Overshoot</i>	8	-0,556	-0,5158	-0,5764
<i>Settling time</i>		49,84	21,78	41,9
<i>Overshoot</i>	8,5	-0,5908	-0,5148	-0,6124
<i>Settling time</i>		50,07	22,02	42,21
<i>Overshoot</i>	9	-0,6285	-0,5802	-0,6484
<i>Settling time</i>		50,21	22,16	42,33
<i>Overshoot</i>	15	-1,043	-0,9654	-1,081
<i>Settling time</i>		56,74	23,51	49,39

Berdasarkan buku (kundur,1994) bahwa generator sinkron hanya boleh mengalami perubahan sebesar 0,8 Hz. Jika sebuah generator mengalami perubahan lebih dari 0,8 Hz maka akan mengalami pelepasan beban. Tabel 4.6 menunjukkan frekuensi yang lebih dari 0,8 Hz saat kecepatan angin 15 meter/detik. Namun, karena terjadi pembukaan blade yang 90<sup>0</sup> maka rotor pada generator pun tidak mengalami perubahan seperti tabel 4.7.

Tabel 4.7. Kondisi Saat Badai sehingga Rotor Berhenti Berputar

Parameter	Kecepatan Angin (meter/detik)	Manual	FPA	PSO
<i>Overshoot</i>	15	0	0	0
<i>Settling time</i>		0	0	0

#### 4.4. Analisis Pengoptimalan Konversi Energi Melalui Frekuensi

Kestabilan respon nilai frekuensi pada rotor, menunjukkan sistem stabil. Kestabilan putaran rotor menunjukkan turbin angin tahan terdapat perubahan putaran angin. *Overshoot* masih dalam batas yang diizinkan, yaitu  $\pm 0,8\text{Hz}$ . *Settling time* kurang dari 8 menit juga dalam batas yang diizinkan.

Kestabilan putaran rotor pada tiap perubahan kecepatan angin, menunjukkan proses konversi energi yang baik, dengan persamaan:

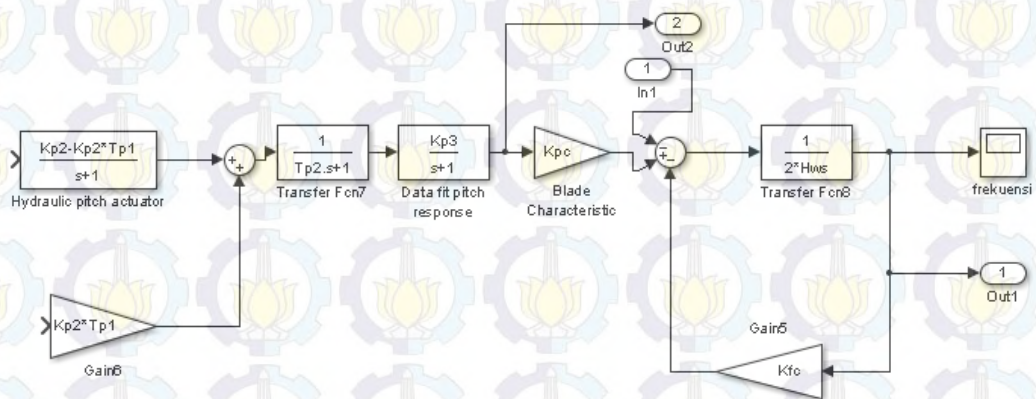
$$P = \tau\omega$$

Semakin cepat *settling time*, maka sistem akan lebih konstan pada frekuensi yang optimum untuk proses konversi energi. Parameter *overshoot* dan *settling time* terbaik ditunjukkan oleh algoritma FPA. FPA memberikan respon *overshoot* paling kecil dibandingkan PSO dan Manual tuning. FPA juga memberikan respon *settling time* paling cepat diantara dua metode lainnya.

Sebagai contoh, jika angin bertiup selama 1 menit. *Settling time* dari sinyal FPA 20 detik, metoda FPA mampu mengkonversi daya secara optimum selama 40 detik waktu sisa dari durasi angin. Sedangkan untuk metode PSO dan manual tuning memiliki waktu yang relatif lebih singkat untuk mengkonversi daya, karena nilai *settling time* lebih besar dibandingkan FPA.

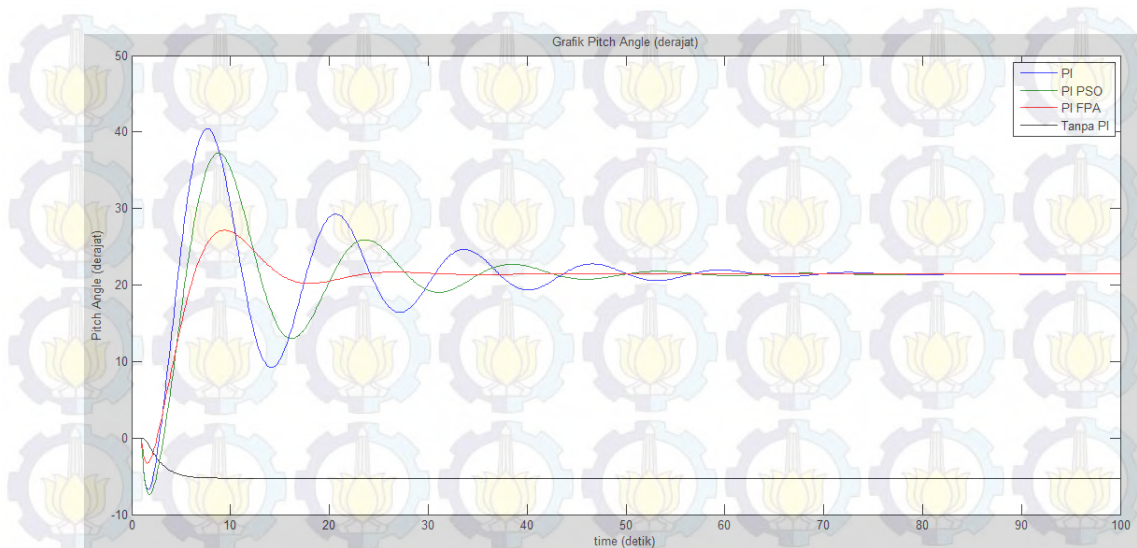
#### 4.5 Kondisi Tanpa Pengendali

Untuk menunjukkan pengoptimalan proses konversi energi dan kestabilan metode yang dipakai, dibuat analisis untuk sistem tanpa pengendali (*controller*) PI. Adapun diagram blok dari sistem, ditunjukkan pada gambar 4.5.

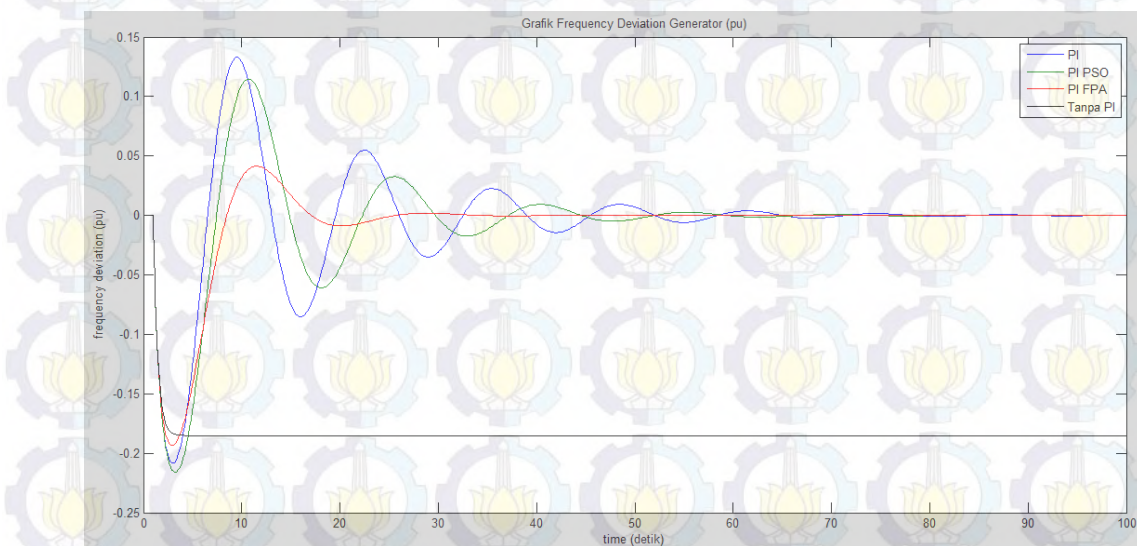


Gambar 4.5. Diagram Simulink Tanpa Pengendali

Berdasarkan simulasi dengan variasi kecepatan angin, diperoleh frekuensi putaran rotor pada gambar 4.6 dan sudut pitch blade pada gambar 4.7.



Gambar 4.6. Sudut Pitch Blade Ketika Kecepatan Angin 3 meter/detik



Gambar 4.7. Respon Frekuensi Rotor Ketika Kecepatan Angin 3 meter/detik

Berdasarkan gambar 4.6 dan 4.7, terlihat bahwa dalam keadaan tanpa pengendali menunjukkan respon frekuensi generator yang tidak menuju ke kondisi optimal dan sudut *pitch blade* yang tidak menuju ke sudut optimum.

Berdasarkan syarat kerja generator, maka kondisi tanpa PI ini merupakan kondisi paling tidak stabil dibandingkan dengan kondisi dengan pengendali PI. Dikatakan tidak stabil, hal ini terlihat dari respon sistem yang tidak mampu kembali ke kondisi *set point*.



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan analisis data, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Memiliki nilai *eigen value* komponen real yang negatif sehingga sistem stabil *Steady state* (tunak).
2. Nilai *damping ratio* lebih besar dari 0,05 dan kurang dari 1, maka sistem teredam dengan baik.
3. Berdasarkan parameter kestabilan *transient*, menunjukkan metoda *Flower Pollination Alghorithm* lebih baik dari metoda yang lain.
4. Berdasarkan respon frekuensi dari rotor generator, proses konversi energi yang paling baik berlangsung saat menggunakan metoda *Flower Pollination Alghorithm*.

#### 5.2. Saran

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dapat disarankan:

1. Menggunakan metoda kontroler lain seperti FLC, T1FIS, dan T2FIS
2. Menggunakan AI seperti: *Bat Algorithm*, *Bee Colony*, *Coocko Search Algorithm*, *Fire Fly*, dan lain-lain.

## Daftar Pustaka

A. Pintea, D. Pepescu, P Borne, (2010) “*Modeling and Control of Wind turbines*”, 12<sup>th</sup> symposium large scale system theory and App, France hal 00512206 Version 1- 27 Aug 2010

Al-Ma’shumah, Fatimah. (2014). “*Algoritma Penyerbukan Bunga (Flower Pollination Algorithm) untuk Mencari Akar-akar Sistem Persamaan tak Linear*”, ITB: Bandung

Bairwa, S.K. (2014) “*Computer Aided Modeling of Antenna Arrays Interfaced with The Pollination Method*” Department of Electrical Engineering National Institute of Technology,Rourkela Rourkela-769008, Odisha, INDIA

DJLPE. (2004), *National Energy Policy 2005-2025 Indonesia*, Direktorat General of electricity and energy using, Jakarta

Bianchi, Leonora; Marco Dorigo, Luca Maria Gambardella, and Walter J. Gutjahr (2009). “*A Survey on Metaheuristics for Stochastic Combinatorial Optimization*”. *Natural Computing: an International journal* 8 (2): 239–287. doi:10.1007/s11047-008-9098-4.

David G. Wilson et all, “*Optimized active aerodynamic blade control for load all eviation on large wind turbine*”, AWEA Windpower 2008 exhibition , Houston Texas, June 1-4, 2008

Evgenije Adzic, Zoran Ivanivic, (2009). “*Maximum power search in wind turbine based on Fuzzy Logic Control*”, *Ada Polytechnica Hungaria* Vol 6 No 1

F.D. Bianchi, R.J Mantz. C.F. Christiansen, (2004). “*Power regulation in Pitch controlledvariable-speed WECS above rated wind speed*”. *Renewable Energy* 29 1911-1922

Glover, B. J. (2007). “*Understanding Flowers and Flowering: An Integrated Approach*”. Oxford: Oxford University Press.

Helen, Markou,et all (2009), “*Control Stategies for operation of pitch regulated turbines above cut out wind speeds*”, Riso-DTU, Denmark, PSO-project 2009

Judea, Pearl. (1983). “*Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*”. New York: Addison-Wesley, p. vii. ISBN 978-0-201-05594-8

KR Ajao, (2009). “*Comparison of theoretical and experimental Power out put of small 3-blade Horizontal axiz wind turbine*”, Journal of American science: 5(4):79-90, Marsland Press

Kumar, Haris, et al (2015). “*PI/FL Based Pitch Angle Control for Wind Turbine Used in Wind Energy Convension System*”. RDCAPE. 978-1-4799-7247-0/15@2015 IEEE

Kundur, Praba. (1994).” *Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill

Lastomo, Dwi. (2015). *Optimization of PID Controller Design fo DC Motor Based on Flower Pollination Algorithm*. Elticom vol I USU Medan.

Maranas, C. D. dan Floudas, C. A. (1995). “*Finding All Solutions of Nonlinearly Constrained Systems of Equations. Journal of Global Optimization*”, 7, pp. 143 – 182.

Musyafa Ali, (2012), “*Rancang Bangun kontrol logika fuzzy pada sudut Pitch blade turbin angin untuk optimisasi daya listrik di ladang angin Jawa Timur*”, Disertasi S3 Teknik Sistem Tenaga ITS Surabaya

Onder Ozgener, (2006). “*A Small wind turbine system (SWTS) appliction and its performance analysis*”, Energy conversion and management 47 2006 1326-1337 elsevier

Patel, Mukund R., Ph.D., P.E (2006). “*Wind and Solar Power Systems Design, Analysis, and Operation Second Edition*”. U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, CRC PressTaylor & Francis Group: New York, U.S.A.

Robandi, Imam. (2006). “*Desain Sistem Tenaga Moodern*”. CV Andi Offset, Yogyakarta

Rogers, Graham, (2000), “*POWER SYSTEM OSCILLATIONS*”. Springer Science Business Media, LLC. New York

R.Ata, Y. Kocyigit, (2010). “*An Adaptive Neuro Fuzzy Inference system approach for prediction on tip speed ratioin wind turbines, ekspert system with appliction*” 37 (2010) 54545460, Elsevier Ltd.

www.wwindea.org (2009). “*World Energy Report 2009*”, Charles-de-Gaulle-Str.5 (53113) Bonn Germany

S.C. Tripathy and I.P. Mishra. (1999). “*Performance of wind-diesel power system with capacitive energy storage*”. Received 17 February 1995, Available online 22

December 1999. Elsevier. Energy Conversion and Management Volume 37, Issue 12, December 1996, Pages 1787–1798

Trivedi, Indrajit N.(2015). “*Optimized Over-Current Relay Coordination Using Flower Pollination Algorithm*”. 978-1-4799-8047-5/15/\$31.00 ©2015 IEEE

V Calderaro, V Galdia, A. Piccola, and P.Siano a, (2007). “A fuzzy controller for maximum energy extraction from variable speed wind power generation system”, DIIE, the university of Salerno –Italy, 31 Oktober 2007

Wendy Kurniawan Kautsar, (2012). “*Koordinasi Kontroler PID dan Thyristor Controlled Phase Shifter (TCPS) Pada Load Frequency Control (LFC) Menggunakan Differential Evolution (DE)*”, Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS, Surabaya,

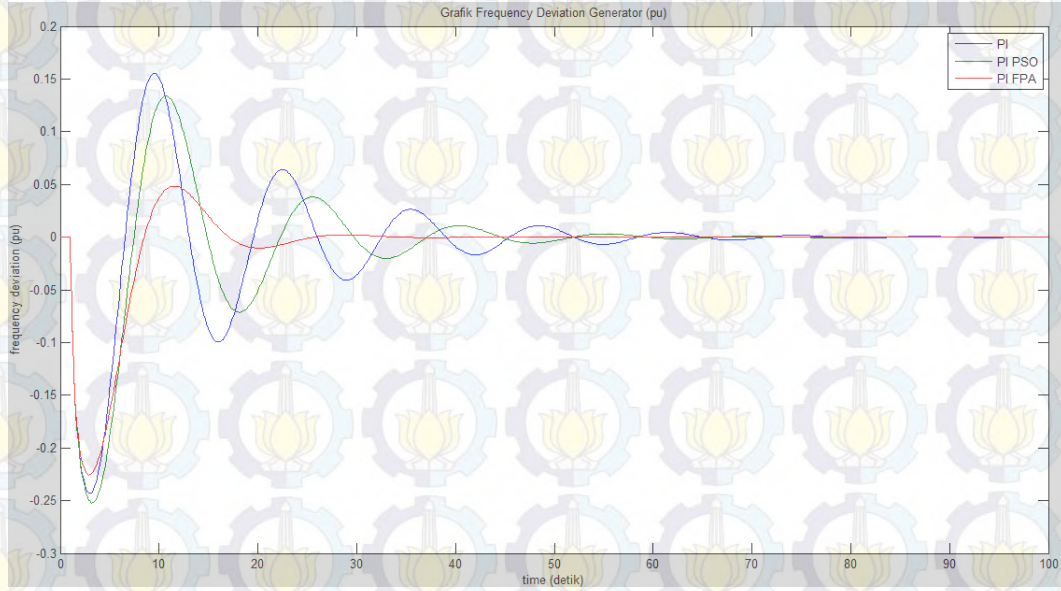
Yang, X.S. (2010). “*Nature-Inspired Metaheuristic Algorithm*”. United Kingdom : Luniver Press.

Yang, X. S. (2011).”*Metaheuristic Optimization, Scholarpedia*”, 6(8): 11472. Tanggal tilik 20 Mei 2014.

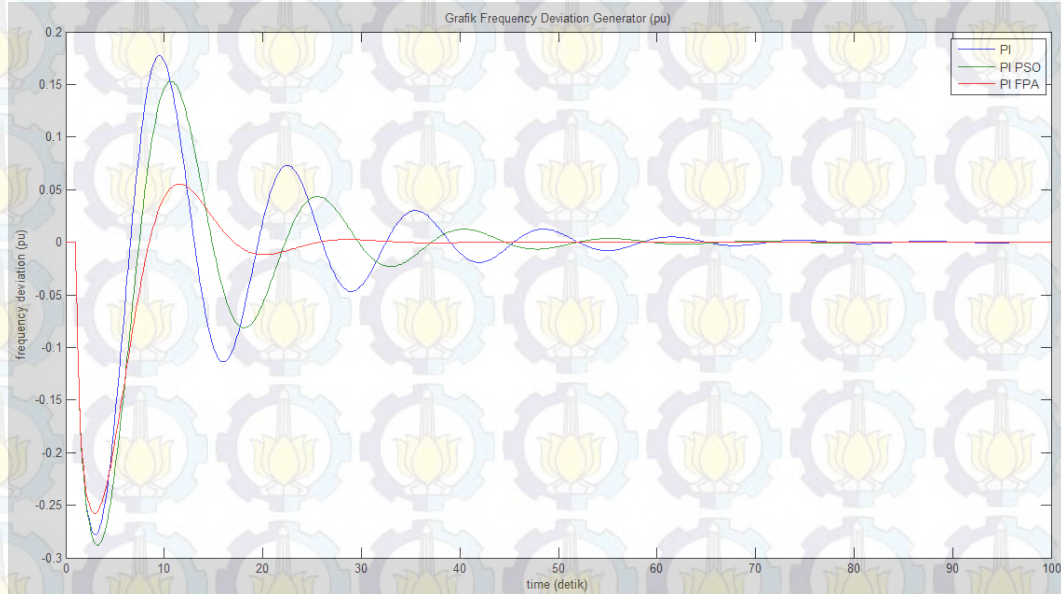
Yang, X. S. (2012). “*Flower pollination algorithm for global optimization*, in: *Unconventional Computation and Natural Computation 2012*”, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7445, pp. 240-249. Department of Engineering, University of Cambridge, Trumpington Street, Cambridge CB2 1PZ, UK.

## Lampiran

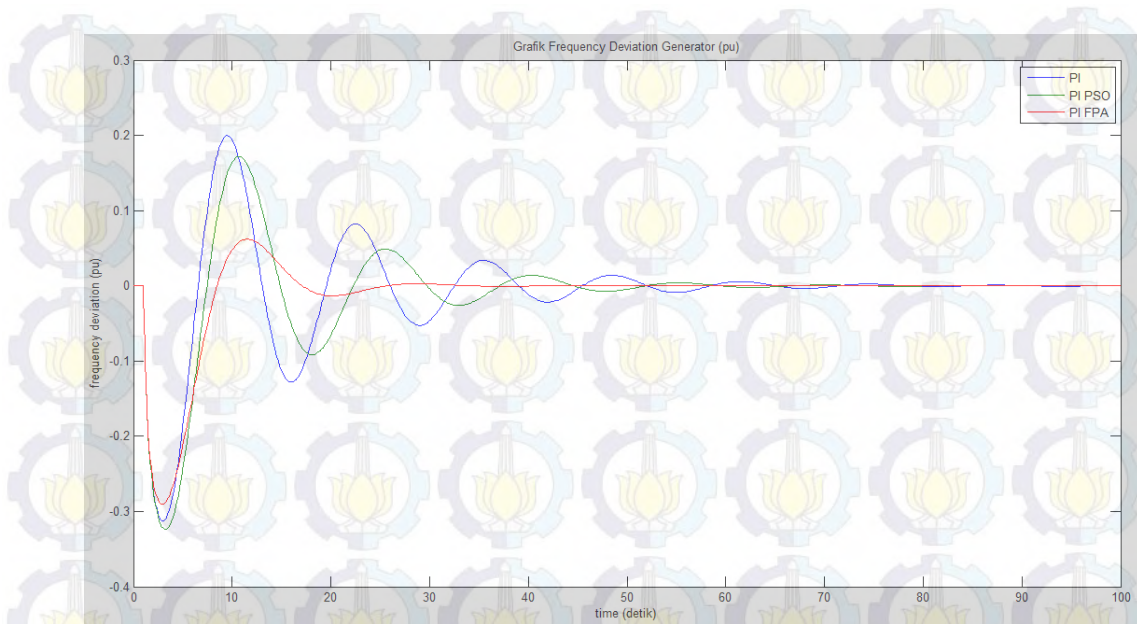
### 1. Frekuensi Rotor PMSG



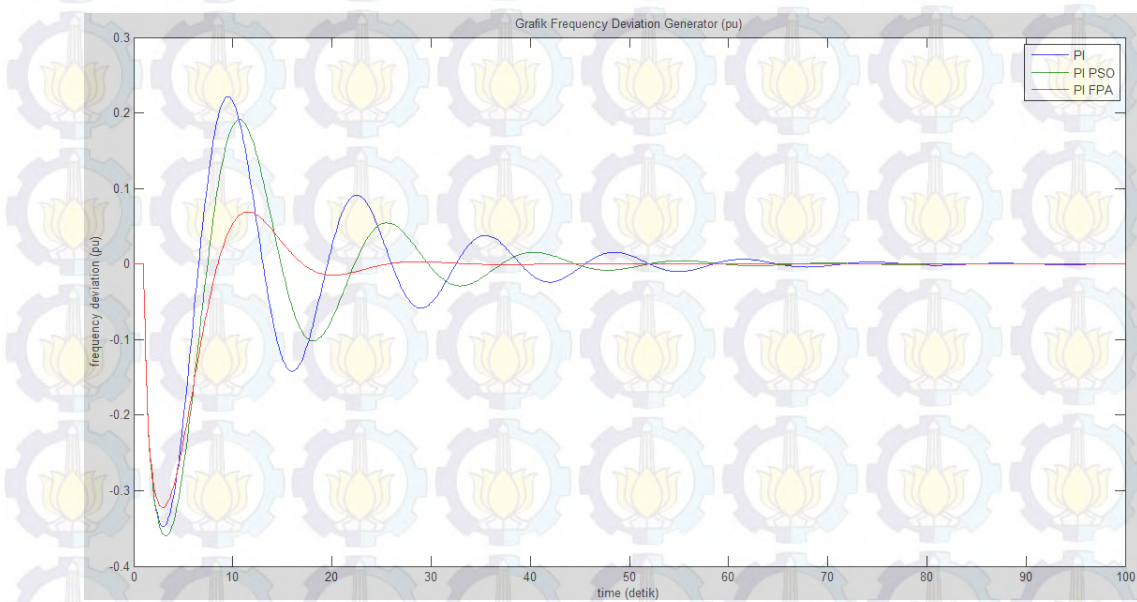
**V=3,5 meter/detik**



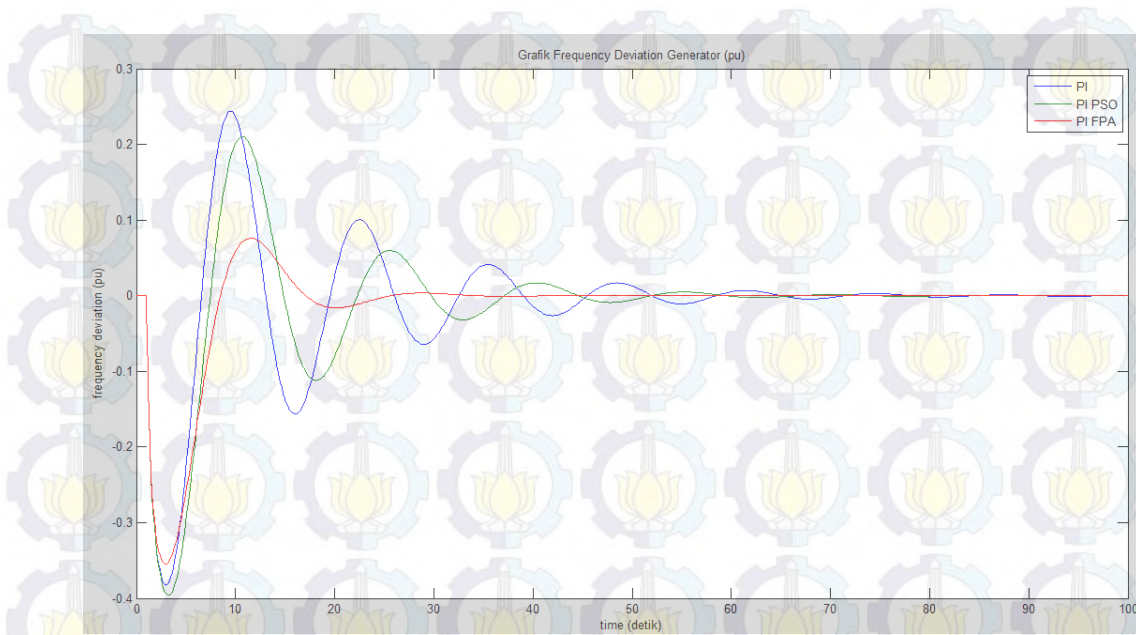
**V=4 meter/detik**



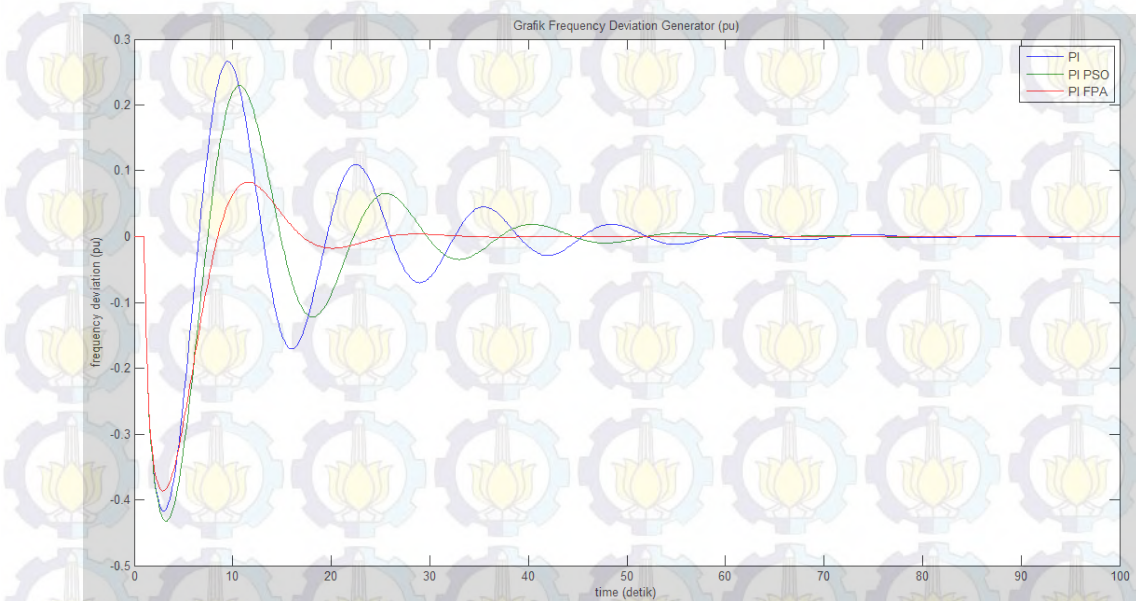
**V=4,5 meter/detik**



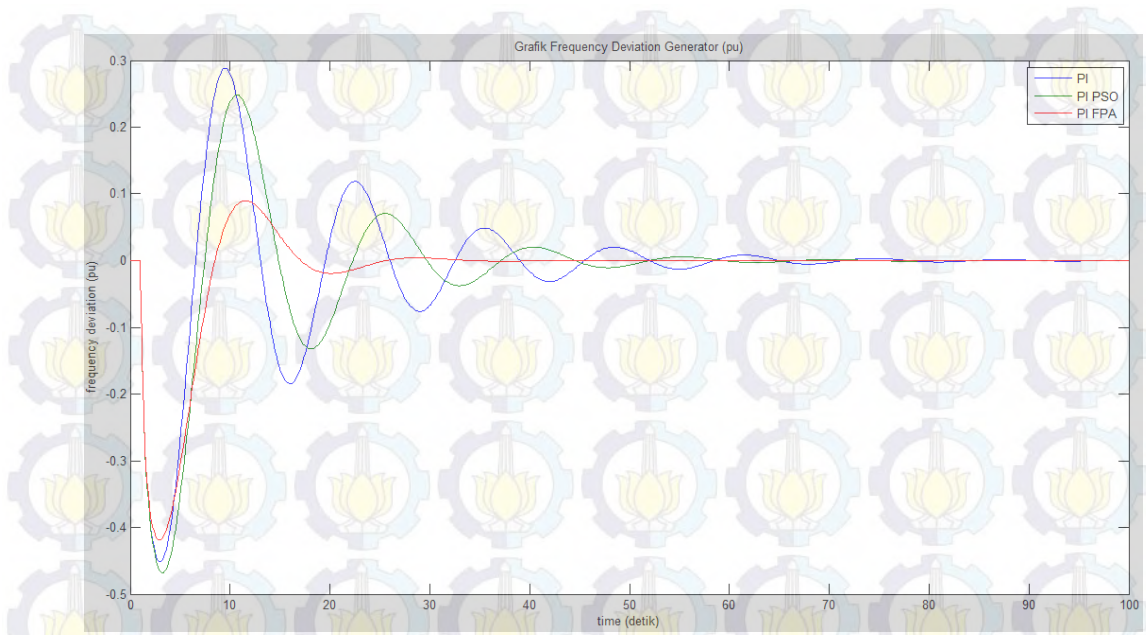
**V=5**



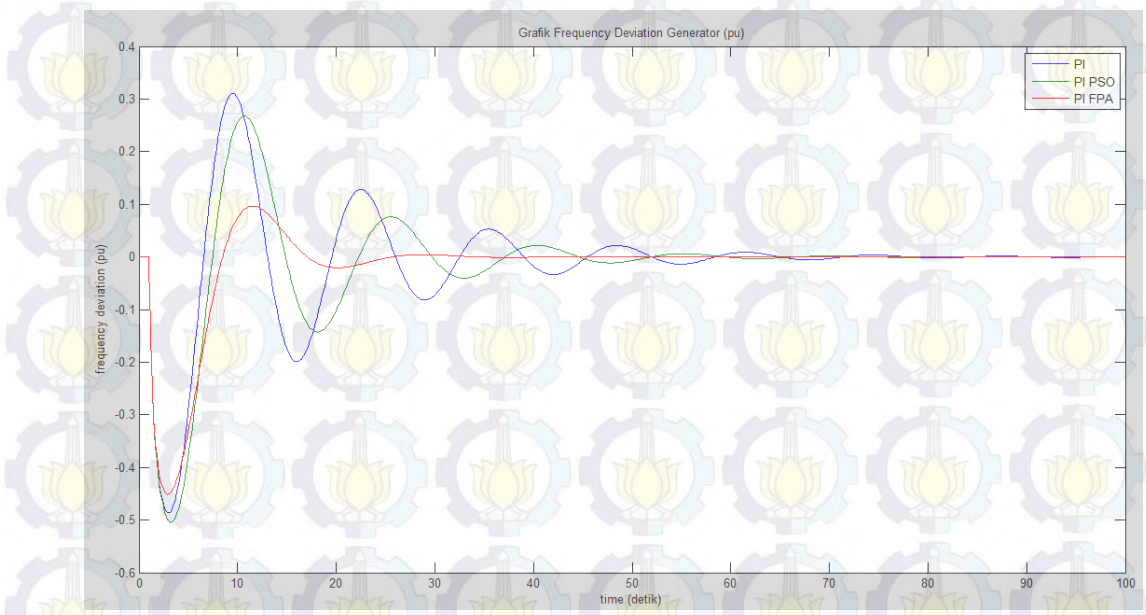
**V=5,5**



**V=6 meter/detik**

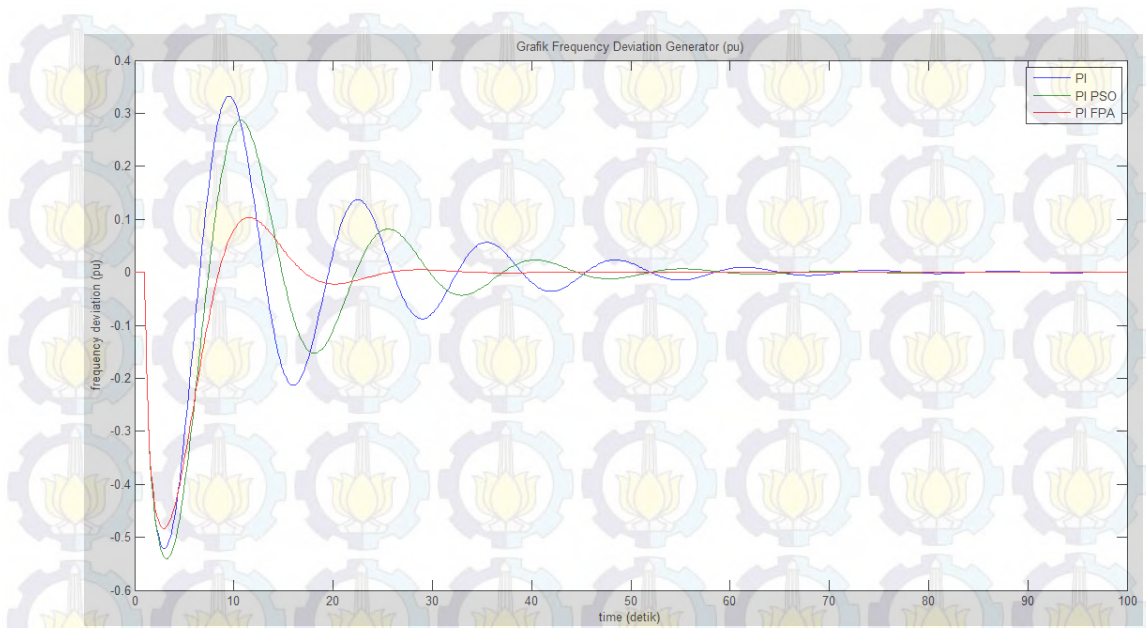


**V=6,5**

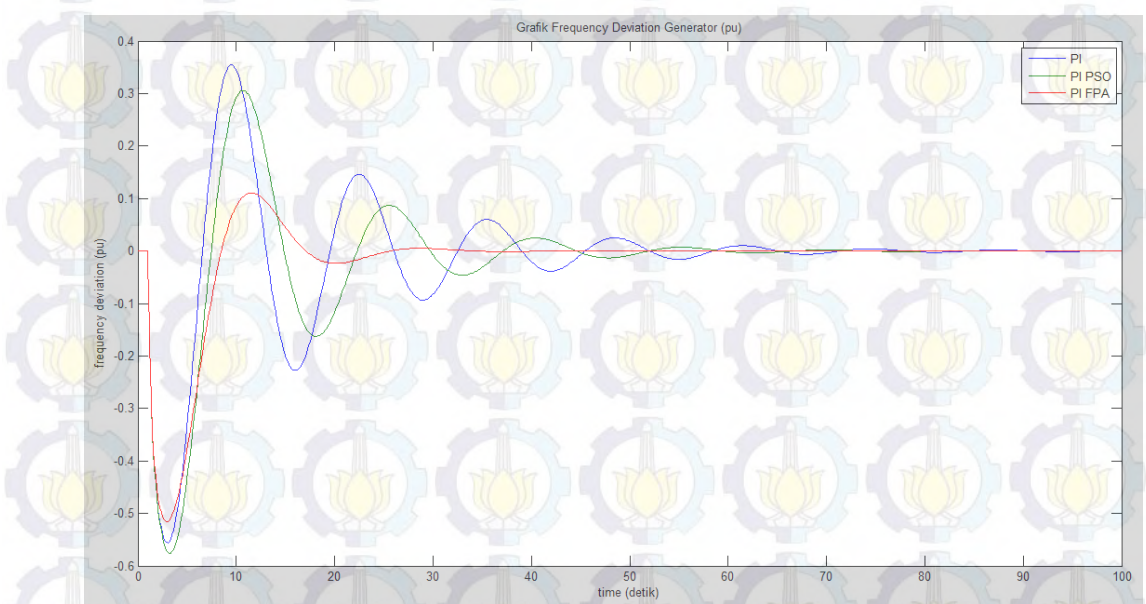


**V=7 meter/detik**

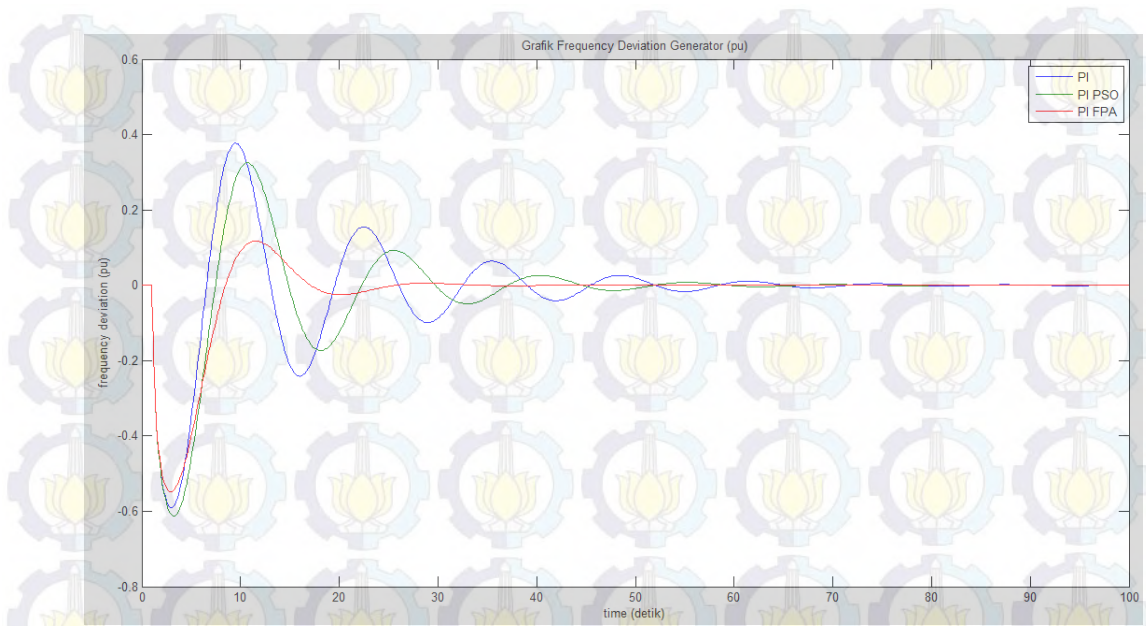




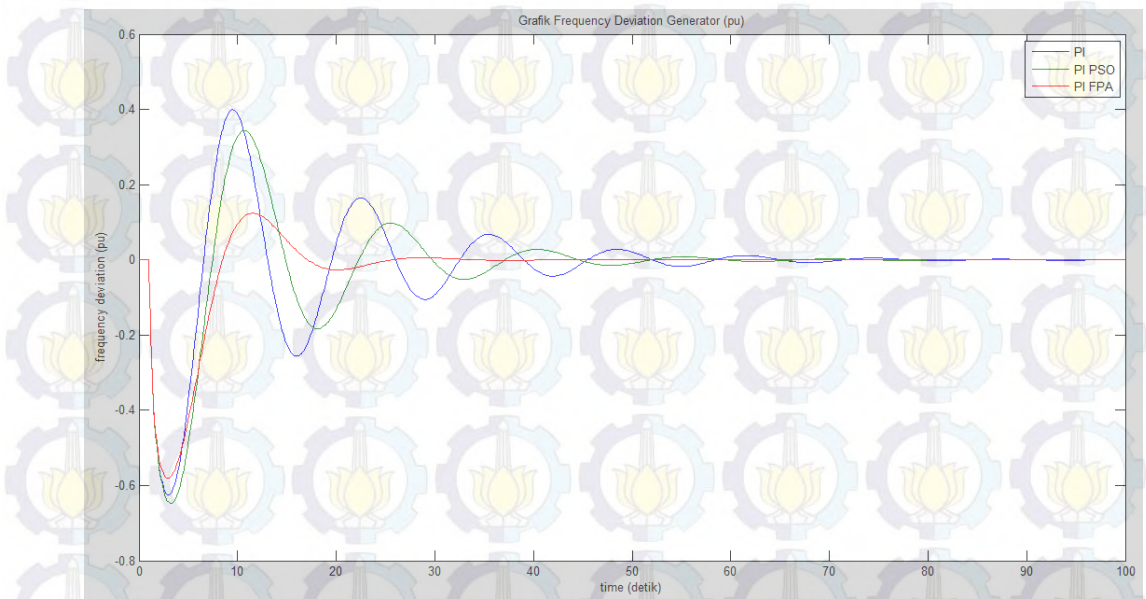
**V=7,5 meter/detik**



**V=8 meter/detik**

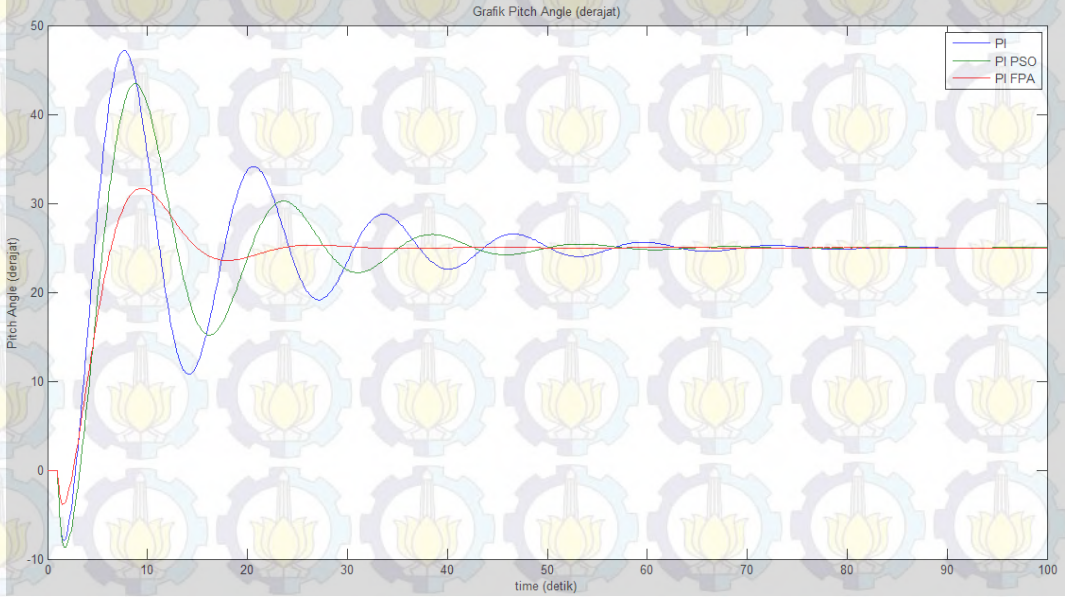


**V=8,5 meter/detik**

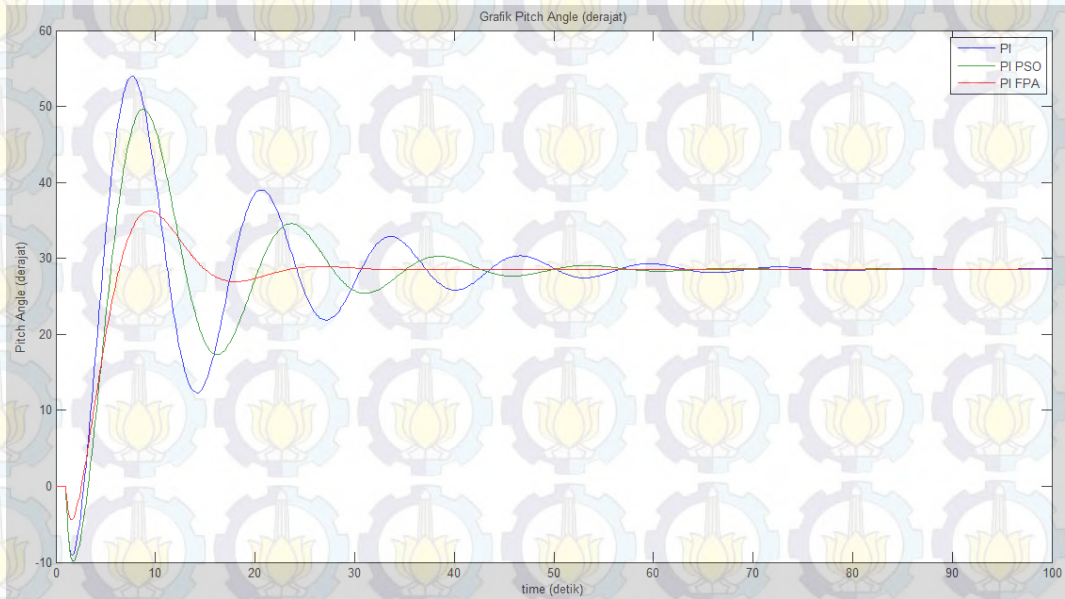


**V=9 meter/detik**

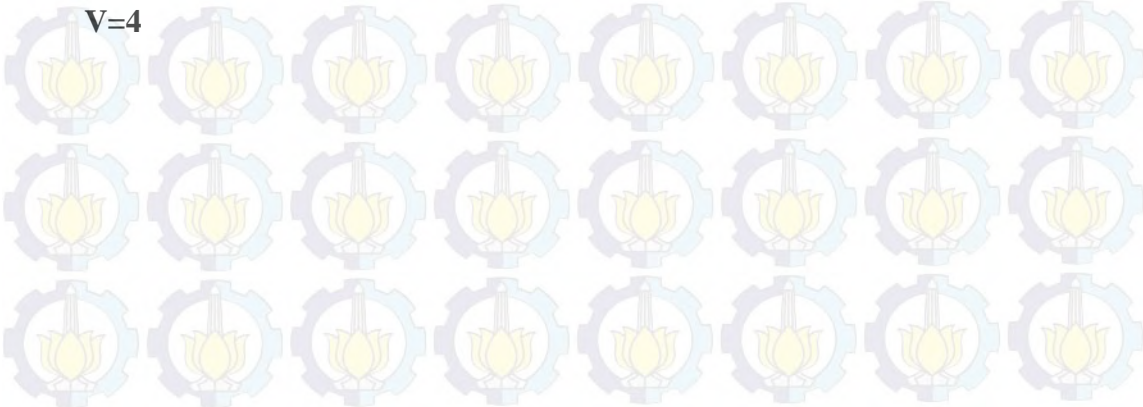
## 2. Sudut Pitch Blade Turbin Angin

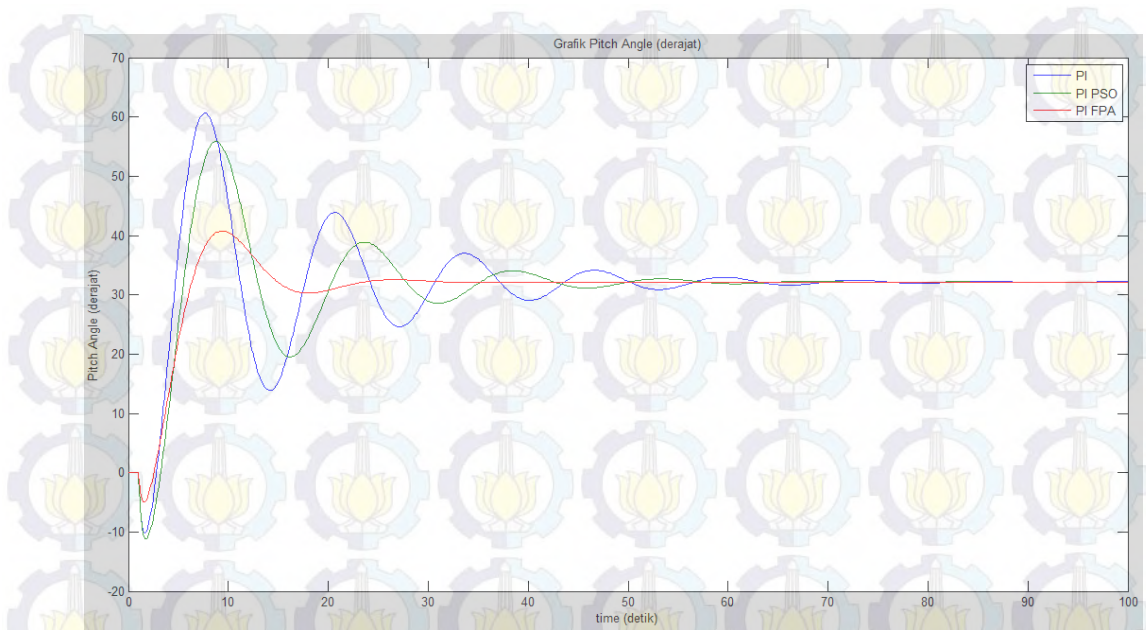


**V=3,5 meter/detik**

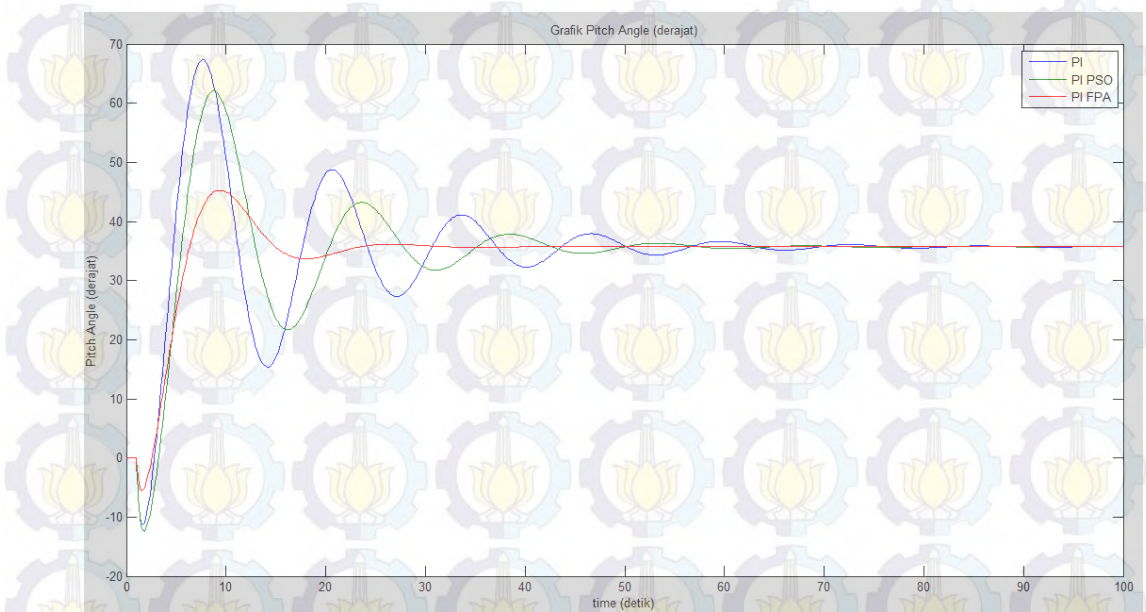


**V=4**

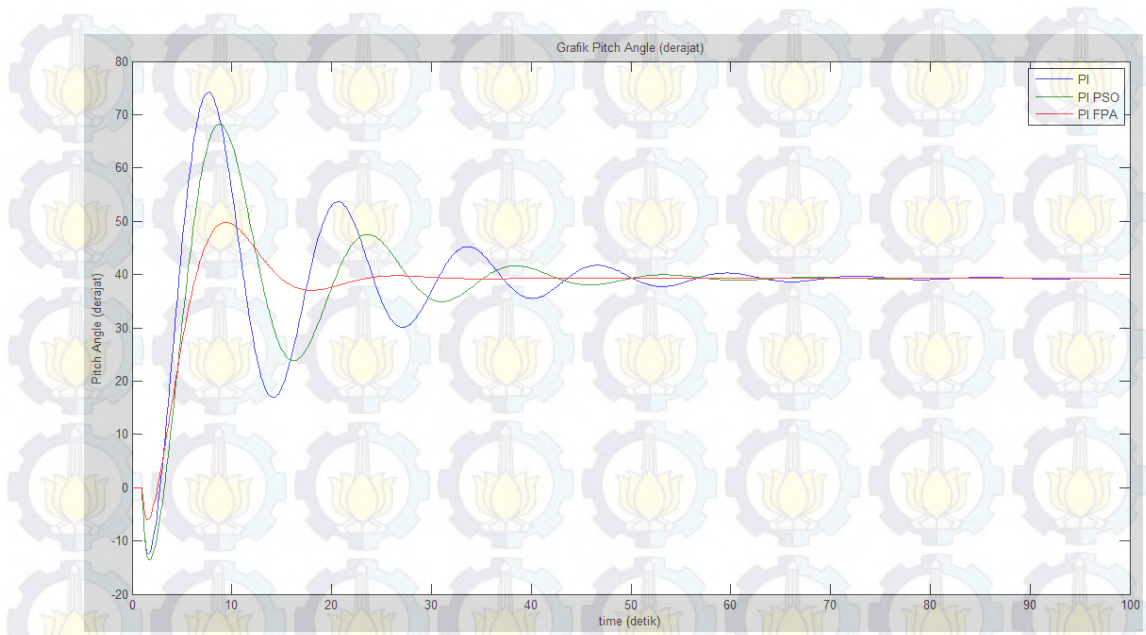




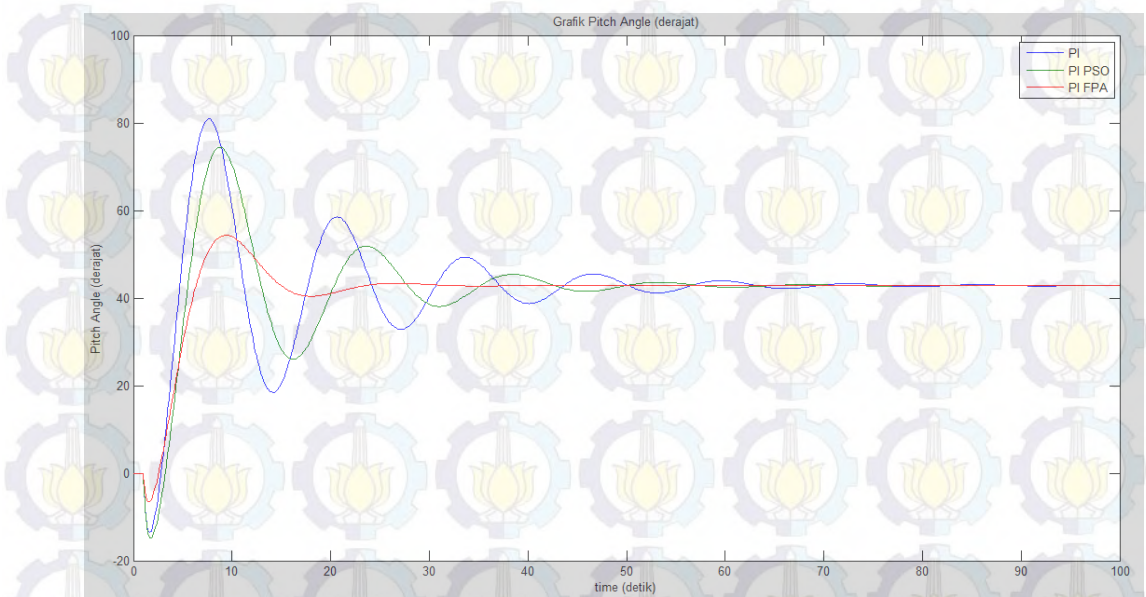
**V=4,5 meter/detik**



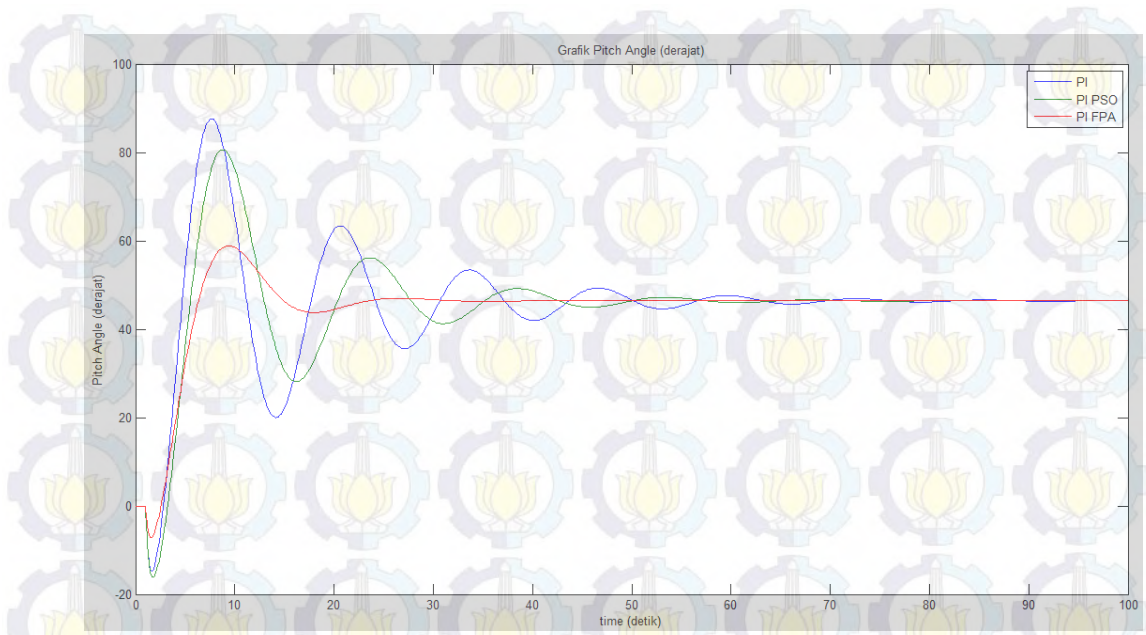
**V=5 meter/detik**



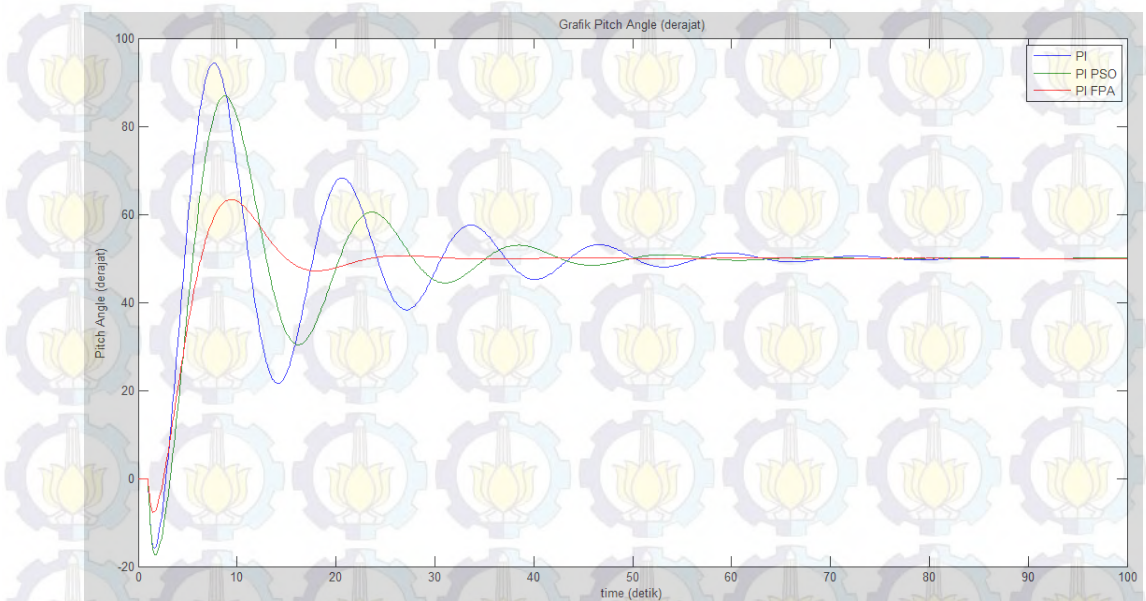
**V=5,5**



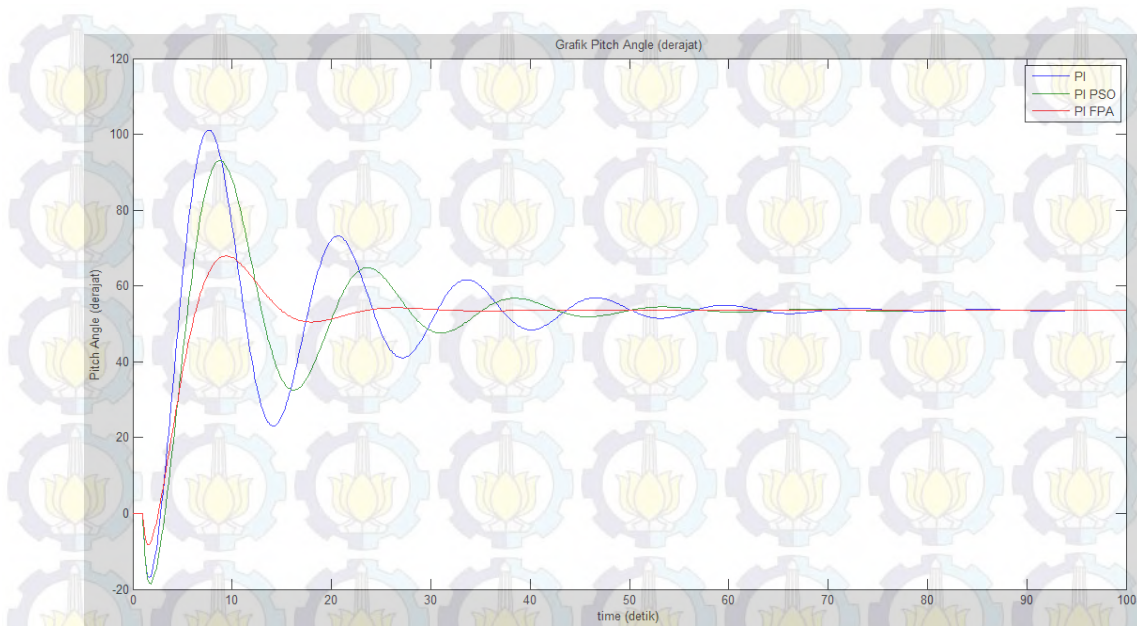
**V=6 meter/detik**



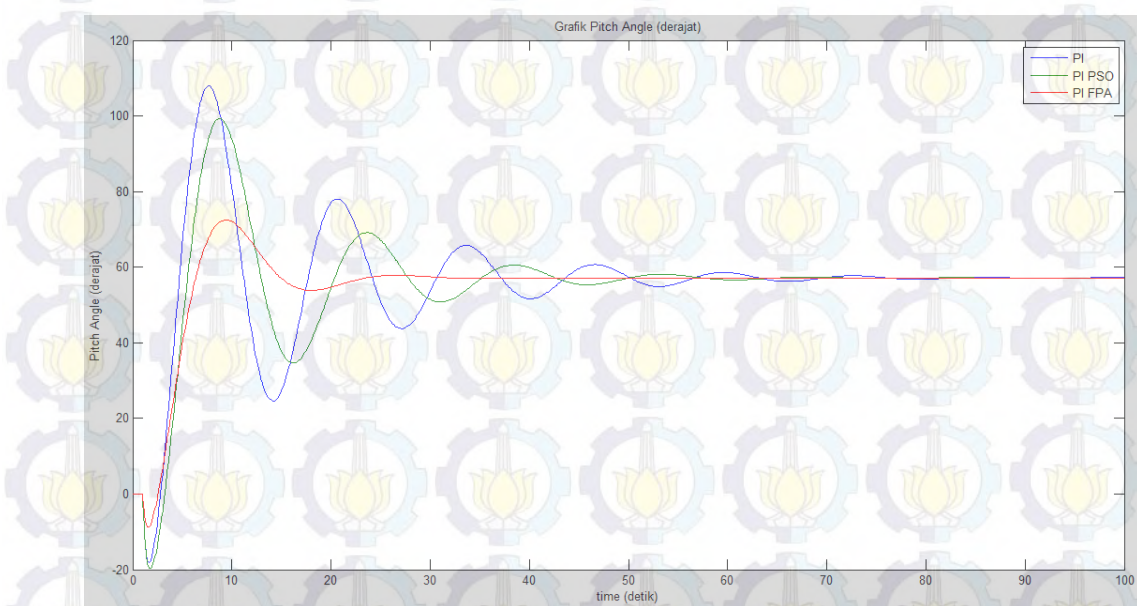
**V=6,5 meter/detik**



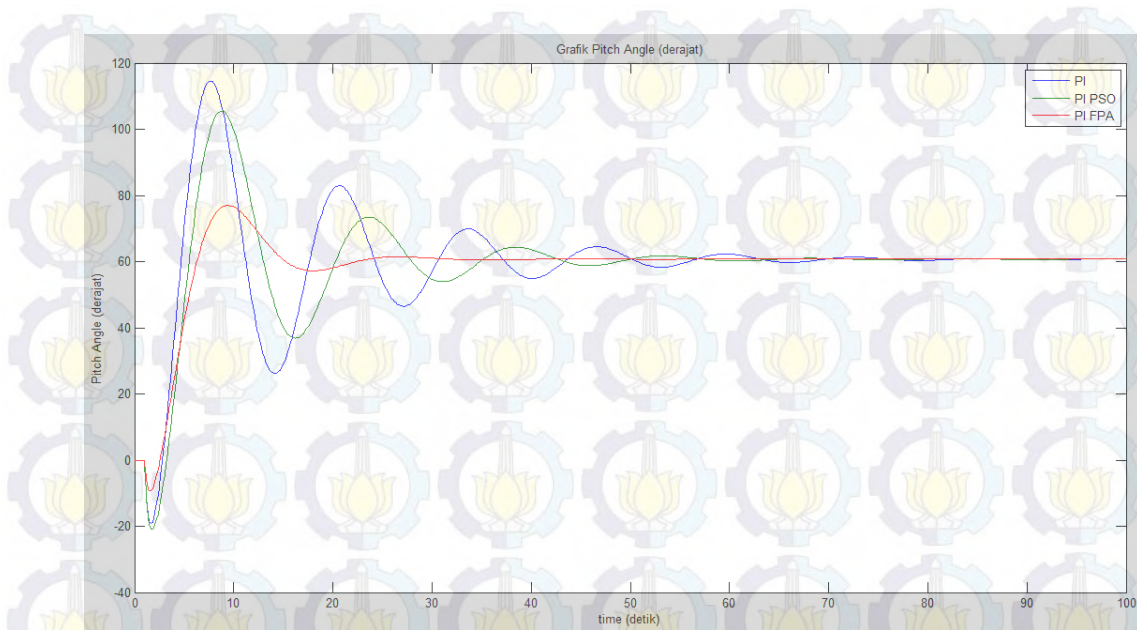
**V=7 meter/detik**



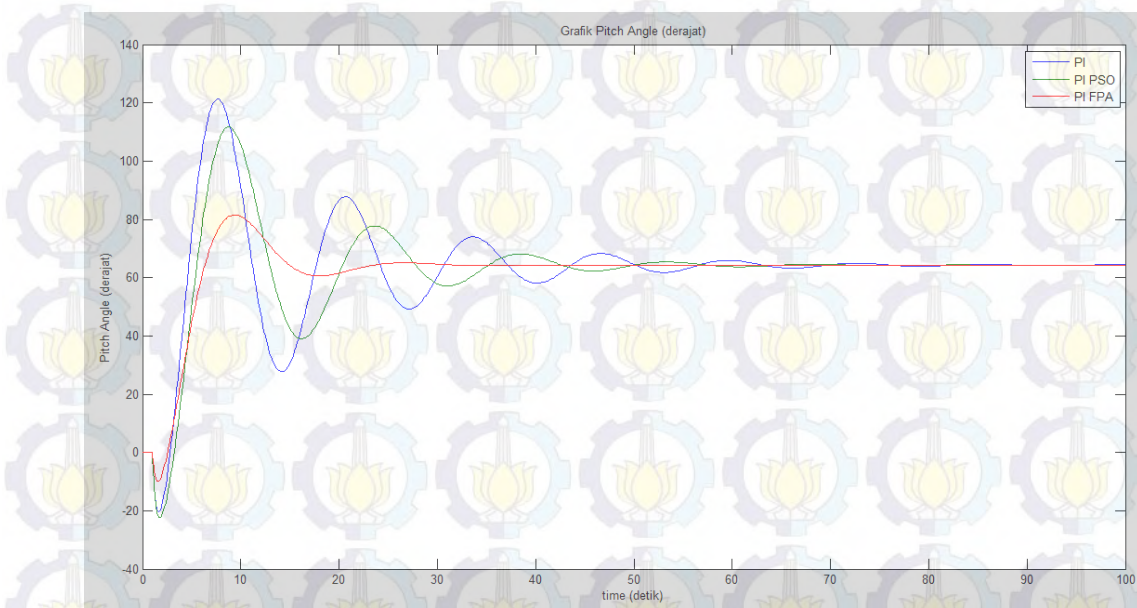
**V=7,5 meter/detik**



**V=8 meter/detik**



**V=8,5 meter/detik**



**V=9 meter/detik**



## BIOGRAFI PENULIS



**Dwi Lastomo** dilahirkan di Surakarta (Solo) pada hari Senin Wage, 23 Maret 1987. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Tri Hastotomo dan Sulasmi. Penulis menyelesaikan pendidikan formal dimulai dari SD Negeri Kauman 27 Surakarta, SLTP Negeri 1 Surakarta, dan SMA Negeri 3 Surakarta. Penulis menyelesaikan program sarjana dengan hijrah ke Surabaya pada tahun 2005 di jurusan Fisika FMIPA ITS. Selama S1, penulis meraih beberapa prestasi di tingkat nasional seperti: Beasiswa PPSDMS Nurul Fikri 2006-2008, PKM bidang Pengabdian Masyarakat 2007/2008, PKM bidang Kewirausahaan 2007/2008, Finalis PPRI LIPI-AJB Bumi Putera 2008, Beasiswa Tugas Akhir LG Innotek 2009. Selama S1, penulis aktif di IECC BEM-ITS sebagai bendahara pada tahun 2006/2007. Selama kuliah, penulis juga aktif sebagai asisten dosen fisika dasar I dan II serta asisten praktikum fisika dasar.

Setelah menyelesaikan pendidikan Sarjana pada tahun 2010, penulis bekerja sebagai:

- Seismik analis dan instalasi seismik di BPPTKG Yogyakarta 2010-2011.
- Pengajar Muda Gerakan Indonesia Mengajar di SDN Hurulai Oeseli Rote Barat Daya Rote-Ndao Nusa Tenggara Timur 2011-2012.
- Project Manager Bina Gita Persada Consultant of Higher Education 2012
- Next Edu Constulting Elementrary School Surabaya 2013
- BTT COOP PT Trakindo Utama Mimika Tembagapura Papua Barat 2013

Penulis mendapat kesempatan untuk diterima Beasiswa PraS2 Saintek ITS 2013 di Jurusan Matematika-Teknik Elektro kemudian melanjutkan di Prodi S2 Teknik Sistem Tenaga Teknik Elektro ITS. Penulis menjadi anggota Lab. PSOC pada 2014. Penulis juga aktif mengajar sebagai Asisten Dosen Fisika Dasar UPMB ITS dan Dosen LB T.Elektro FTI Unipa Surabaya. Penulis dapat dihubungi di email: dtomo23@gmail.com atau twitter:@dwilastomo