



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**OPTIMASI DAYA PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
BAYU (PLTB) MENGGUNAKAN KENDALI SUDU BERBASIS  
JARINGAN SYARAF TIRUAN**

**SKRIPSI**

**M. WAHYU ASHARI**

**0706267843**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**OPTIMASI DAYA PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
BAYU (PLTB) MENGGUNAKAN KENDALI SUDU BERBASIS  
JARINGAN SYARAF TIRUAN**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**M. WAHYU ASHARI**

**0706267843**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

### **OPTIMASI DAYA PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU (PLTB) MENGGUNAKAN KENDALI SUDU BERBASIS JARINGAN SYARAF TIRUAN**

Yang dibuat sebagai salah satu syarat mendapatkan gelar sarjana teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia, adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : M. Wahyu Ashari

NPM : 0706267843

Tanda Tangan :



Tanggal : 14 Juni 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : M. Wahyu Ashari

NPM : 0706267843

Program Studi : Teknik elektro

Dengan judul skripsi : Optimasi Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Menggunakan Kendali Sudu Berbasis Jaringan Syaraf Tiruan

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagaibagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknikpada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Abdul Halim, M.Eng

Penguji : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT

Penguji : Dr. Ir. Feri Yusivar M.Eng

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Juni 2011

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Saya menyadari bahwa skripsi ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Abdul Halim, M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang sangat bermanfaat kepada saya.
2. Orang tua serta segenap keluarga yang selalu mendukung dan mendoakan saya.
3. Teman-teman sayayang secara langsung atau tidak langsung telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M. Wahyu Ashari  
NPM : 0706267843  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**OPTIMASI DAYA PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU  
(PLTB) MENGGUNAKAN KENDALI SUDU BERBASIS JARINGAN  
SYARAF TIRUAN**

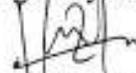
Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal: 14 Juni 2011

Yang menyatakan



(M. Wahyu Ashari)

## ABSTRAK

Nama : M. Wahyu Ashari  
NPM : 0706267843  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Optimasi Daya pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)  
Menggunakan Kendali Sudu Berbasis Jaringan Syaraf Tiruan

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah sumber energi yang bisa menjadi sumber energi alternatif ketika dunia mengalami kelangkaan sumber energi fosil seperti minyak bumi, gas alam dan batu bara. Saat ini PLTB belum menjadi sumber energi yang menjanjikan di Indonesia. Salah satu penyebabnya adalah karena efisiensi daya yang sangat rendah. Hal ini diakibatkan oleh efisiensi yang berubah-ubah seiring dengan perubahan kecepatan angin. Untuk meningkatkan efisiensi PLTB, pada skripsi ini dirancang sebuah pengendali berbasis jaringan syaraf tiruan (JST) yang dapat mengendalikan sudut dari *blade* pada turbin angin. Dari hasil simulasi didapatkan efisiensi turbin angin yang sudut *blade*-nya dikendalikan menggunakan JST lebih besar dibandingkan turbin angin yang sudut *blade*-nya konstan.

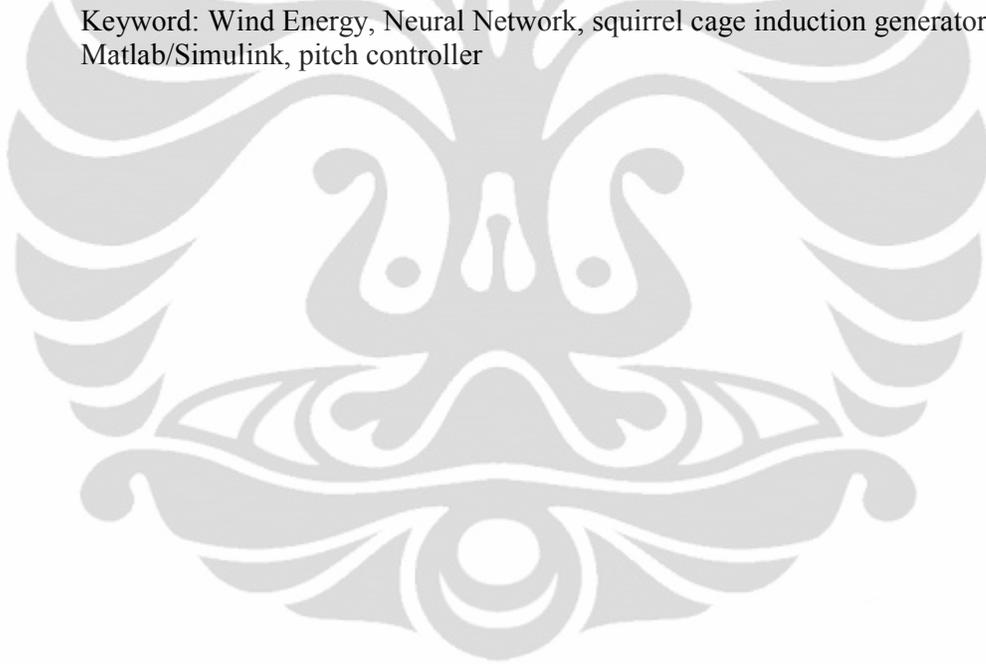
Kata kunci: pembangkit listrik tenaga bayu, jaringan syaraf tiruan, generator induksi squirrel cage, Matlab/Simulink, kendali sudu

## ABSTRACT

Name : M. Wahyu Ashari  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : Power Optimization of Wind Energy Conversion System  
Using Neural Network Based Pitch Controller

Wind Energy Conversion System (WECS) can become as one of alternative energy resources in the future that replaces fossil energy resources like Oil and Gas. However, nowadays Wind Energy Conversion System is not properly applied to be the primary energy resource in Indonesia yet, because the energy efficiency of wind turbine is low due to high dependency on wind velocity. In this paper, we design a neural network based controller to control the pitch of blade on wind turbine. From the simulation result, we verified that better wind turbine efficiency has been achieved by using proposed neural network based controller

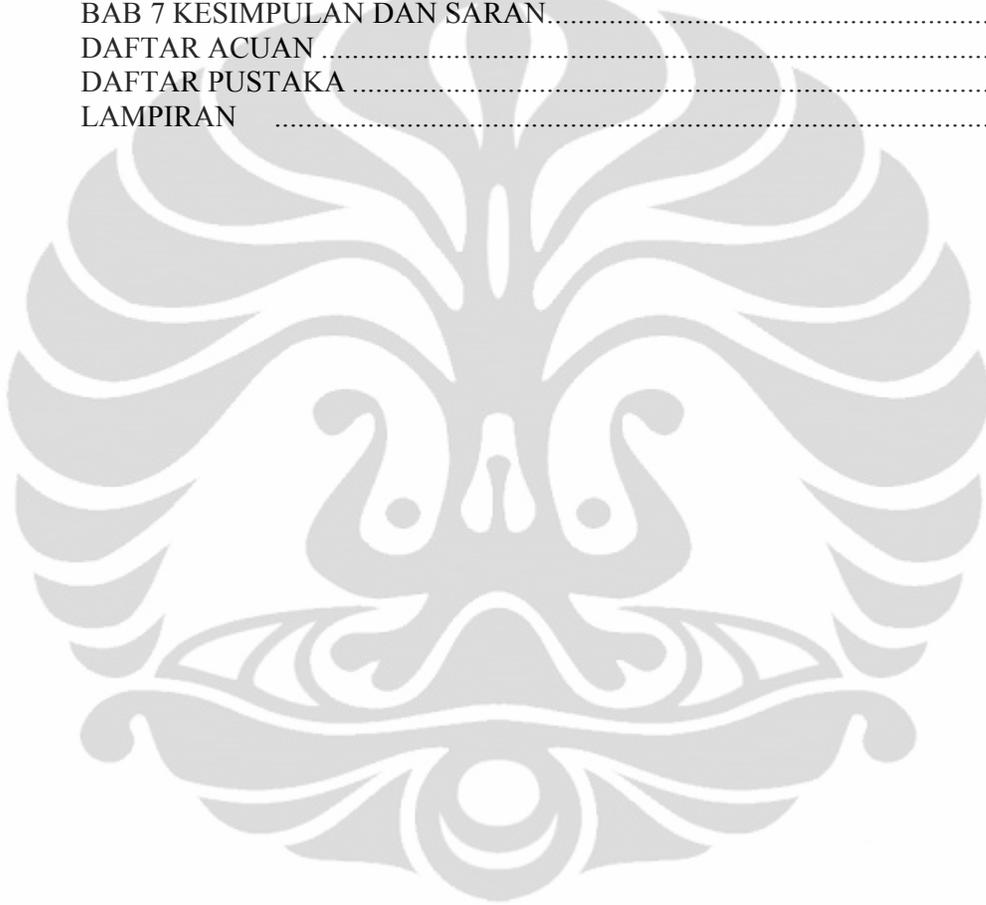
Keyword: Wind Energy, Neural Network, squirrel cage induction generator, Matlab/Simulink, pitch controller



## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penulisan .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Metodologi Penelitian .....	2
1.5 Sistematika Penulisan .....	2
BAB 2 SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU .....	4
2.1 Angin .....	4
2.1.1 Pemodelan Angin .....	4
2.2 PLTB .....	5
2.2.1 Turbin Angin .....	5
2.2.2 Pemodelan Turbin Angin .....	8
2.2.3 <i>Drive Train</i> .....	10
2.2.4 Pemodelan <i>Drive Train</i> .....	11
2.2.5 Generator .....	11
2.2.6 Pemodelan Generator .....	12
BAB 3 MODEL SIMULASI SISTEM PLTB .....	15
3.1 Simulasi Angin .....	15
3.2 Turbin Angin .....	16
3.3 <i>Drive Train</i> .....	20
3.4 Generator Induksi Squirrel Cage .....	22
BAB 4 PERANCANGAN PENGENDALI .....	25
4.1 Konfigurasi PLTB .....	25
4.2 Jaringan Syaraf Tiruan (JST) .....	26
4.3 Perancangan Pengendali Turbin Angin .....	31
4.4 Respon Perubahan Sudut <i>Blade</i> terhadap Set Point .....	34
4.5 Perancangan Pengendali PI untuk Mempercepat Respon Perubahan Sudut <i>Blade</i> terhadap Set Point .....	35
BAB 5 HASIL DAN ANALISA .....	38
5.1 Hasil Simulasi .....	38
5.1.1 Kecepatan Angin .....	38
5.1.2 Koefisien Daya .....	40
5.1.3 Daya Turbin .....	42
5.1.4 Torsi Turbin Angin .....	44
5.1.5 Kecepatan Putar Turbin .....	46
5.1.6 Kecepatan Putar Generator .....	48

5.1.7 Arus Pada Generator.....	50
5.1.8 Daya Listrik Aktif dan Reaktif.....	53
5.1.7 Torsi Elektromagnetik .....	57
5.1.8 Sudut <i>Blade</i> .....	59
5.2 Analisa Hasil.....	60
5.2.1 Analisa Hasil Secara Umum .....	60
5.2.2 Analisa Kenaikan Efisiensi Energi.....	61
5.2.3 Analisa Berdasarkan Angin.....	62
5.2.4 Analisa Kestabilan Sudut <i>Blade</i> .....	63
BAB 7 KESIMPULAN DAN SARAN.....	65
DAFTAR ACUAN .....	66
DAFTAR PUSTAKA .....	67
LAMPIRAN .....	68



## DAFTAR GAMBAR

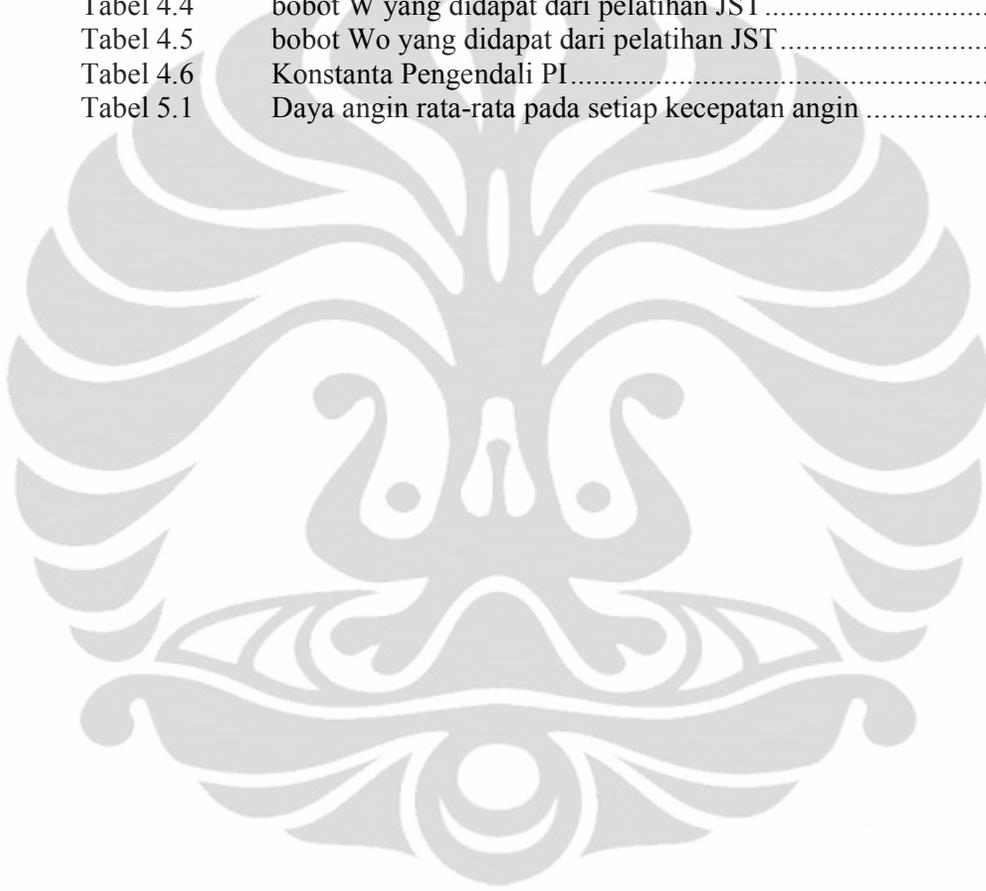
Gambar 2.1.	Dua jenis turbin angin, sumbu vertical dan horizontal [2] .....	6
Gambar 2.2.	Hubungan antara $\lambda$ dan $C_p$ [3] .....	8
Gambar 2.3.	Blok diagram actuator penggerak sudut <i>blade</i> .....	9
Gambar 2.4.	rigid drive train[3] .....	10
Gambar 2.5.	Flexible <i>drive train</i> [3] .....	10
Gambar 3.1.	model angin pada Matlab.....	15
Gambar 3.2.	Hasil simulasi angin pada matlab.....	16
Gambar 3.3.	model turbin angin pada Matlab .....	17
Gambar 3.4.	Hasil simulasi turbin angin pada Matlab .....	18
Gambar 3.5.	Hasil simulasi yang menggambarkan hubungan antara $\beta$ , $\lambda$ , dan $C_p$ .....	19
Gambar 3.6.	respon perubahan sudut <i>blade</i> terhadap perubahan set point .....	19
Gambar 3.7.	Model <i>drive train</i> pada Matlab/Simulink .....	20
Gambar 3.8.	Perbandingan torsi turbin dan torsi generator .....	21
Gambar 3.9.	kecepatan putar turbin .....	21
Gambar 3.10.	model generator induksi pada Matlab .....	23
Gambar 3.11.	Arus pada sumbu d dan q.....	24
Gambar 3.12.	Grafik torsi elektromagnetik terhadap kecepatan putar generator .....	24
Gambar 4.1.	Struktur Jaringan Syaraf Tiruan [5].....	26
Gambar 4.2.	Target sudut <i>blade</i> untuk tiap kombinasi input.....	32
Gambar 4.3.	Keluaran JST untuk tiap kombinasi input .....	34
Gambar 4.4.	Sistem penggerak sudut <i>blade</i> yang diberikan pengendali PI .....	36
Gambar 4.5.	respon dari sudut <i>blade</i> terhadap perubahan set point setelah ditambahkan pengendali PI.....	37
Gambar 5.1.	Kecepatan Angin 3-4 m/s .....	38
Gambar 5.2.	Kecepatan Angin 4-6 m/s .....	39
Gambar 5.3.	Kecepatan Angin 5-7 m/s .....	39
Gambar 5.4.	Perbandingan $C_p$ antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s .....	40
Gambar 5.5.	Perbandingan $C_p$ antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s .....	41
Gambar 5.6.	Perbandingan $C_p$ antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s .....	41
Gambar 5.7.	Perbandingan daya turbin antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s .....	42
Gambar 5.8.	Perbandingan daya turbin antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s .....	43
Gambar 5.9.	Perbandingan daya turbin antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s .....	43

Gambar 5.10.	Perbandingan torsi turbin antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s .....	44
Gambar 5.11.	Perbandingan torsi turbin antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s .....	44
Gambar 5.12.	Perbandingan torsi turbin antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s .....	45
Gambar 5.13.	Perbandingan kecepatan putar turbin antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s .....	46
Gambar 5.14.	Perbandingan kecepatan putar turbin antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s .....	46
Gambar 5.15.	Perbandingan kecepatan putar turbin antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s .....	47
Gambar 5.16.	Perbandingan kecepatan putar generator antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s .....	48
Gambar 5.17.	Perbandingan kecepatan putar generator antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s .....	48
Gambar 5.18.	Perbandingan kecepatan putar generator antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s .....	49
Gambar 5.19.	Perbandingan Arus stator pada sumbu d antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s .....	50
Gambar 5.20.	Perbandingan Arus stator pada sumbu q antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s .....	50
Gambar 5.21.	Perbandingan Arus stator pada sumbu d antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s .....	51
Gambar 5.22.	Perbandingan Arus stator pada sumbu q antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s .....	51
Gambar 5.23.	Grafik arus keluaran PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dan kecepatan angin 5-6 m/s .....	52
Gambar 5.24.	Grafik arus keluaran PLTB dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan dan kecepatan angin 5-6 m/s .....	52
Gambar 5.25.	Perbandingan daya listrik aktif generator antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s .....	53

Gambar 5.26.	Perbandingan daya listrik aktif generator antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s .....	54
Gambar 5.27.	Perbandingan daya listrik aktif generator antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s .....	54
Gambar 5.28.	Perbandingan daya listrik reaktif antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s .....	55
Gambar 5.29.	Perbandingan daya listrik reaktif antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s .....	55
Gambar 5.30.	Perbandingan daya listrik reaktif antara PLTB dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s .....	56
Gambar 5.31.	Perbandingan torsi elektromagnetik antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s .....	57
Gambar 5.32.	Perbandingan torsi elektromagnetik antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s .....	57
Gambar 5.33.	Perbandingan torsi elektromagnetik antara turbin angin dengan sudut <i>blade</i> tetap ( $0^0$ ) dengan sudut <i>blade</i> dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s .....	58
Gambar 5.34.	Besar sudut <i>blade</i> yang diatur menggunakan pengendali JST pada kecepatan angin 3-4 m/s .....	59
Gambar 5.35.	Besar sudut <i>blade</i> yang diatur menggunakan pengendali JST pada kecepatan angin 4-5 m/s .....	59
Gambar 5.36.	Besar sudut <i>blade</i> yang diatur menggunakan pengendali JST pada kecepatan angin 5-6 m/s .....	60
Gambar 5.37.	TKA untuk sistem penggerak sudut <i>blade</i> .....	63

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter simulasi angin .....	16
Tabel 3.2	Parameter simulasi turbin angin [7] .....	18
Tabel 3.3	Parameter simulasi <i>drive train</i> [7] .....	20
Tabel 3.1	Parameter simulasi Generator induksi [7] .....	22
Tabel 4.1	hasil test dari jaringan syaraf tiruan menggunakan m-file Matlab .....	33
Tabel 4.2	bobot V yang didapat dari pelatihan JST .....	33
Tabel 4.3	bobot $V_0$ yang didapat dari pelatihan JST .....	33
Tabel 4.4	bobot W yang didapat dari pelatihan JST .....	34
Tabel 4.5	bobot $W_0$ yang didapat dari pelatihan JST .....	34
Tabel 4.6	Konstanta Pengendali PI .....	35
Tabel 5.1	Daya angin rata-rata pada setiap kecepatan angin .....	62



# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Penggunaan tenaga angin sebagai pembangkit listrik telah ditemukan sejak berpuh tahun yang lalu. Semakin terancamnya dunia akan krisis energi yang disebabkan oleh kelangkaan sumber energi fosil seperti minyak bumi, batu bara dan gas alam, menyebabkan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menjadi salah satu sumber energi masa depan.

Namun, ada beberapa faktor yang menghambat perkembangan pemanfaatan PLTB sebagai sumber energi. Faktor tersebut antara lain efisiensi daya yang sangat rendah. Hal ini disebabkan salah satunya karena efisiensi daya dapat berubah-ubah seiring dengan berubahnya kecepatan angin dan kecepatan putar pembangkit listrik itu sendiri.

Di Indonesia, salah satu faktor yang menghambat perkembangan PLTB sebagai sumber energi adalah karena kecepatan angin yang cukup rendah sehingga energi yang didapatkan pun kecil. Agar PLTB dapat digunakan sebagai sumber energi di Indonesia, maka efisiensi dari turbin angin harus dimaksimalkan.

Untuk memaksimalkan energi pada PLTB, salah satu cara yang dapat dilakukan adalah melakukan pengendalian sudu (*blade*) pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu. Dengan menempatkan sudut *blade* pada posisi yang tepat, maka efisiensi maksimum bisa tercapai.

Salah satu metode pengendalian yang dapat dipakai dalam pengendalian sudut *blade* pada PLTB adalah Jaringan Syaraf Tiruan.

## 1.2 Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan dari skripsi ini adalah untuk memodelkan dan mensimulasikan sistem PLTB menggunakan Matlab/Simulink dengan menggunakan parameter-parameter turbin angin yang disesuaikan dengan kondisi angin di Indonesia, kemudian merancang sebuah pengendali menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan untuk mengendalikan sudut *blade* pada PLTB yang disimulasikan agar tercapai daya keluaran yang maksimal.

## 1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan yang akan dibahas menjadi jelas, maka penulis membatasi pembahasan pada beberapa hal, antara lain:

1. Menggunakan generator induksi yang bertipe *squirrel cage*
2. Menggunakan *rigid drive train one mass model*
3. Kecepatan angin berkisar antara 3-6 m/s.
4. Merancang pengendali sudut *blade* berbasis jaringan syaraf tiruan untuk mendapatkan efisiensi daya turbin yang optimal

## 1.4 Metodologi Penelitian

Metodologi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Melakukan studi literatur dengan membaca buku ataupun jurnal yang sesuai dengan topik yang sedang dibahas.
2. Mensimulasikan model matematika dan rancangan sistem pengendalian dengan menggunakan MATLAB/Simulink.
3. Menganalisis hasil simulasi

## 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari enam bab. Bab pertama membahas tentang latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab kedua membahas tentang sistem PLTB dan model matematikanya.

Pada bab tiga akan dibahas mengenai simulasi tiap komponen. Pada bab empat akan dijelaskan mengenai perancangan pengendali berbasis Jaringan Syaraf Tiruan (*neural network*) untuk mengendalikan sudut dari *blade* pada turbin angin. Pada bab lima akan dijelaskan mengenai hasil simulasi dari MATLAB/Simulink secara keseluruhan dan analisa dari hasil yang didapat. Pada bab terakhir akan dijelaskan mengenai kesimpulan dari skripsi ini.



## BAB 2 SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU

PLTB adalah sebuah sistem yang mengkonversikan energi angin menjadi energi mekanik yang akan menggerakkan turbin, kemudian mengubah energi mekanik tersebut menjadi energi listrik dengan generator.

### 2.1 Angin

Angin merupakan udara yang bergerak dari tekanan udara yang tinggi ke tekanan udara yang lebih rendah. Perbedaan tekanan udara tersebut terjadi karena adanya perbedaan suhu antara suatu tempat dan tempat yang lain akibat pemanasan yang tidak merata oleh sinar matahari. Gerakan udara tersebut menimbulkan adanya energi kinetik yang bisa dimanfaatkan untuk diubah menjadi energi mekanik dan energi listrik.

#### 2.1.1 Pemodelan Angin

Ada beberapa model matematik angin. Dalam skripsi ini pemodelan angin dilakukan dengan menggenerasi sinyal dengan nilai rata-rata tertentu sebagai kecepatan rata-rata angin, yang memiliki fluktuasi nilai. Sinyal ini digenerasi menggunakan sinyal cosinus yang ditambah dengan *white noise* yang di-*filter* menggunakan *filter* kaimal.

$$V = V_t + V_n \tag{2.1}$$

Dimana

$$V_t = A \cos(\omega t) \tag{2.2}$$

Dengan  $A$  adalah nilai penyimpangan sinyal dari nilai rata-rata dan  $\omega$  menunjukkan frekuensi sinyal penyimpangan terhadap kecepatan rata-rata.  $Vn$  adalah white noise yang memiliki amplitude dan *sampling time* tertentu.

Persamaan *filter* kaimal untuk mem-*filter white noise* adalah sebagai berikut[1]:

$$F(s) = \frac{0.00033s^2 + 1.3653s + 0.9846}{1.81s^2 + 3.7593s + 1} \quad (2.3)$$

## 2.2 PLTB

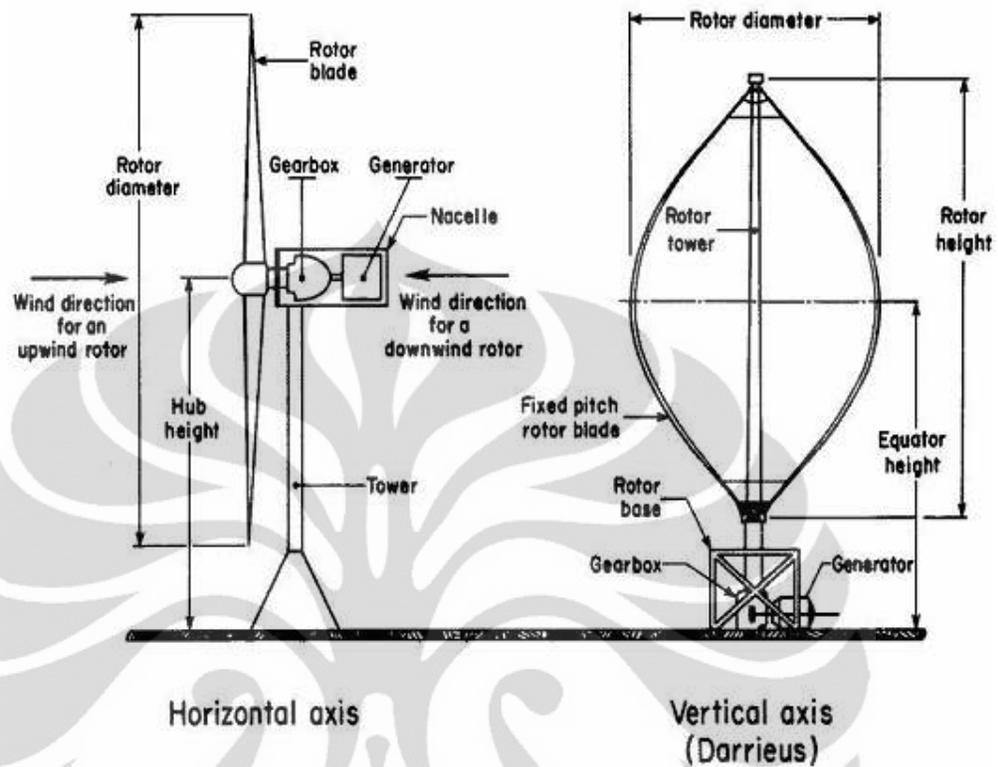
Pada umumnya, PLTB terdiri dari tiga bagian, yaitu turbin angin, *drive train*, dan generator.

### 2.2.1 Turbin Angin

Turbin angin adalah bagian dari PLTB yang berfungsi untuk mengubah energi angin menjadi energi mekanik yang akan memutar poros dari turbin tersebut.

Turbin angin memiliki *blade* yang memiliki bentuk penampang khusus yang memungkinkan terjadinya aliran angin pada satu sisi lebih cepat dari pada sisi lainnya saat angin melewatinya. Perbedaan kecepatan ini akan menimbulkan gaya yang menyebabkan turbin berputar.

Terdapat dua jenis turbin angin, yaitu turbin angin sumbu vertikal dan turbin angin sumbu horizontal. Perbedaan dari kedua jenis turbin angin tersebut dapat dilihat pada gambar.



Gambar 2.1. Dua jenis turbin angin, sumbu vertical dan horizontal [2]

Daya yang dihasilkan oleh angin ( $P_t$ ), bergantung pada densitas udara yang dialirkan, luas penampang, dan kecepatan anginnya. Sehingga persamaan daya yang dihasilkan oleh angin adalah sebagai berikut [3]:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A V_a^3 \quad (2.4)$$

dimana

- $\rho$  : densitas udara
- $A$  : luas penampang
- $V_a$  : kecepatan angin

Daya yang dihasilkan oleh sebuah turbin angin ( $P$ ), akan memenuhi persamaan berikut [3]:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_a^3 4a(1-a)^2 \quad (2.5)$$

Dimana:

$$a = 1 - \frac{V_o}{V_u} \quad (2.6)$$

$V_u$ : kecepatan angin di depan baling-baling

$V_o$ : kecepatan saat mengenai baling-baling.

Sehingga dengan membandingkan daya yang dihasilkan oleh angin, dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin, maka akan didapatkan efisiensi dari turbin angin sebagai berikut [3]:

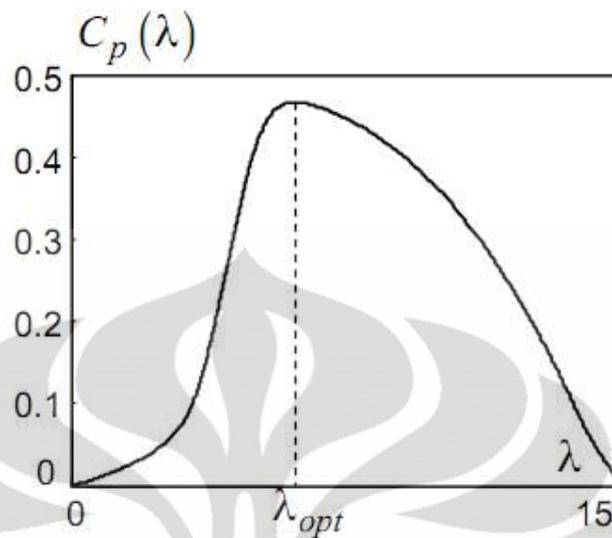
$$C_p = \frac{P}{P_t} = \frac{0.5 \rho A V_a^3 4a(1-a)^2}{0.5 \rho A V_a^3} \quad (2.7)$$

Sehingga:

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.8)$$

Dari persamaan matematika tersebut  $C_p$  memiliki nilai optimum  $C_{p_{maks}}=0.59$  ketika nilai  $a = 1/3$  [3]. Nilai maksimum  $C_p$  tersebut adalah nilai  $C_p$  maksimum ideal. Tetapi pada kenyataannya, nilai  $C_p$  maksimum untuk turbin angin biasanya tidak bisa mencapai 0.59.

$C_p$  sering juga disebut dengan koefisien daya. Nilai  $C_p$  tersebut bergantung dari nilai rasio kecepatan ( $\lambda$ ) dan sudut *blade* ( $\beta$ ). Hubungan antara  $\lambda$  dan  $C_p$  dapat dilihat pada gambar



Gambar 2.2. Hubungan antara  $\lambda$  dan  $C_p$  [3]

### 2.2.2 Pemodelan Turbin Angin

Daya yang dihasilkan oleh turbin angin akan dipengaruhi oleh densitas udara ( $\rho$ ), panjang jari-jari dari *blade* ( $R$ ), kecepatan angin ( $V$ ), dan koefisien daya ( $C_p$ ) [3].

$$P = 0.5\pi\rho R^3 V^2 C_p \quad (2.9)$$

Koefisien daya bergantung pada nilai rasio kecepatan ( $\lambda$ ) dan besarnya sudut pada *blade* ( $\beta$ ). Rasio kecepatan (*speed ratio*) adalah perbandingan antara kecepatan rotor yang dihasilkan pada low speed shaft ( $\Omega_{wt}$ ) dengan kecepatan angin ( $V$ ) [3]

$$\lambda = \frac{R\Omega_{wt}}{V} \quad (2.10)$$

Nilai koefisien daya bisa didapatkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [4]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.12)$$

Torsi yang dihasilkan oleh turbin angin bergantung dari daya yang dihasilkan, dan kecepatan putar turbin angin pada saat itu [3].

$$T_{wt} = \frac{P_{wt}}{\Omega_{wt}} \quad (2.13)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.10 didapatkan [1]:

$$T_{wt} = \rho \pi R^3 V^2 C_q \quad (2.14)$$

Dimana [1]:

$$C_q = \frac{C_p}{\lambda} \quad (2.15)$$

$C_q$  sering disebut dengan koefisien torsi.

Pada turbin angin, terdapat sebuah actuator untuk menggerakkan *blade* ke sudut tertentu. Actuator tersebut memiliki respon terhadap set point yang diberikan, dengan blok diagram sebagai berikut.



Gambar 2.3. Blok diagram actuator penggerak sudut *blade*

Dimana transfer function  $G(s)$  adalah sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{1}{T_{act} \cdot s + 1} \quad (2.16)$$

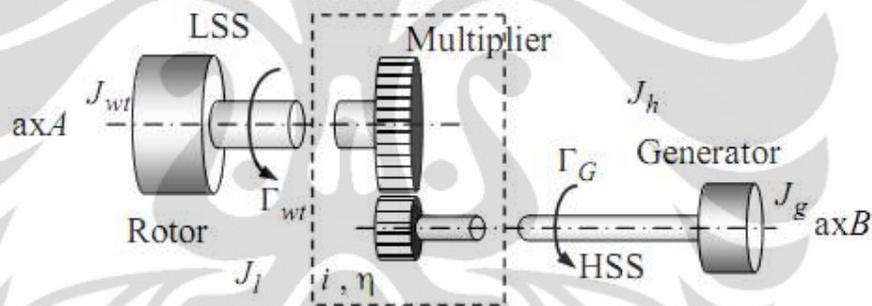
Dimana  $T_{act}$  merupakan konstanta waktu.

### 2.2.3 Drive Train

*Drive train* adalah bagian dari PLTB yang berfungsi sebagai transmisi kecepatan mekanikal dari turbin angin ke generator. Dalam pentransmisian tersebut biasanya terjadi peningkatan kecepatan (*speed multiplier*) dengan rasio peningkatan tertentu. Sehingga, generator akan mendapatkan kecepatan yang lebih tinggi.

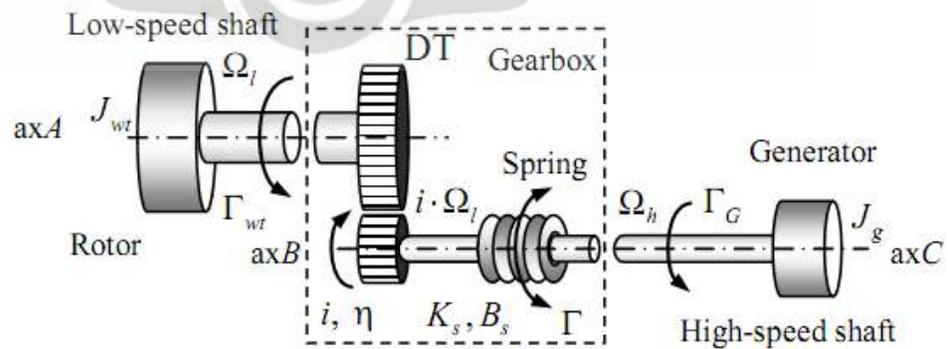
*Drive train* terbagi menjadi dua, yaitu *rigid drive train* dan *flexible drive train*

#### 1. Rigid drive train



Gambar 2.4. rigid drive train[3]

#### 2. Flexible drive train



Gambar 2.5. Flexible drive train[3]

Perbedaan dari kedua jenis *drive train* tersebut adalah, *flexible drive train* memiliki spring yang menghubungkan antara gearbox dengan generator.

#### 2.2.4 Pemodelan *Drive Train*

*Drive Train* (Gearbox), terhubung dengan dua sisi, yaitu *low speed shaft* (kecepatan putar rotor windturbine) dan *high speed shaft* (kecepatan putar generator)

Besarnya perubahan kecepatan putar dari *low speed shaft* ke *high speed shaft* akan dipengaruhi oleh momen inersia yang ada pada turbin angin maupun generator dan masing masing torsi yang ada pada turbin angin dan generator.

$$T_{wt}' + T_{em} = J \frac{d\Omega_{em}}{dt} \quad (2.17)$$

dengan nilai J adalah inersia ekuivalen antara kedua inersia, turbin angin dan generator.

$$J = J_{gen} + \frac{J_{wt}}{K^2} \quad (2.18)$$

Dan  $T_{wt}'$  adalah nilai ekuivalen dari torsi pada turbin angin.

$$T_{wt}' = \frac{T_{wt}}{K} \quad (2.19)$$

#### 2.2.5 Generator

Generator adalah sebuah alat yang dapat merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Pada umumnya, generator terbagi menjadi dua tipe yaitu generator induksi dan generator sinkron.

Generator induksi bekerja dengan prinsip elektromagnetik. Kumparan stator diberikan arus bolak-balik tiga fasa, sehingga akan menimbulkan medan magnet yang arah resultannya selalu berputar.

Karena pengaruh medan magnet tersebut, akan terjadi induksi pada kumparan rotor. Karena medan magnetnya berubah-ubah, akan timbul GGL induksi pada rotor akibat perubahan fluks. GGL tersebut akan menyebabkan timbulnya medan magnet pada rotor.

Interaksi antara kedua gaya tersebut, akan menimbulkan gaya Lorentz yang akan memberikan gaya kepada rotor untuk berputar. Tetapi pada generator induksi, rotor tersebut akan diputar melawan gaya Lorentz tersebut, sehingga akan timbul arus di stator yang lebih besar dibandingkan sebelumnya.

Berbeda dengan generator induksi, generator sinkron menggunakan magnet permanen sebagai rotornya. Prinsip kerjanya hampir sama, hanya saja generator sinkron tidak perlu menunggu rotor mengalami induksi dari stator untuk menghasilkan medan magnet, karena rotor dibuat dengan magnet permanen.

### 2.2.6 Pemodelan Generator

Generator yang digunakan dalam simulasi ini adalah generator induksi *squirrel cage*.

Nilai arus yang mengalir pada generator induksi dalam sumbu d dan q dapat diperoleh dengan persamaan differential sebagai berikut[3]:

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{Sd}}{dt} &= \frac{V_{Sd}}{L_S} - \frac{R_S}{L_S} i_{Sd} - \frac{L_m}{L_S} \cdot \frac{di_{Rd}}{dt} + \omega_s \cdot \left( i_{Sq} + \frac{L_m}{L_S} i_{Rq} \right) \\
 \frac{di_{Sq}}{dt} &= \frac{V_{Sq}}{L_S} - \frac{R_S}{L_S} i_{Sq} - \frac{L_m}{L_S} \cdot \frac{di_{Rq}}{dt} - \omega_s \cdot \left( i_{Sd} + \frac{L_m}{L_S} i_{Rd} \right) \\
 \frac{di_{Rd}}{dt} &= \frac{V_{Rd}}{L_R} - \frac{R_R}{L_R} i_{Rd} - \frac{L_m}{L_R} \cdot \frac{di_{Sd}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \left( i_{Rq} + \frac{L_m}{L_S} i_{Sq} \right) \\
 \frac{di_{Rq}}{dt} &= \frac{V_{Rq}}{L_R} - \frac{R_R}{L_R} i_{Rq} - \frac{L_m}{L_R} \cdot \frac{di_{Sq}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \left( i_{Rd} + \frac{L_m}{L_S} i_{Sd} \right)
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Pada generator induksi squirrel cage, tegangan d,q pada rotor akan bernilai nol, sehingga dengan menggunakan state variable sebagai berikut[3]:

$$\begin{aligned} x &= [x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t) \quad x_4(t)]^T = [i_{sd} \quad i_{sq} \quad i_{rd} \quad i_{rq}]^T \\ u &= [V_{sd} \quad V_{sq}]^T \end{aligned} \quad (2.21)$$

Akan didapatkan model state space dari motor induksi yaitu[3]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(\Omega_h).x + B.u \\ y &= \tau_G = \frac{3pL_m}{2}(x_2x_3 - x_1x_4) \end{aligned} \quad (2.22)$$

Dengan matriks A dan B adalah sebagai berikut[3]:

$$A(\Omega_h) = \begin{bmatrix} -\frac{R_S}{\sigma L_S} & \omega_S + \frac{p\Omega_h L_m^2}{\sigma L_S L_R} & \frac{L_m R_R}{\sigma L_S L_R} & \frac{p\Omega_h L_m}{\sigma L_S} \\ -(\omega_S + \frac{p\Omega_h L_m^2}{\sigma L_S L_R}) & -\frac{R_S}{\sigma L_S} & -\frac{p\Omega_h L_m}{\sigma L_S} & \frac{L_m R_R}{\sigma L_S L_R} \\ \frac{L_m R_S}{\sigma L_S L_R} & -\frac{p\Omega_h L_m}{\sigma L_R} & -\frac{R_R}{\sigma L_R} & \omega_S - \frac{p\Omega_h}{\sigma} \\ \frac{p\Omega_h L_m}{\sigma L_R} & \frac{R_S L_m}{\sigma L_S L_R} & \frac{p\Omega_h}{\sigma} - \omega_S & -\frac{R_R}{\sigma L_R} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_S} & 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_S L_R} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_S} & 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_S L_R} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Dimana

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_S L_R} \quad (2.25)$$

Daya aktif dan reaktif pada generator bisa didapatkan dengan persamaan sebagai berikut [6]:

$$P = \frac{3}{2}(V_{ds}i_{ds} + V_{qs}i_{qs}) \quad (2.26)$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_{qs}i_{ds} - V_{ds}i_{qs}) \quad (2.27)$$

Penjelasan simbol:

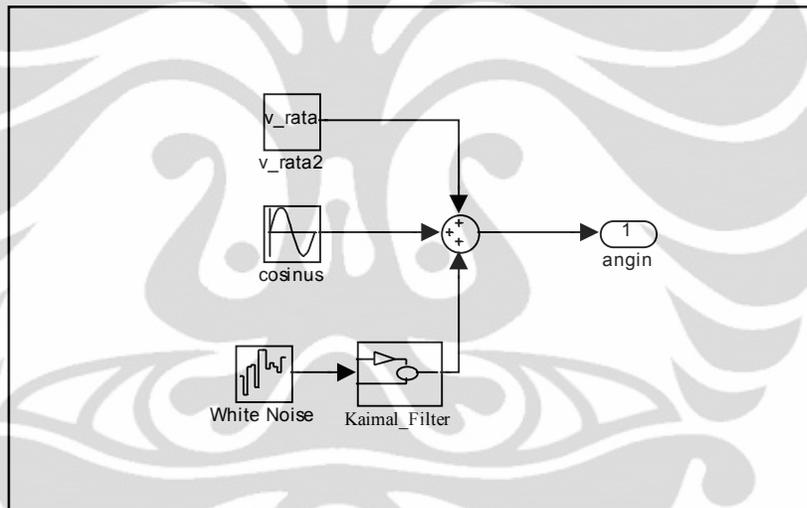
$R_r$	: hambatan pada rotor	$I_{sd}$	: Arus stator pada sumbu d
$R_s$	: hambatan pada stator	$I_{sq}$	: Arus stator pada sumbu q
$L_r$	: induktansi pada rotor	$I_{rd}$	: Arus rotor pada sumbu d
$L_s$	: induktansi pada stator	$I_{rq}$	: Arus rotor pada sumbu q
$L_m$	: induktansi mutual	$V_{sd}$	: Tegangan stator pada sumbu d
$p$	: Jumlah pasangan pole	$V_{sq}$	: Tegangan stator pada sumbu q

### BAB 3 MODEL SIMULASI SISTEM PLTB

Model matematik sistem PLTB yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya dibuat simulasinya dengan menggunakan perangkat lunak Matlab/Simulink.

#### 3.1 Simulasi Angin

Dari pemodelan yang telah dilakukan, dibuat simulasi angin menggunakan Matlab/Simulink sebagai berikut:



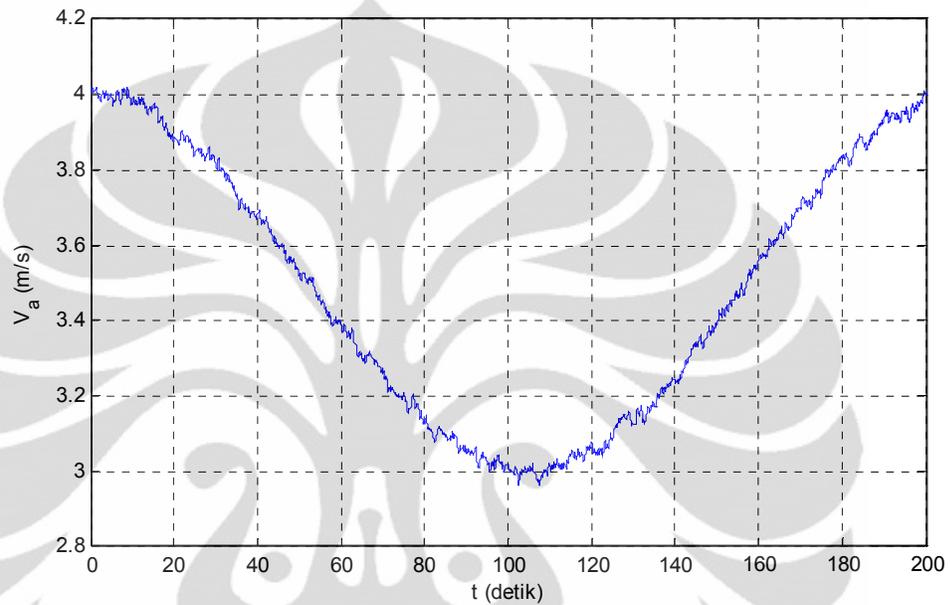
Gambar 3.1. model angin pada Matlab

Dalam gambar di atas, blok `v_rata2` merupakan nilai rata-rata kecepatan angin yang dibuat menggunakan konstanta pada Simulink, blok `cosinus` adalah blok untuk menggenerasi sinyal cosinus. Blok `White Noise` adalah blok untuk menggenerate *white noise*.

Simulasi model angin dilakukan dengan memberikan parameter-parameter yang dapat dilihat pada table 3.1.

Amplitudo penyimpangan	0.5
Noise power	0.001
Kecepatan rata-rata (m/s)	3.5

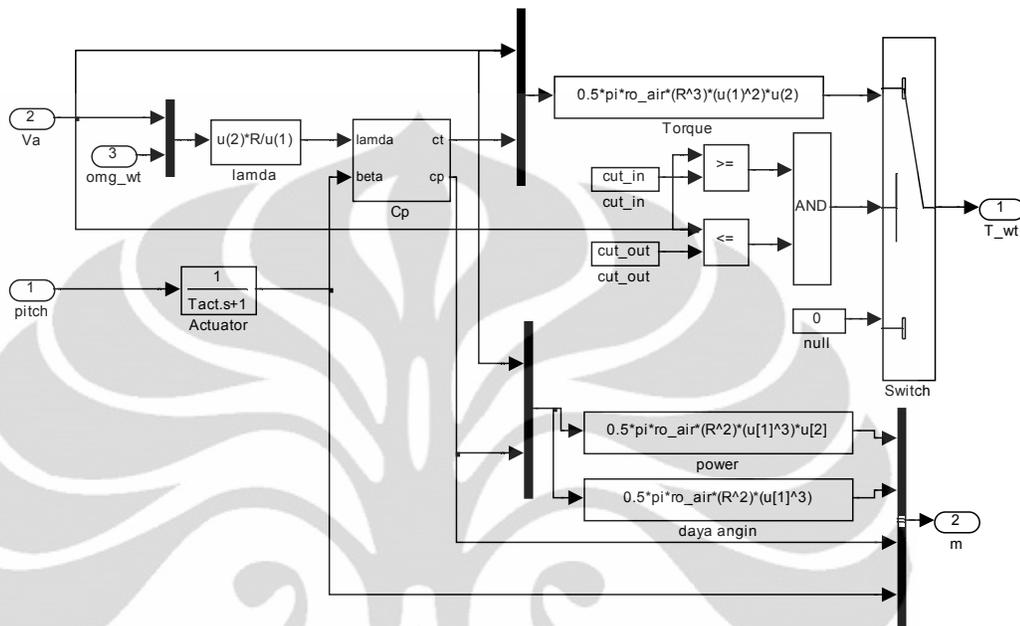
Tabel 3.1 Parameter simulasi angin



Gambar 3.2. Hasil simulasi angin pada matlab

### 3.2 Turbin Angin

Dari pemodelan yang telah dilakukan, dibuat simulasi turbin angin menggunakan Matlab/Simulink sebagai berikut:



Gambar 3.3. model turbin angin pada Matlab

Pada gambar diatas blok lamda adalah blok untuk menghitung nilai lamda. Blok actuator adalah *transfer function* yang merupakan hubungan antara sudut *blade* dengan *set point* yang diberikan. Blok Cp adalah blok untuk menghitung nilai koefisien daya dan koefisien torsi. Blok Torque, adalah blok untuk menghitung nilai torsi turbin. Blok switch adalah blok untuk membandingkan nilai angin dengan nilai *cut out* dan *cut in*, apabila nilai angin lebih dari *cut out* atau kurang dari *cut in*, maka torsi yang dikeluarkan adalah 0. Blok power adalah blok untuk menghitung daya yang dihasilkan oleh turbin angin. Blok daya angin adalah blok untuk menghitung daya angin yang diterima.

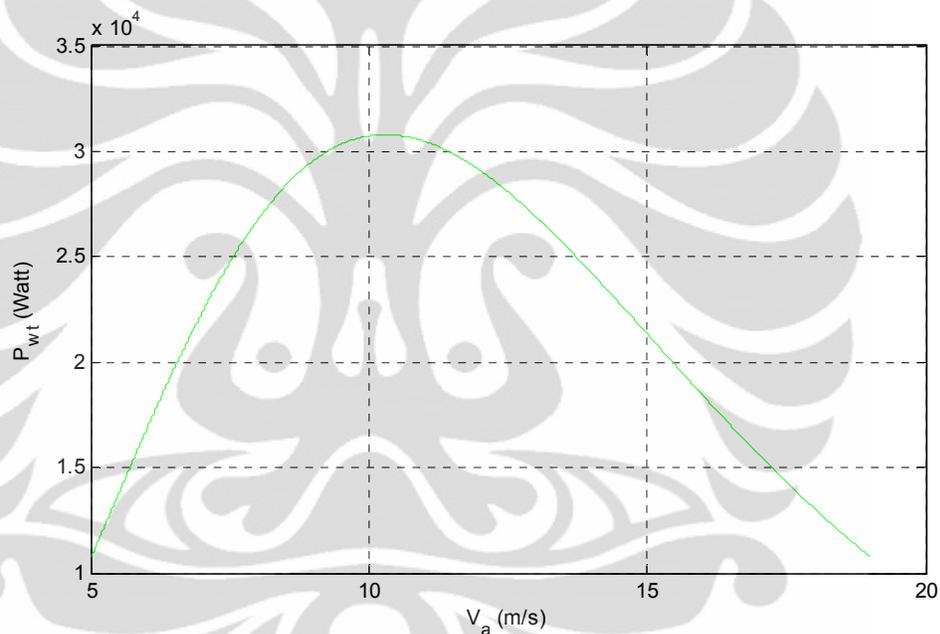
Simulasi model turbin angin dilakukan dengan memberikan *input* kecepatan angin berupa sinyal *ramp* yang bergerak dari 5-19 m/s dengan kecepatan putar turbin diberikan *input* konstan 3 rad/s

Parameter turbin angin yang digunakan dapat dilihat pada table 3.2.

Jari-jari <i>blade</i> (m)	10
Masa Jenis Udara ( $\text{kg m}^3$ )	1.25
Konstanta waktu aktuator sudut <i>blade</i>	1

Tabel 3.2 Parameter simulasi turbin angin [7]

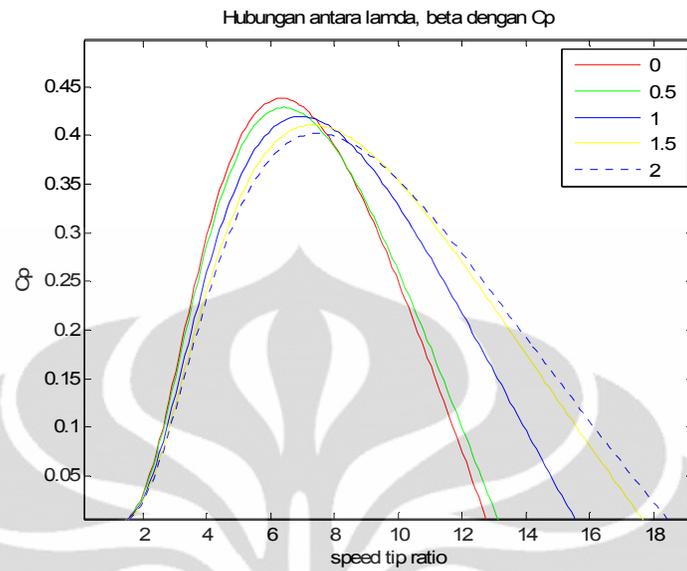
Setelah simulasi dijalankan, didapatkan grafik keluaran daya turbin terhadap kecepatan angin seperti pada gambar.



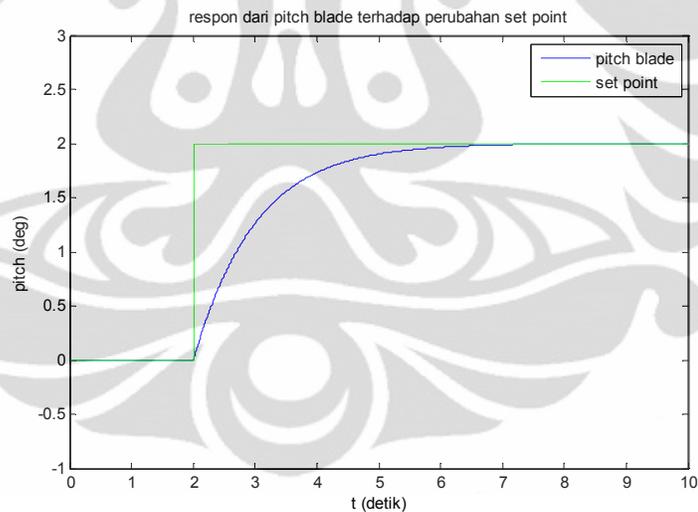
Gambar 3.4. Hasil simulasi turbin angin pada Matlab

Dengan mengubah nilai sudut *blade* ( $\beta$ ) akan didapatkan nilai koefisien power yang berbeda pula. Dari model tersebut, dapat disimulasikan hubungan antara  $\beta$ ,  $\lambda$ , dan  $C_p$  yang hasilnya dapat dilihat pada gambar 3.5. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa nilai  $C_p$  maksimum untuk system turbin angina ini adalah 0.43 yang akan didapatkan bila nilai  $\lambda = 6.2$ .

Respon perubahan sudut *bladeterhadap* perubahan set point yang diberikan dapat dilihat pada gambar 3.6



Gambar 3.5. Hasil simulasi yang menggambarkan hubungan antara  $\beta$ ,  $\lambda$ , dan  $C_p$

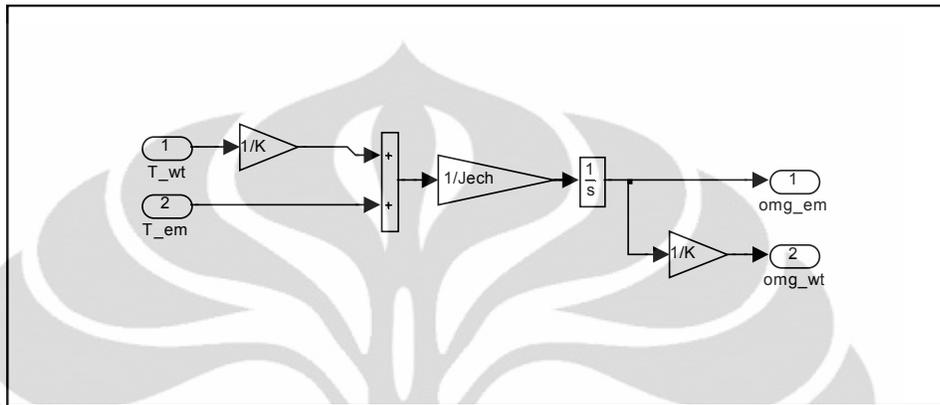


Gambar 3.6. respon perubahan sudut *blade* terhadap perubahan set point

Dari hasil tersebut, dapat dikatakan bahwa model simulasi untuk turbin angin valid atau telah sesuai dengan dasar teori.

### 3.3 Drive Train

Dari pemodelan yang telah dilakukan, dibuat simulasi *drive train* menggunakan Matlab/Simulink sebagai berikut:



Gambar 3.7. Model *drive train* pada Matlab/Simulink

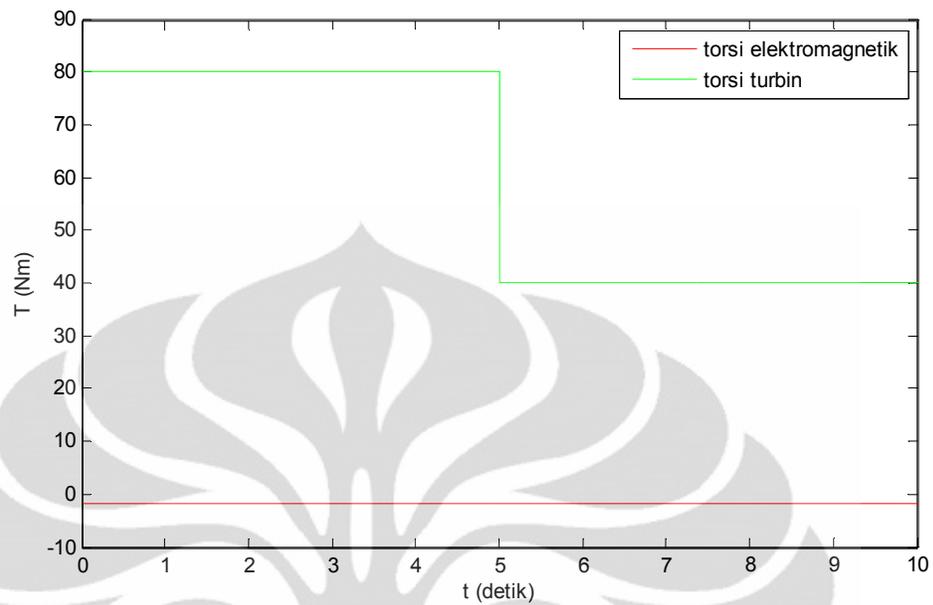
Simulasi model *drive train* dilakukan dengan memberikan *input* torsi turbin berupa sinyal *step* yang bergerak dari 80 ke 40 Nm dengan torsi elektromagnetik diberikan nilai konstan -2 Nm.

Parameter *drive train* yang digunakan dapat dilihat pada table 3.3.

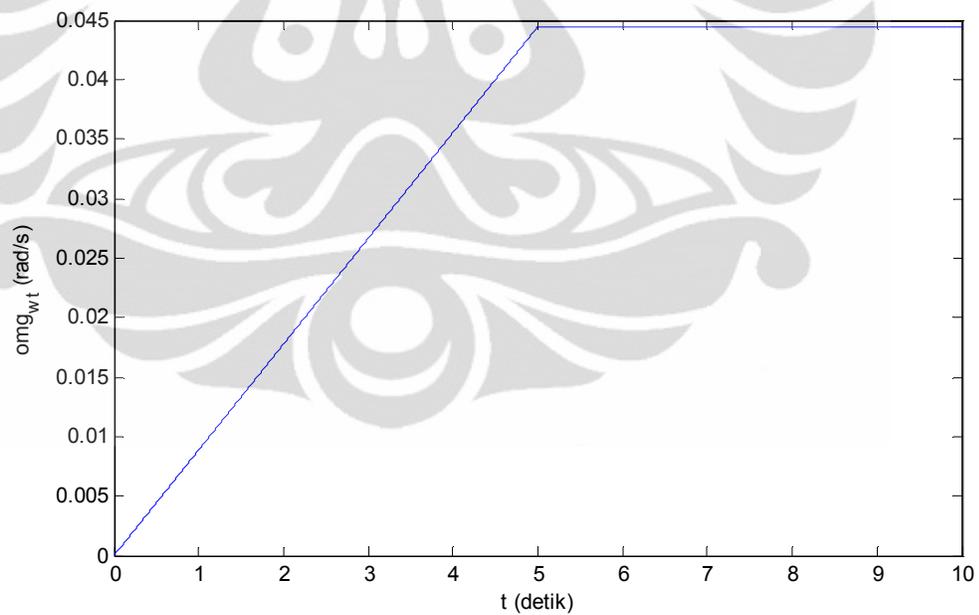
Rasio <i>gearbox</i>	20
Inersia generator(kg m <sup>2</sup> )	11.87
Inersia turbin angin(kg m <sup>2</sup> )	100

Tabel 3.3 Parameter simulasi *drive train*[7]

Setelah simulasi dijalankan, didapatkan grafik torsi turbin dan torsi generator yang dapat dilihat pada gambar 3.8. Kemudian kecepatan putar turbin dapat dilihat pada gambar 3.9.



Gambar 3.8. Perbandingan torsi turbin dan torsi generator



Gambar 3.9. kecepatan putar turbin

Pada saat awal, perbedaan hasil penjumlahan torsi turbin yang dibagi dengan rasio *gearbox* dengan torsi elektromagnetik bernilai positif dan konstan. Sehingga turbin akan mengalami percepatan konstan. Pada detik ke lima, hasil penjumlahan torsi

turbin yang dibagi dengan rasio *gearbox* dengan torsi elektromagnetik bernilai nol. Sehingga kecepatan putar turbin konstan.

### 3.4 Generator Induksi Squirrel Cage

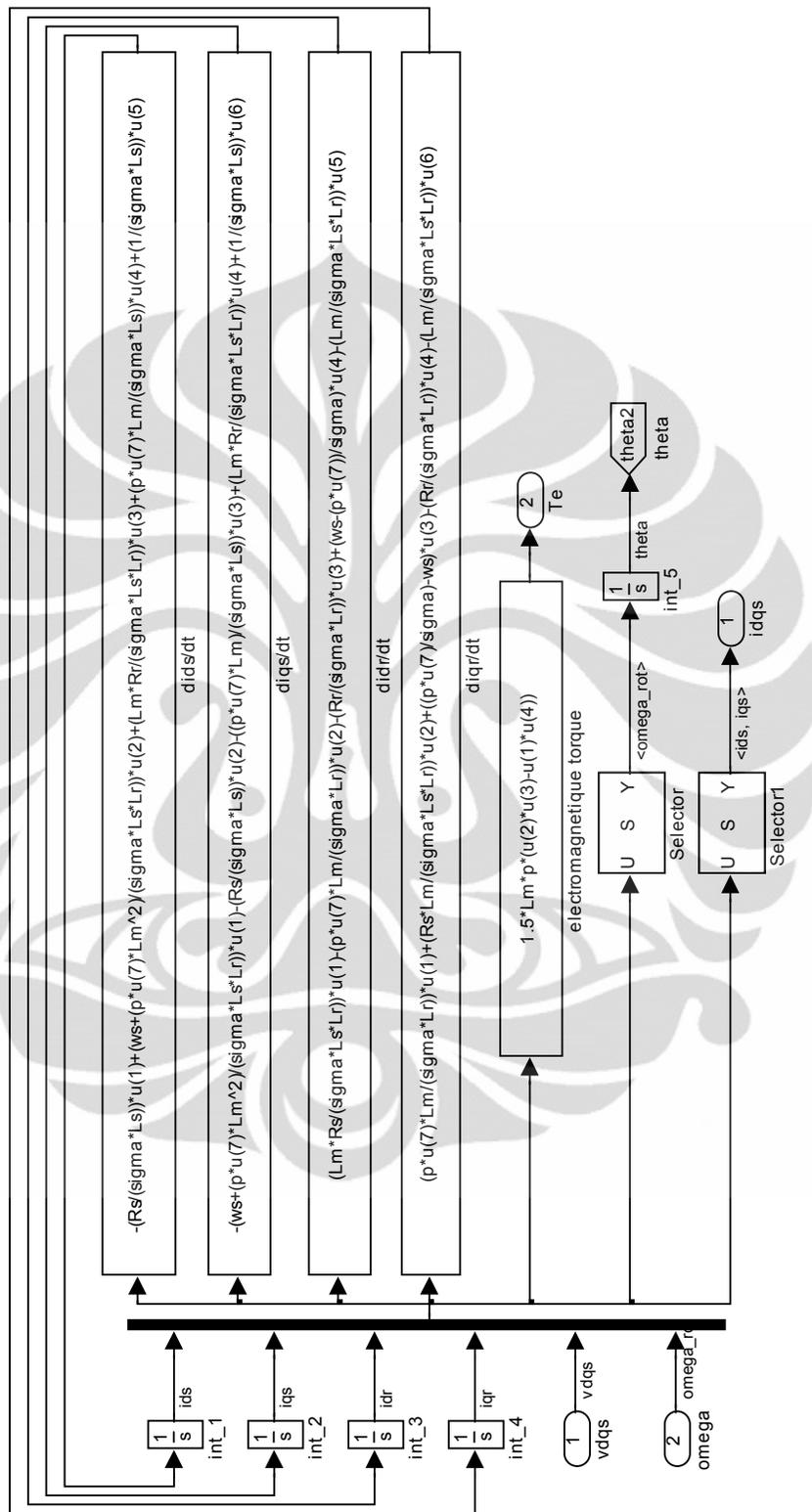
Dari pemodelan yang telah dilakukan, dibuat simulasi generator induksi *squirrel cage* menggunakan Matlab/Simulink seperti pada gambar 3.10.

Simulasi model generator induksi dilakukan dengan memberikan *input* kecepatan putar rotor berupa sinyal *ramp* yang bergerak dari 80-100 rad/s dengan *input* tegangan  $V_d = 0$  volt dan  $V_q = \sqrt{2} \times 220$  volt.

Parameter generator induksi yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.4.

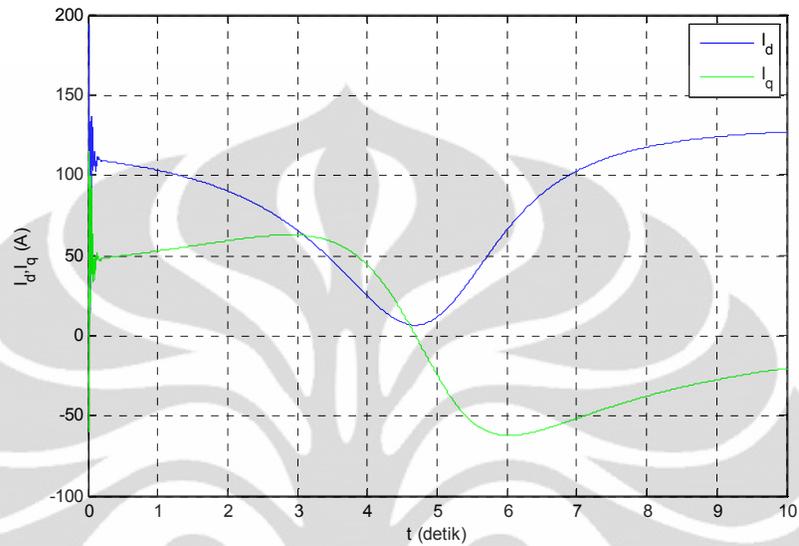
Resistansi stator (ohm)	0.262
Induktansi stator (H)	$3,840 \times 10^{-3}$
Resistansi rotor (ohm)	0.187
Induktansi rotor (H)	$3,840 \times 10^{-3}$
Induktansi mutual (H)	0.172
Jumlah pasangan pole	4

Tabel 3.1 Parameter simulasi Generator induksi [7]



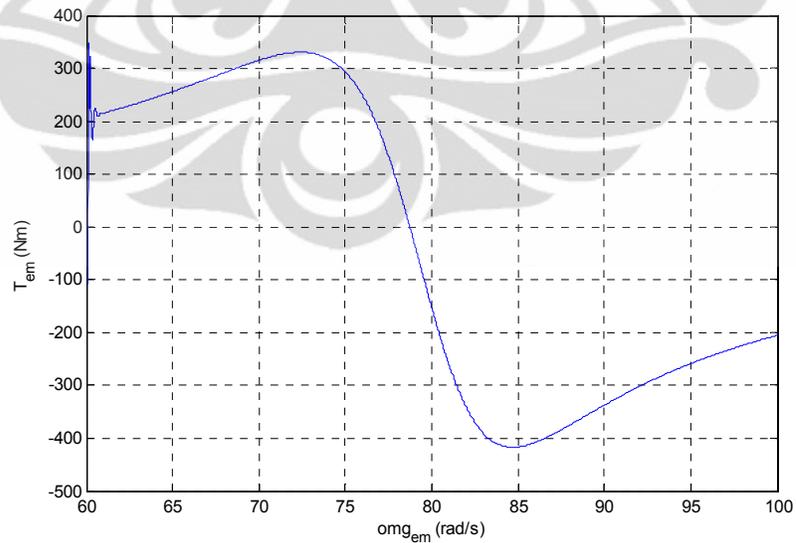
Gambar 3.10. model generator induksi pada Matlab

Setelah simulasi dijalankan, didapatkan grafik arus stator pada sumbu d dan q seperti pada gambar 3.11.



Gambar 3.11. Arus pada sumbu d dan q

Kemudian didapatkan juga grafik torsi elektromagnetik terhadap kecepatan putar generator pada gambar 3.12.



Gambar 3.12. Grafik torsi elektromagnetik terhadap kecepatan putar generator

## BAB 4 PERANCANGAN PENGENDALI

Pada turbin angin, diperlukan adanya pengendali agar efisiensi daya yang didapatkan, mencapai nilai yang optimal. Ada beberapa teknik pengendalian untuk turbin angin, yang bergantung pada konfigurasi turbin angin yang akan dikendalikan.

### 4.1 Konfigurasi PLTB

Konfigurasi PLTB ada empat jenis yaitu:

1. *Fixed-speed fixed-pitch*

Konfigurasi ini merupakan konfigurasi yang sangat sederhana, dimana pada konfigurasi ini tidak memungkinkan kendali terhadap kecepatan maupun sudut dari *blade*.

2. *Fixed-speed variable-pitch*

Pada konfigurasi ini, memungkinkan untuk melakukan kendali terhadap sudut (*pitch*) *blade*, tetapi kecepatan putar generator tidak dikendalikan. Tujuan dari pengendalian *pitch* adalah untuk mendapatkan daya *aerodynamic* yang optimal berdasarkan kurva karakteristik turbin angin yang dapat dilihat pada gambar 2.2.

3. *Variable-speed fixed-pitch*

Konfigurasi ini memungkinkan untuk melakukan kendali terhadap kecepatan generator, tetapi sudut *blade* tidak dikendalikan. Tujuan dari mengendalikan kecepatan putar adalah agar bisa mendapatkan nilai lamda optimum pada kondisi angin tertentu.

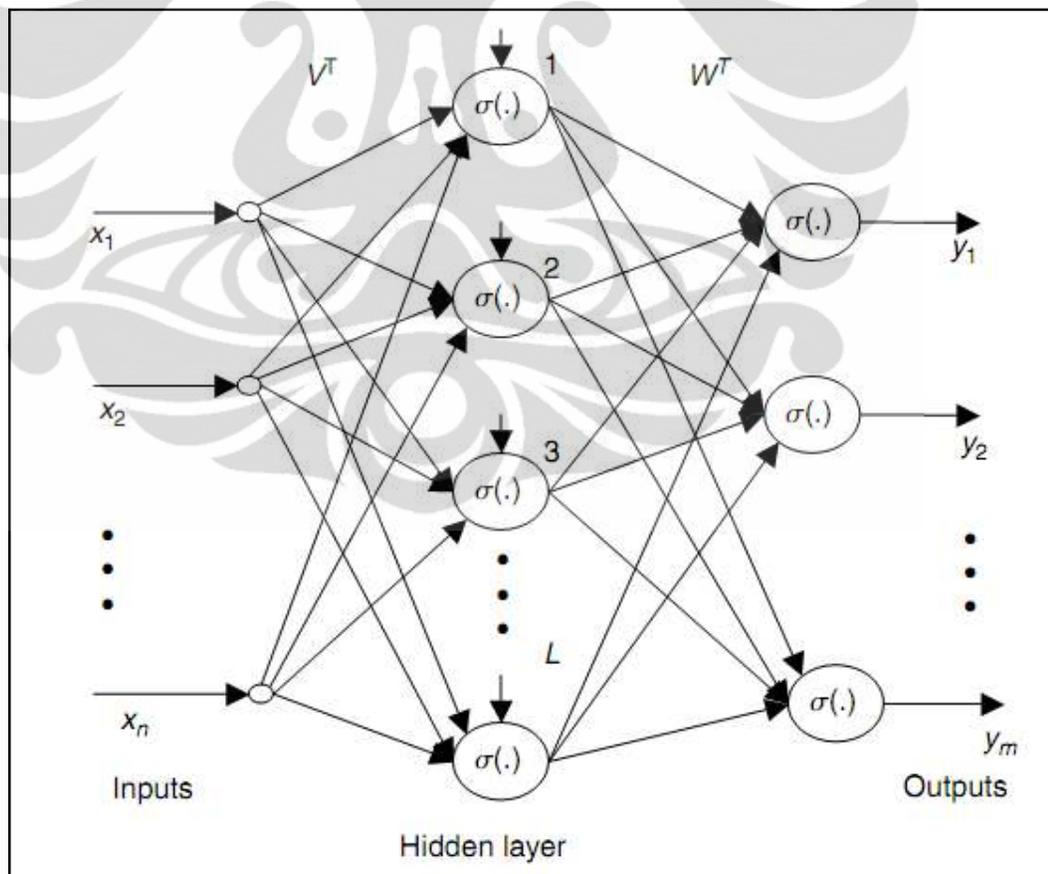
4. *Variable-speed variable-pitch*

Konfigurasi ini merupakan konfigurasi yang paling baik dan akan menghasilkan daya yang lebih tinggi. Karena dapat melakukan pengendalian terhadap kecepatan generator dan sudut *blade*.

Konfigurasi yang dipakai dan disimulasikan dalam skripsi ini adalah *Fixed-speed variable-pitch* sehingga pengendalian hanya dilakukan pada *pitch blade*. Pengendali yang digunakan untuk mengendalikan *pitch* adalah Jaringan Syaraf Tiruan (JST).

#### 4.2 Jaringan Syaraf Tiruan (JST)

Jaringan syaraf tiruan merupakan sebuah algoritma yang meniru sistem kerja syaraf manusia yang terdiri dari neuron-neuron. Algoritma JST yang paling sering digunakan dalam system control adalah metode *Back Propagation*. Pada artificial JST ini, terdapat 3 lapis neuron, yaitu neuron *input*, neuron *hidden* dan neuron *output*.



Gambar 4.1. Struktur Jaringan Syaraf Tiruan [5]

Setiap neuron *input* akan terhubung dengan semua neuron *hidden* untuk memberikan informasi yang diterimanya. Setiap informasi yang diberikan kepada neuron tersebut akan mengalami perkalian dengan suatu bobot tertentu. Kemudian di dalam neuron itu sendiri, informasi tersebut akan dimasukkan ke dalam suatu fungsi yang disebut dengan fungsi aktivasi.

Setelah melewati fungsi aktivasi, setiap neuron *hidden* akan mengirimkan informasi yang telah diolah tadi kepada masing-masing neuron *output*. Sebelum memasuki neuron *output*, informasi tersebut kembali mengalami perkalian dengan suatu bobot tertentu. Kemudian di dalam neuron *output*, informasi kembali diolah dengan fungsi aktivasi yang sama dengan neuron *hidden*. Hasil dari neuron *output* adalah keluaran dari sistem JST.

Di dalam JST, diperlukan adanya pelatihan sistem, yang berguna untuk menyesuaikan nilai bobot dari masing-masing jalur antar *neuron*, agar keluaran dari sistem tersebut sesuai dengan yang diinginkan.

Secara umum proses pelatihan dalam Propagasi Balik meliputi:

1. Pengambilan *input*
2. Penelusuran *error*
3. Penyesuaian bobot

Secara lebih spesifik algoritma dalam Sistem propagasi balik adalah sebagai berikut:

**a. Inisialisasi**

- Yang harus diinisialisasi :
  - Bobot awal
  - Laju pembelajaran ( $\alpha$ )
  - *Stopping condition*
  - Menentukan fungsi aktivasi yang dipakai, biasanya yang dipakai adalah fungsi sigmoid:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4.1)$$

### b. Proses feedforward

- setiap unit *input* ( $X_i, i = 1, \dots, n$ ) akan:

- menerima *input*  $x_i$
- mengirimkannya ke semua unit layer di atasnya (*Hidden layer*).

- setiap unit *hidden* ( $Z_j, j = 1, \dots, p$ )

- menghitung semua sinyal *input* dengan bobotnya :

$$z_{inj} = v_{oj} + \sum x_i v_{ij} \quad (4.2)$$

- menghitung nilai aktivasi setiap unit *hidden* sebagai keluaran unit *hidden*:

$$z_j = f(z_{inj}) \quad (4.3)$$

- mengirim nilai aktivasi sebagai *input* untuk unit keluaran.

- Setiap unit *output* ( $Y_k, k = 1, \dots, m$ ) akan:

- menghitung semua sinyal *input*-nya dengan bobotnya :

$$y_{ink} = w_{ok} + \sum z_j w_{jk} \quad (4.4)$$

- menghitung nilai aktivasi setiap unit *output* sebagai *output* jaringan.

$$y_k = f(y_{ink}) \quad (4.5)$$

### c. BackPropagation

- Setiap unit *output* ( $Y_k, k = 1, \dots, m$ ) :

- menerima pola target yang bersesuaian dengan pola *input*
- menghitung informasi *error* :

$$\delta_k = (t_k - y_k) f'(y_{ink}) \quad (4.5)$$

- menghitung besarnya koreksi bobot unit *output* :

$$\Delta w_{jk} = \alpha \partial E(w_{jk}) / \partial w_{jk} = \alpha \delta_k z_j \quad (4.6)$$

- menghitung besarnya koreksi bias *output* :

$$\Delta w_{ok} = \alpha \delta_k \quad (4.7)$$

- mengirimkan  $\delta_k$  ke unit-unit yang ada pada layer di bawahnya.

- Setiap unit *hidden* ( $Z_j, j = 1, \dots, p$ ) :

- menghitung semua koreksi *error* :

$$\delta_{inj} = \sum \delta_k w_{jk} \quad (4.8)$$

- menghitung nilai aktivasi koreksi *error* :

$$\delta_j = \delta_{inj} f'(z_{inj}) \quad (4.9)$$

- menghitung koreksi bobot unit *hidden* :

$$\Delta v_{ij} = \alpha \delta_j x_i \quad (4.10)$$

- menghitung koreksi *error* bias unit *hidden* :

$$\Delta v_{oj} = \alpha \delta_j \quad (4.11)$$

- Setiap unit *output* ( $Y_k, k = 1, \dots, m$ ) :
  - meng-update bobot dan biasnya ( $j = 0, \dots, p$ ) :

$$w_{jk}(\text{baru}) = w_{jk}(\text{lama}) + \Delta w_{jk} \quad (4.12)$$

$$w_{ok}(\text{baru}) = w_{ok}(\text{lama}) + \Delta w_{ok} \quad (4.13)$$

- Setiap unit *hidden* ( $Z_j, j = 1, \dots, p$ )
  - meng-update bobot dan biasnya ( $i = 0, \dots, n$ ) :

$$v_{ij}(\text{baru}) = v_{ij}(\text{lama}) + \Delta v_{ij} \quad (4.13)$$

$$v_{oj}(\text{baru}) = v_{oj}(\text{lama}) + \Delta v_{oj} \quad (4.14)$$

#### d. *Stopping Condition*

Jika *error* telah mencapai batas yang diinginkan, maka iterasi dihentikan. Setelah *error* mencapai nilai minimum, maka bobot yang ada pada sistem JST tersebut sudah sesuai dengan yang diinginkan.

### 4.3 Perancangan Pengendali Turbin Angin

Pengendali dirancang untuk mengendalikan *blade* pada turbin angin sehingga bisa tercapai efisiensi yang maksimal. Untuk bisa merancang pengendali yang dapat mengoptimalkan efisiensi, kita harus mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi.

Dari pemodelan sistem, diketahui bahwa efisiensi bergantung pada nilai  $\lambda$  dan nilai sudut dari *blade* ( $\beta$ ). Sementara nilai  $\lambda$  dipengaruhi oleh jari-jari turbin angin ( $R$ ), kecepatan putar turbin ( $\Omega_{wt}$ ) dan kecepatan angin ( $V$ ). Dalam kasus ini, jari-jari turbin adalah sebuah parameter yang konstan atau tidak berubah-ubah selama dilakukannya penelitian, sehingga tidak dimasukkan ke dalam parameter pengendalian.

Kecepatan angin merupakan variabel yang tidak bisa dikendalikan, sehingga variabel yang mungkin dikendalikan adalah sudut *blade* dan kecepatan putar turbin. Pada skripsi ini dilakukan pengendalian terhadap sudut *blade*.

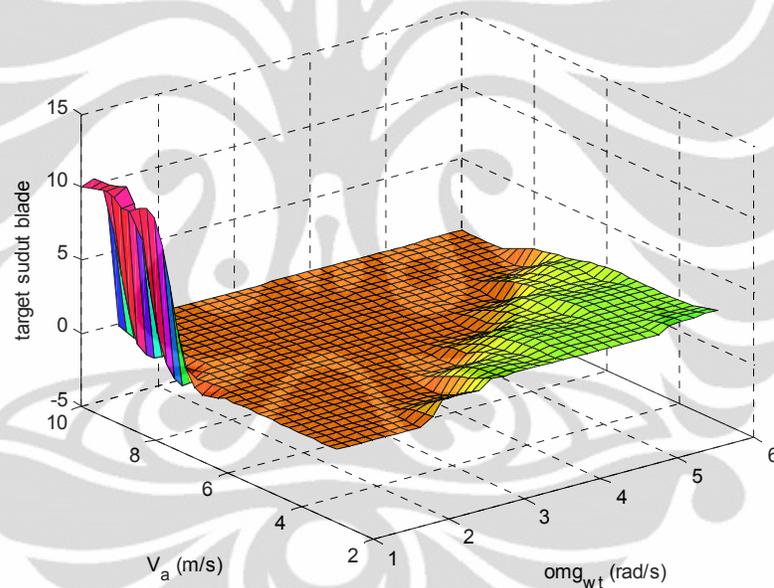
Untuk merancang pengendalian digunakan Jaringan Syaraf Tiruan dengan struktur sebagai berikut:

- 2 neuron *input*
- 2 neuron *hidden*
- 1 neuron *output*

Bobot awal JST di set menggunakan bilangan random yang rentangnya dari -0,5 sampai 0,5. Fungsi aktivasi yang digunakan adalah fungsi aktivasi sigmoid.

Jaringan syaraf tiruan tersebut dilatih dengan menggunakan data yang digenerasi. Data yang digenerasi terbagi menjadi dua bagian, yaitu *input* dan target. Data *input* yang digenerasi berupa semua kombinasi antara kecepatan putar turbin dari 1-6 rad/s, kecepatan angin dari 3-10 m/s dan data target adalah data sudut *blade* yang akan menghasilkan efisiensi maksimal dari kombinasi data *input*-nya.

Metode yang digunakan untuk menemukan sudut blade yang akan menghasilkan efisiensi maksimal adalah dengan cara menghitung hasil  $C_p$  dari kombinasi input kecepatan angin dan kecepatan putar turbin, dengan diberikan 21 variasi nilai sudut yang berkisar antara 0 sampai 10 pada setiap kombinasi input. Sehingga pada masing-masing kombinasi input, didapatkan 21 nilai  $C_p$  pada sudut yang berbeda. Dari 21 data tersebut, dicari nilai  $C_p$  maksimal dan sudut yang menghasilkan  $C_p$  maksimal tersebut. Dari keseluruhan kombinasi input, akan didapatkan sudut yang menghasilkan  $C_p$  maksimal berbeda-beda. Data tersebut bisa ditampilkan dalam grafik tiga dimensi seperti pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Target sudut *blade* untuk tiap kombinasi input

Dari data yang didapatkan, dilakukan pelatihan terhadap jaringan syaraf tiruan yang akan digunakan sebagai pengendali. Parameter yang digunakan dalam pelatihan jaringan syaraf tiruan adalah sebagai berikut:

inisialisasi bobot : nguyen widrom  
 alpha : divariasikan dari 0.2 sampai 0.7  
 epoch maksimum : 10000

Setelah dilakukan pelatihan, kemudian dilakukan pengujian terhadap jaringan syaraf tiruan tersebut menggunakan m-file, dengan data input yang digunakan sama dengan data input yang digunakan untuk pelatihan. Dari hasil pengujian didapatkan tabel yang menunjukkan nilai hasil pencapaian target dari variasi nilai alpha.

Alpha	Pencapaian target (%)
0.2	99.0704
0.3	98.0697
0.4	98.0643
0.5	99.7668
0.6	99.6120
0.7	99.7850

Tabel 4.1 hasil test dari jaringan syaraf tiruan menggunakan m-file Matlab

Dari hasil test tersebut, dipilih bobot pada neural network yang digunakan, adalah bobot yang memiliki hasil pencapaian terbaik, yaitu saat di training dengan menggunakan alpha=0.7. Bobot-bobot pada neural network tersebut dapat dilihat pada tabel

<i>V</i>	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>0</i>	-55.2270634844342	-4.23217415231617
<i>1</i>	7.39686078571577	3.14146902793035

Tabel 4.2 bobot V yang didapat dari pelatihan JST

<i>Vo</i>	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>0</i>	1.98003978636458	-1.12446821406741

Tabel 4.3 bobot Vo yang didapat dari pelatihan JST

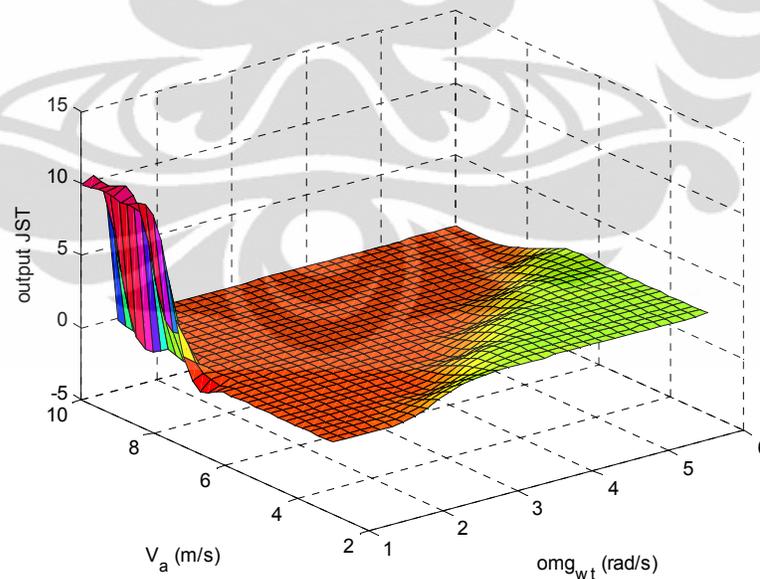
$W$	$\theta$
$\theta$	12.2839037341798
$1$	-5.70000823219730

Tabel 4.4 bobot  $W$  yang didapat dari pelatihan JST

$W_o$	$\theta$
$\theta$	-1.4114

Tabel 4.5 bobot  $W_o$  yang didapat dari pelatihan JST

Dari hasil pengujian dengan bobot JST tersebut, didapatkan keluaran dari JST pada setiap kombinasi input. Data tersebut kemudian digambarkan dalam grafik tiga dimensi seperti pada gambar 4.3.



Gambar 4.3. Keluaran JST untuk tiap kombinasi input

Dari grafik tersebut, terlihat bahwa keluaran dari JST hampir sama dengan sudut target yang akan menghasilkan  $C_p$  maksimal yang ada pada gambar 4.2.

#### 4.4 Respon Perubahan Sudut *Blade* terhadap Set Point

Untuk dapat mengendalikan sudut *blade* pada turbin angin, respon perubahan sudut *blade* terhadap set point yang diberikan harus cepat. Pada simulasi yang telah dijalankan, respon perubahan sudut *blade* terhadap set point dapat dilihat pada gambar 3.6.

Respon yang didapatkan terhitung sangat lama, dimana system tersebut membutuhkan waktu sekitar 5 detik untuk mencapai *steady state*. Agar dapat berfungsi optimal dalam pengendalian sudut, diperlukan pengendali untuk mempercepat respon dari sudut *blade*.

#### 4.5 Perancangan Pengendali PI untuk Mempercepat Respon Perubahan Sudut *Blade* terhadap Set Point

Perancangan pengendali PI untuk mempercepat respon perubahan sudut *blade* terhadap set point, dapat dilakukan dengan menggunakan metode *trial and error tuning*. Setelah melakukan *tuning*, didapatkan parameter pengendali PI sebagai berikut:

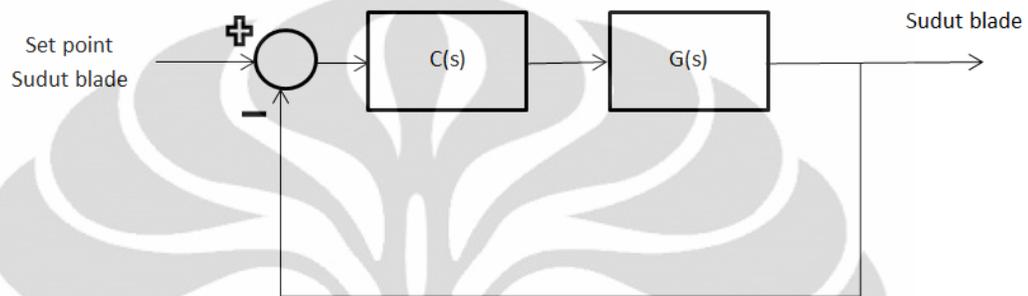
Kp	15
Ki	15

Tabel 4.6 Konstanta Pengendali PI

Sehingga didapatkan persamaan pengendali  $C(s)$  sebagai berikut:

$$C(s) = 15 + \frac{15}{s} \quad (4.15)$$

Pengendali PI yang telah dirancang, diberikan ke dalam ssstem actuator penggerak sudut *blade*. Blok diagram sistem dengan PI dapat dilihat pada gambar 4.4

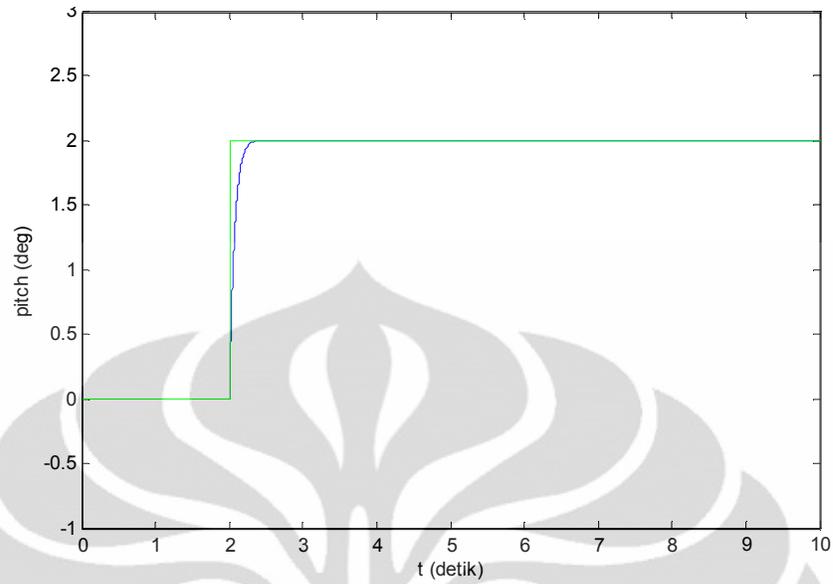


Gambar 4.4. Sistem penggerak sudut *blade* yang diberikan pengendali PI

Dimana  $C(s)$  adalah blok pengendali yang dapat dilihat dari persamaan 4.15 dan  $G(s)$  adalah transfer function dari aktuator penggerak sudut *blade* yang *transfer function*-nya dapat dilihat pada persamaan 2.16.

Dengan pengendali PI tersebut, didapatkan respon sudut *blade* terhadap set point yang diberikan seperti pada gambar 4.5

Respon yang didapatkan cukup cepat, dimana sistem membutuhkan waktu sekitar 0.3 detik untuk mencapai *steady state*. Dengan respon tersebut, diharapkan pengendalian sudut yang telah dirancang menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan, dapat bekerja secara optimal.



Gambar 4.5. respon dari sudut *blade* terhadap perubahan set point setelah ditambahkan pengendali PI

## BAB 5 HASIL DAN ANALISA

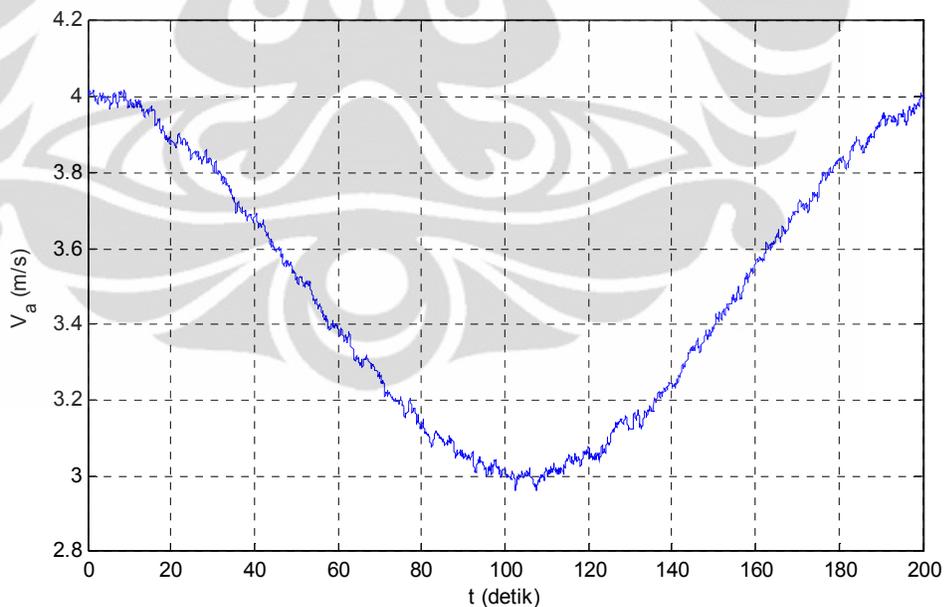
Dari model simulasi yang telah dibuat pada masing masing komponen, dibuat simulasi yang merupakan rangkaian dari masing-masing model yang membentuk model simulasi sistem PLTB yang dapat dilihat pada lampiran.

### 5.1 Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan dengan tiga variasi angin yang berbeda.

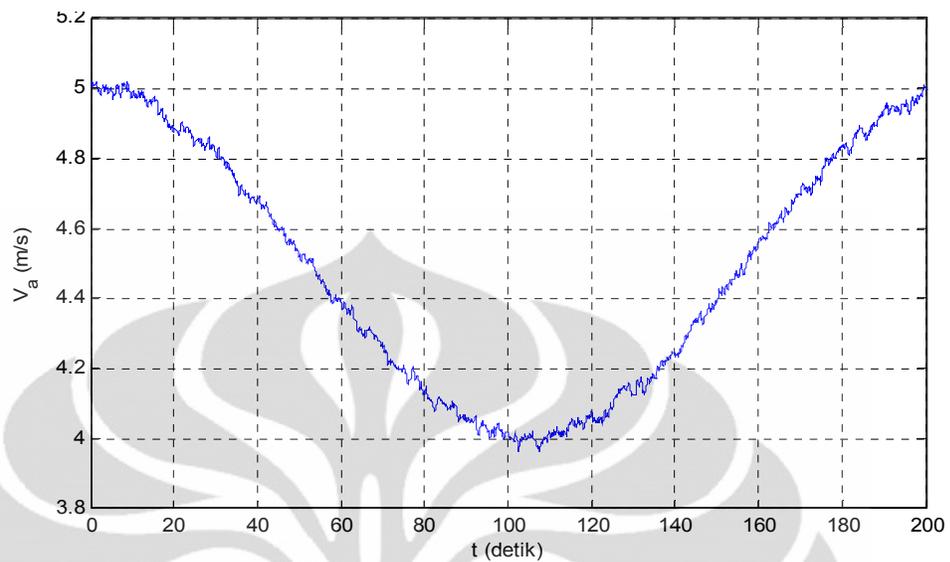
#### 5.1.1 Kecepatan Angin

Simulasi pertama dilakukan dengan kecepatan angin berkisar antara 3-4 m/s yang dijalankan selama 200 detik. Grafik kecepatan angin dapat dilihat pada gambar 5.1.



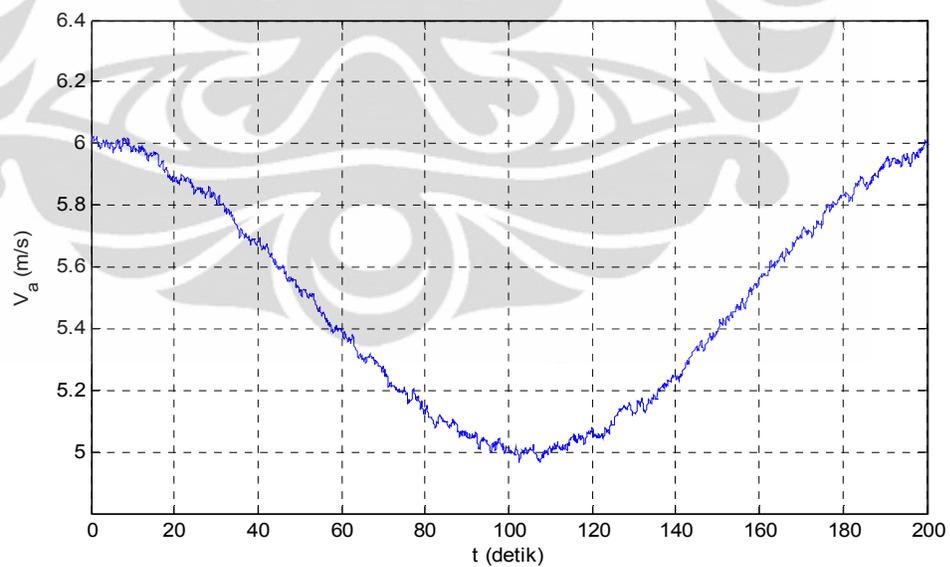
Gambar 5.1. Kecepatan Angin 3-4 m/s

Simulasi kedua dilakukan dengan kecepatan angin berkisar antara 4-5 m/s yang dijalankan selama 200 detik. Grafik kecepatan angin dapat dilihat pada gambar 5.2.



Gambar 5.2. Kecepatan Angin 4-6 m/s

Simulasi ketiga dilakukan dengan kecepatan angin berkisar antara 4-6 m/s yang dijalankan selama 200 detik. Grafik kecepatan angin dapat dilihat pada gambar 5.3.

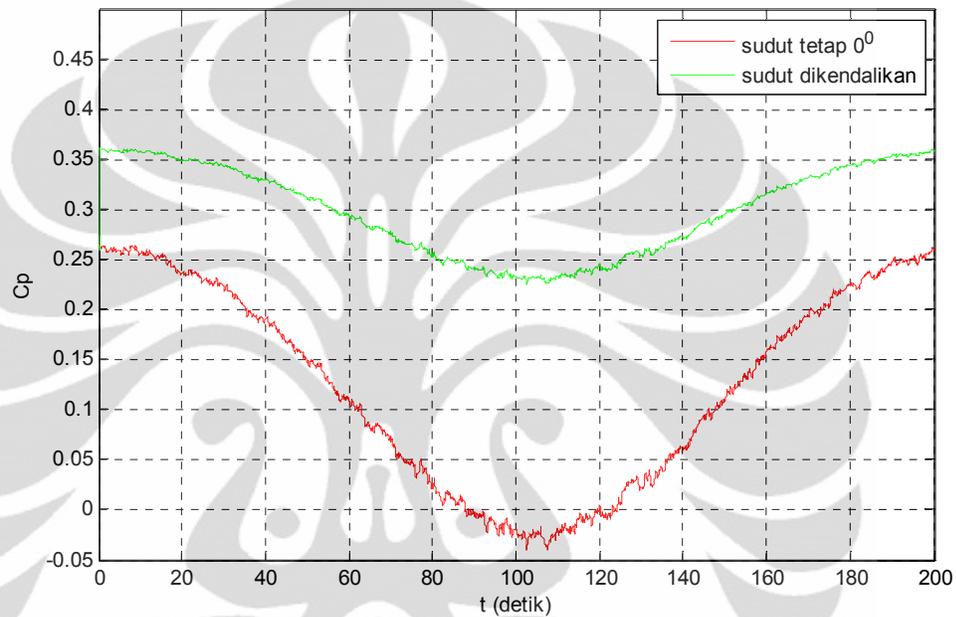


Gambar 5.3. Kecepatan Angin 5-7 m/s

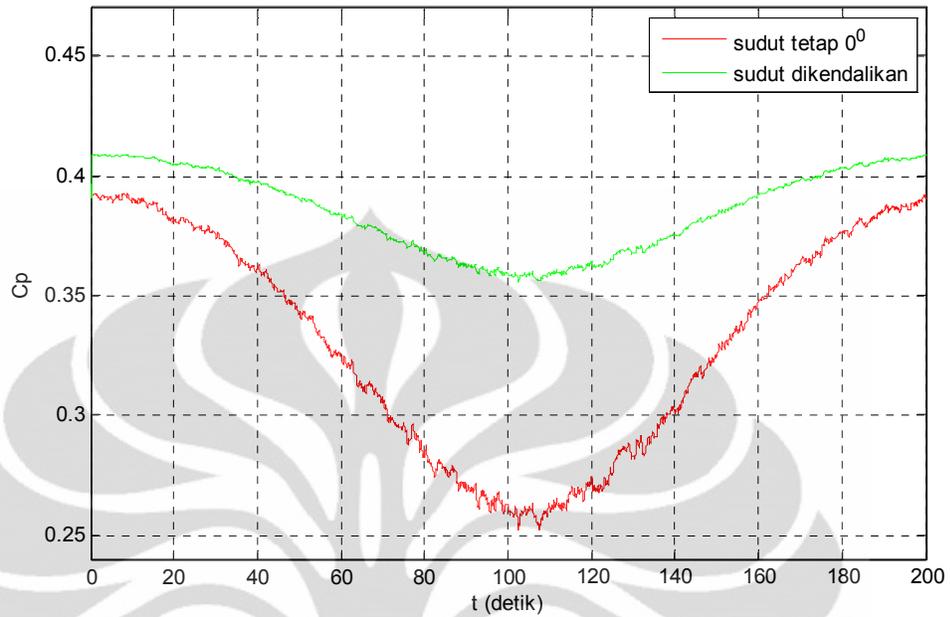
Dengan kecepatan angin tersebut, didapatkan hasil torsi turbin ( $T_{wt}$ ), daya turbin ( $P_{turbin}$ ), koefisien daya ( $C_p$ ), kecepatan putar turbin, kecepatan putar rotor, Daya

listrik real (P) dan imajiner (Q) yang dapat dilihat pada gambar 5.4-5.36, yang keseluruhannya merupakan perbandingan hasil antara sudut *blade* tetap ( $0^0$ ) dengan *blade* yang dikendalikan menggunakan jaringan syaraf tiruan.

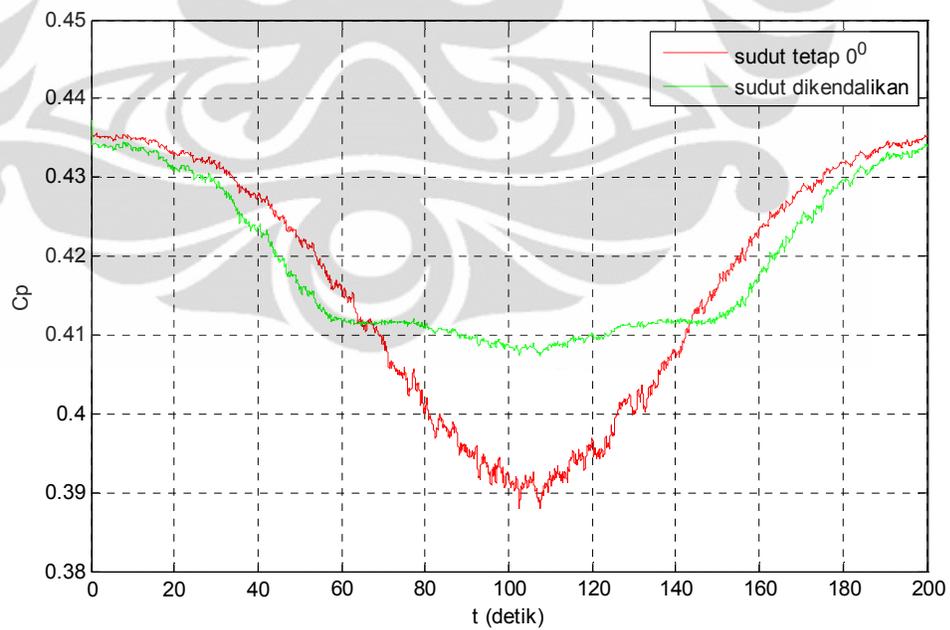
### 5.1.2 Koefisien Daya



Gambar 5.4. Perbandingan  $C_p$  antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^0$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s



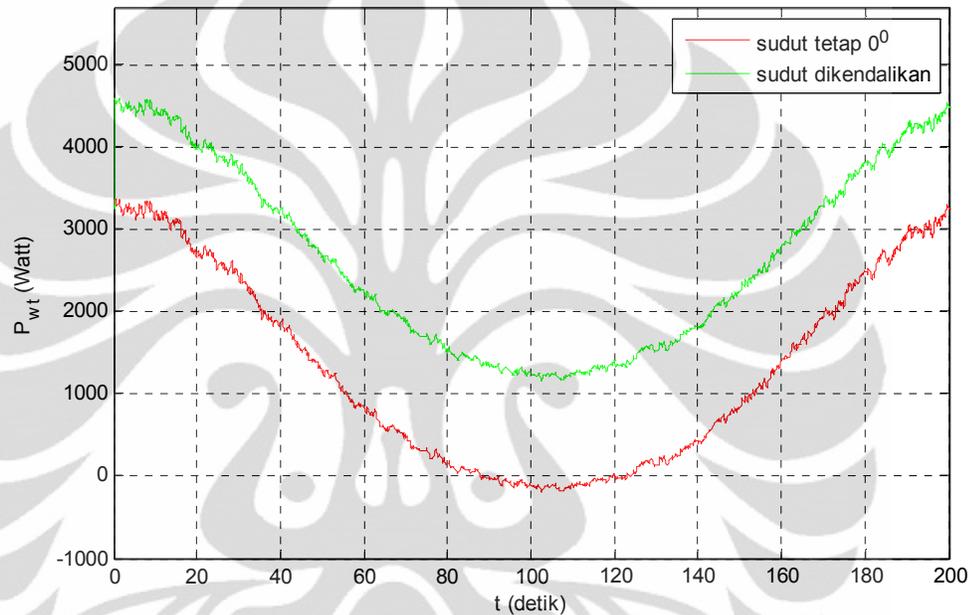
Gambar 5.5. Perbandingan  $C_p$  antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s



Gambar 5.6. Perbandingan  $C_p$  antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s

Dari Grafik diatas, terlihat bahwa nilai  $C_p$  untuk turbin angin yang dikendalikan lebih besar pada saat kecepatan angin 3-4 m/s dan 4-5 m/s, tetapi pada saat kecepatan angin 5-6 m/s rata-rata nilai  $C_p$  untuk kedua turbin hampir sama.

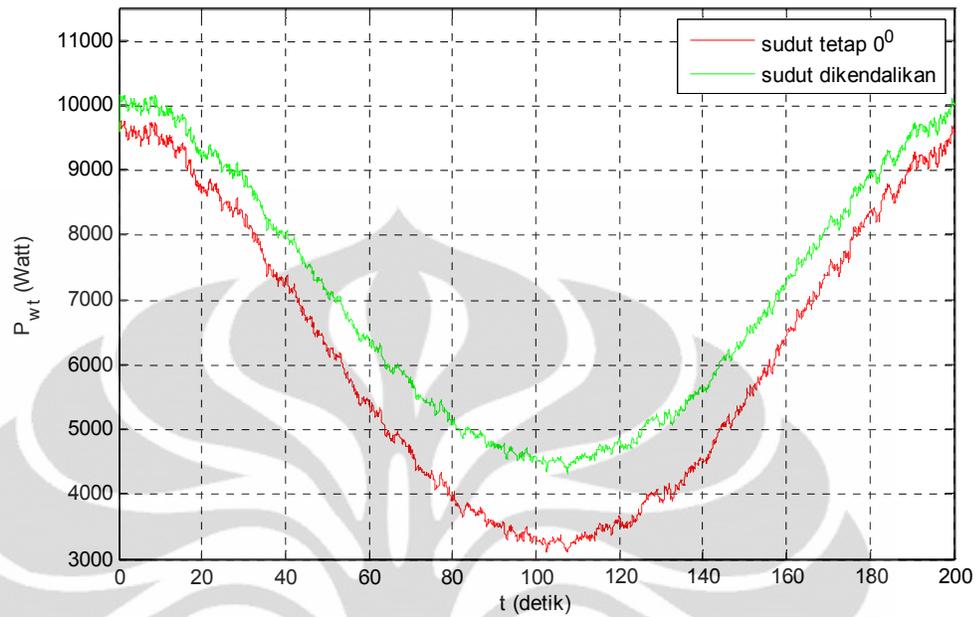
### 5.1.3 Daya Turbin



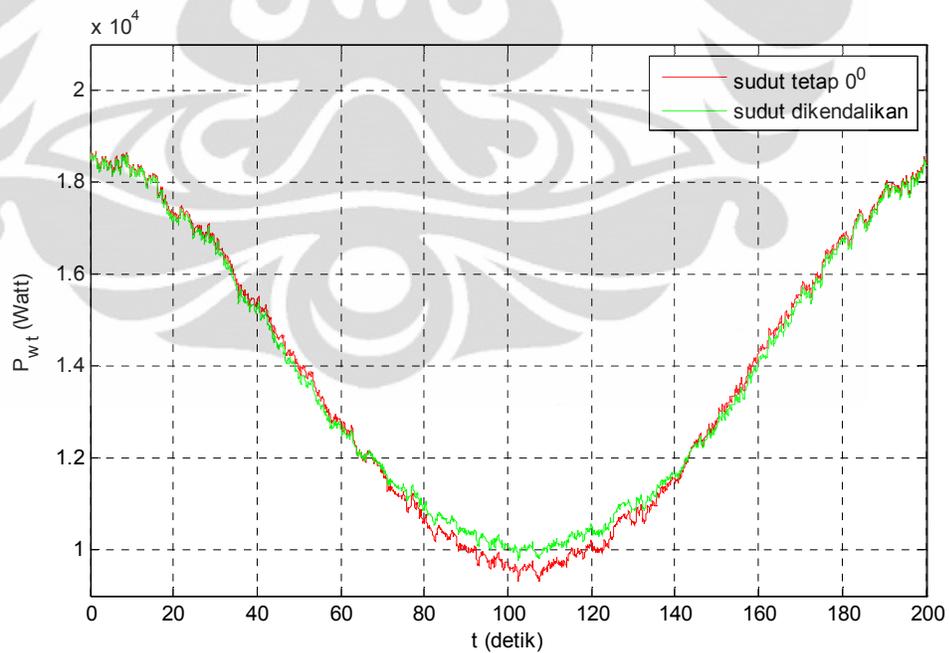
Gambar 5.7. Perbandingan daya turbin antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s

Pada 5.7-5.9, terlihat bahwa turbin angin yang sudutnya dikendalikan, memiliki daya aerodinamik yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin yang sudut *blade*-nya tetap saat kecepatan angin 3-4 dan 4-5 m/s, sementara pada saat kecepatan angin 5-6 m/s nilai rata-rata daya turbin hampir sama untuk keduanya.

Nilai daya turbin sebanding dengan  $C_p$ . Karena daya angin yang diterima oleh kedua turbin sama. Maka turbin angin yang  $C_p$ -nya lebih besar, akan memiliki daya turbin yang lebih besar pula.

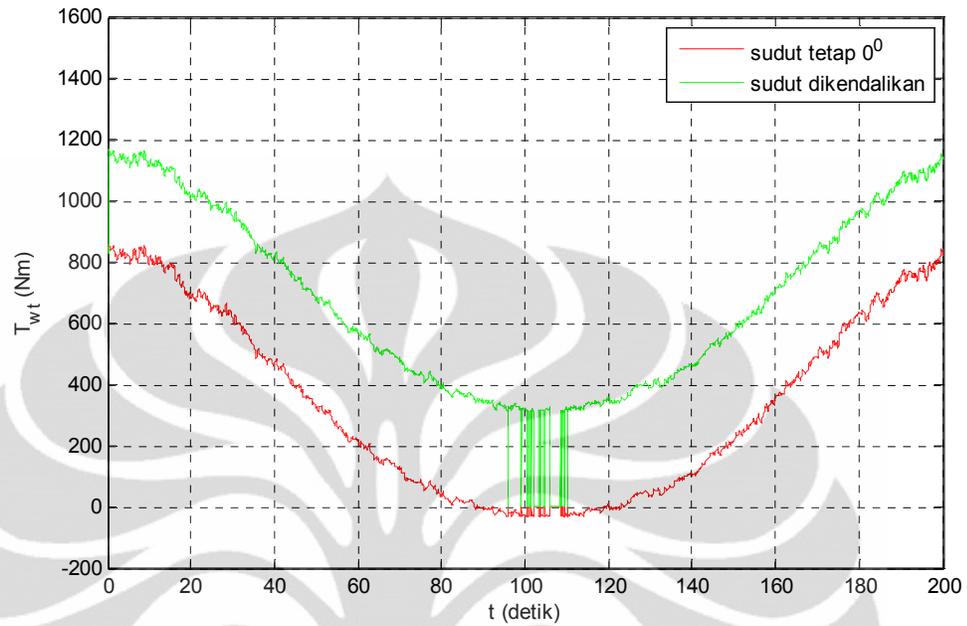


Gambar 5.8. Perbandingan daya turbin antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^0$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s

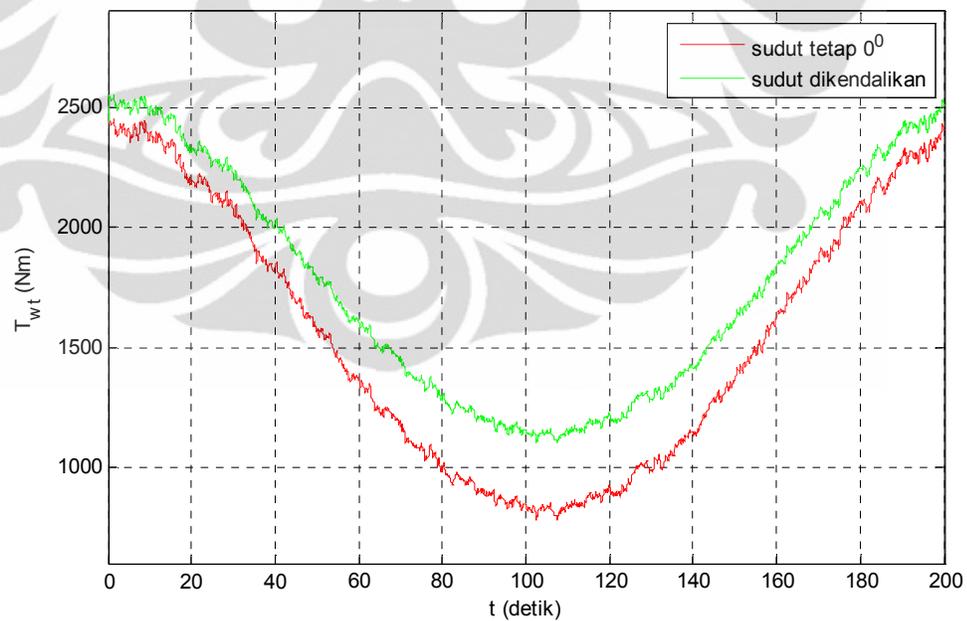


Gambar 5.9. Perbandingan daya turbin antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^0$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s

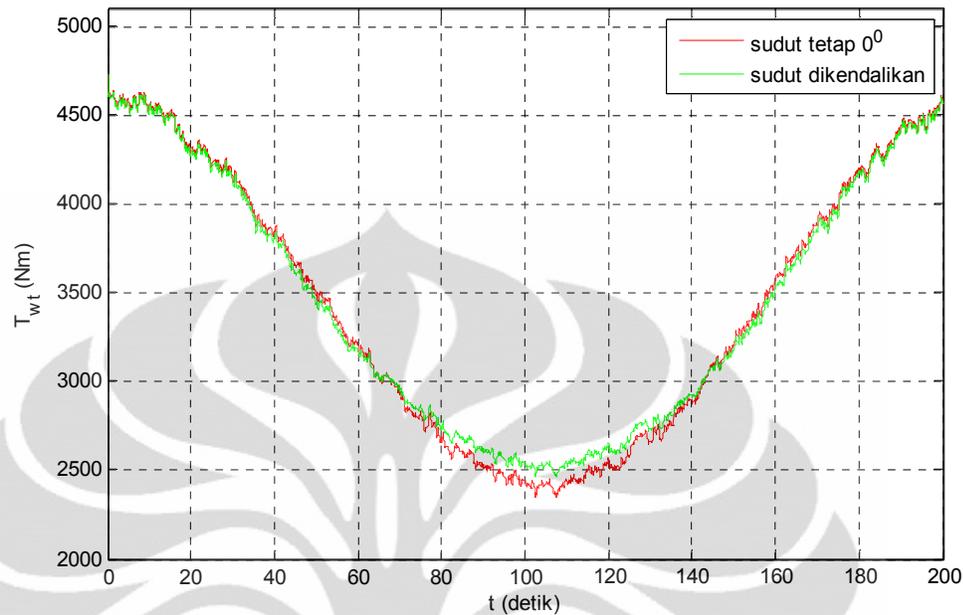
### 5.1.4 Torsi Turbin Angin



Gambar 5.10. Perbandingan torsi turbin antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s



Gambar 5.11. Perbandingan torsi turbin antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s

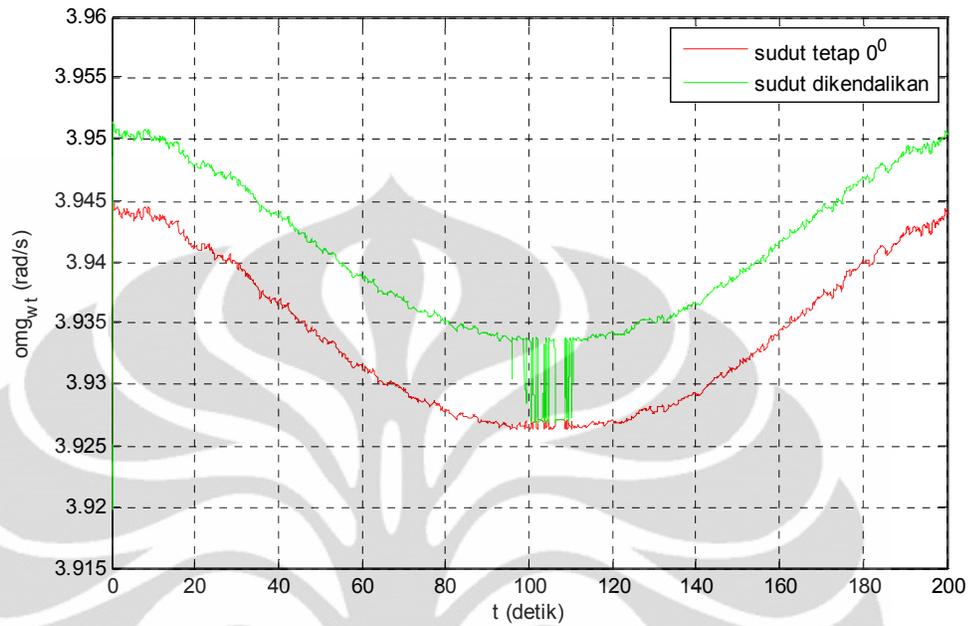


Gambar 5.12. Perbandingan torsi turbin antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^{\circ}$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s

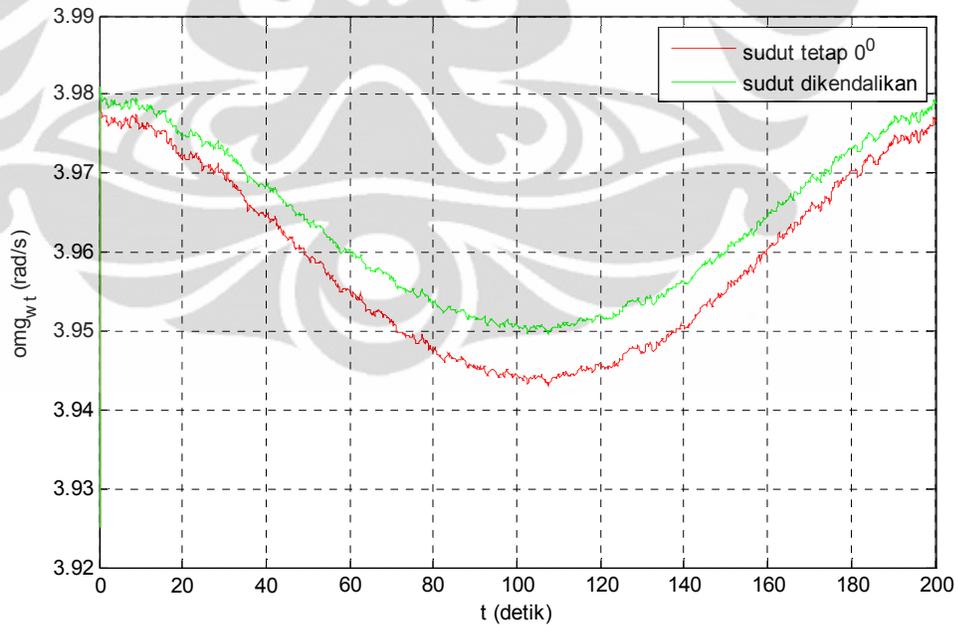
Pada Gambar 5.10-5.12, terlihat bahwa torsi turbin untuk turbin angin yang sudutnya dikendalikan lebih besar apabila dibandingkan dengan turbin angin yang sudutnya tetap untuk kecepatan angin 3-4 dan 4-5 m/s, sementara untuk kecepatan angin 5-6 m/s, nilai rata-rata torsi hampir sama untuk keduanya.

Nilai torsi turbin adalah hasil dari daya turbin dibagi dengan kecepatan turbin, sehingga turbin angin yang memiliki daya turbin lebih besar, kemungkinan torsi turbinnya lebih besar pula, jika kecepatan putar turbin tidak berbeda jauh.

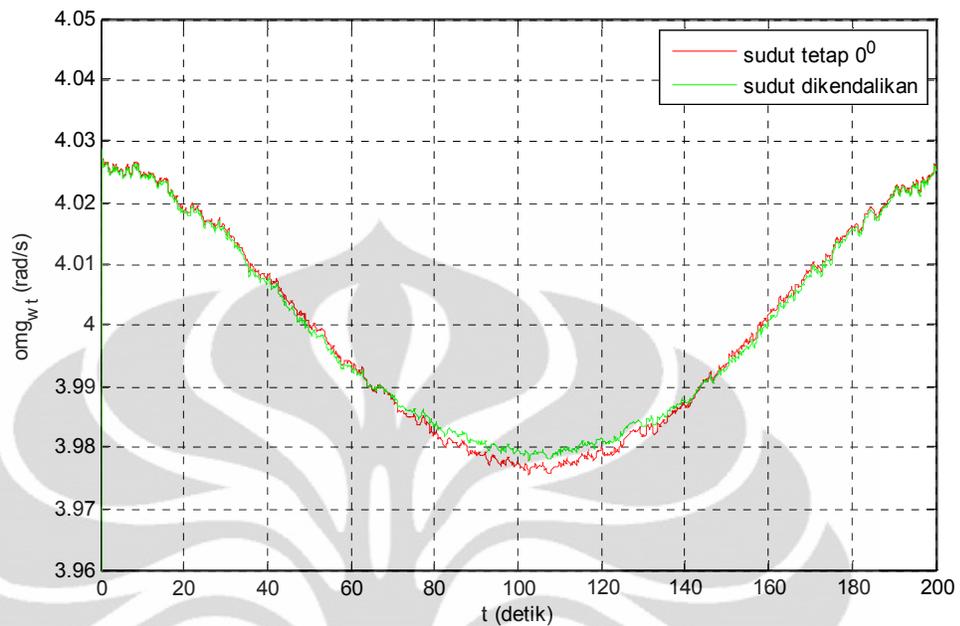
### 5.1.5 Kecepatan Putar Turbin



Gambar 5.13. Perbandingan kecepatan putar turbin antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s



Gambar 5.14. Perbandingan kecepatan putar turbin antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s

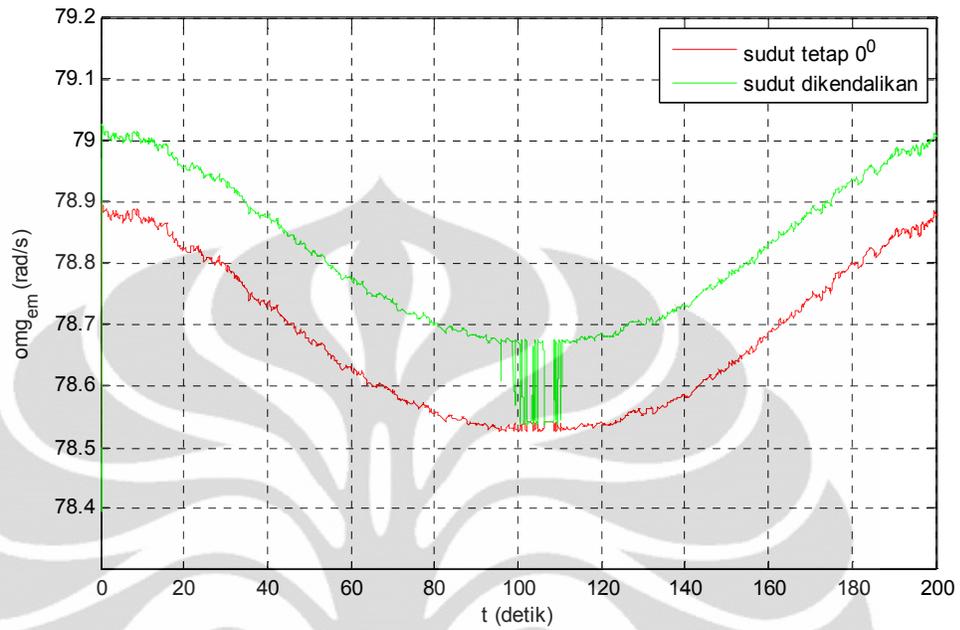


Gambar 5.15. Perbandingan kecepatan putar turbin antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^0$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s

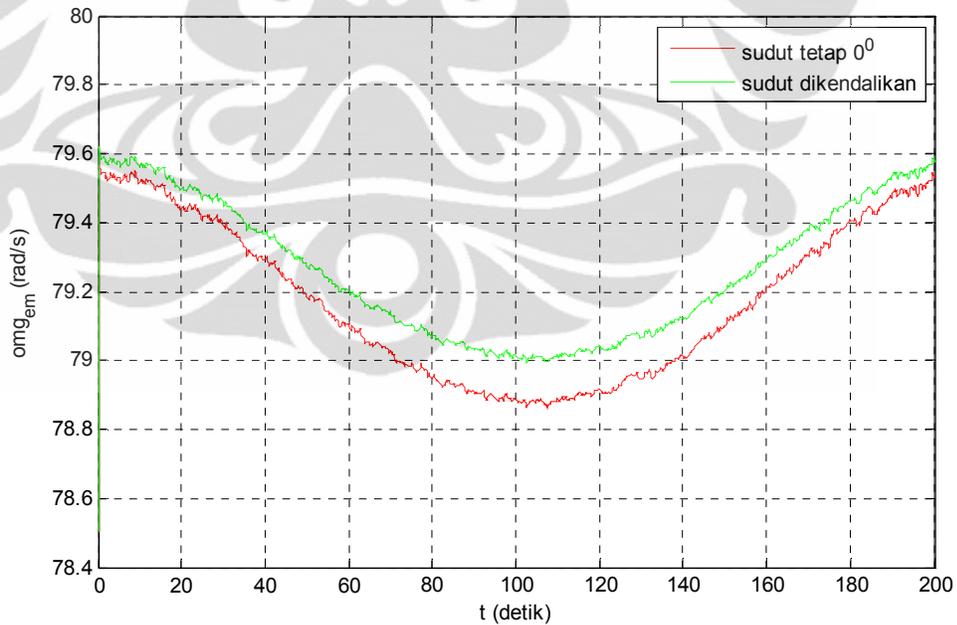
Pada grafik diatas, terlihat bahwa kecepatan putar turbin yang sudut *blade*-nya dikendalikan, memiliki kecepatan putar turbin yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin yang sudut *blade*-nya tetap untuk kecepatan angin 3-4 dan 4-5 m/s, sementara untuk kecepatan angin 5-6 m/s, nilai rata-rata kecepatan hampir sama untuk keduanya.

Nilai kecepatan putar bergantung pada resultan torsi turbin angin dan torsi generator. Turbin angin yang sudut *blade*-nya dikendalikan, memiliki torsi turbin yang lebih besar, sehingga kecepatan putar turbin pun lebih besar.

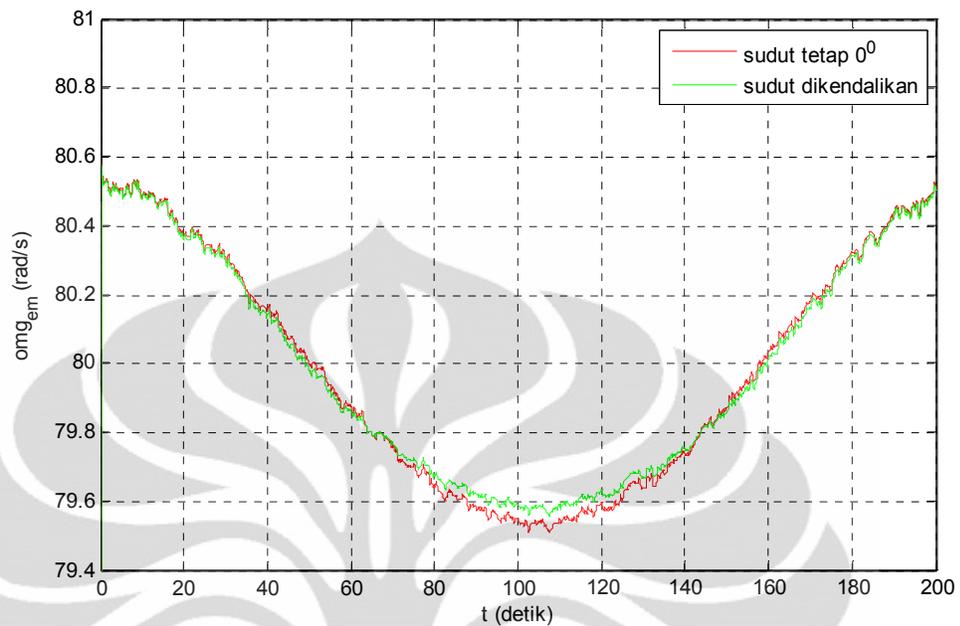
### 5.1.6 Kecepatan Putar Generator



Gambar 5.16. Perbandingan kecepatan putar generator antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s



Gambar 5.17. Perbandingan kecepatan putar generator antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s

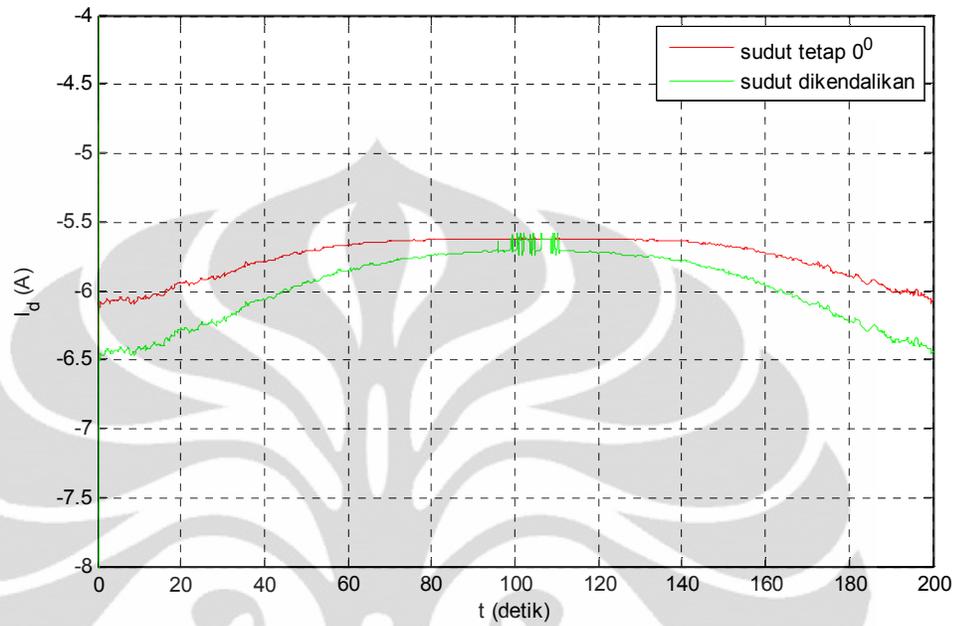


Gambar 5.18. Perbandingan kecepatan putar generator antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^{\circ}$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s

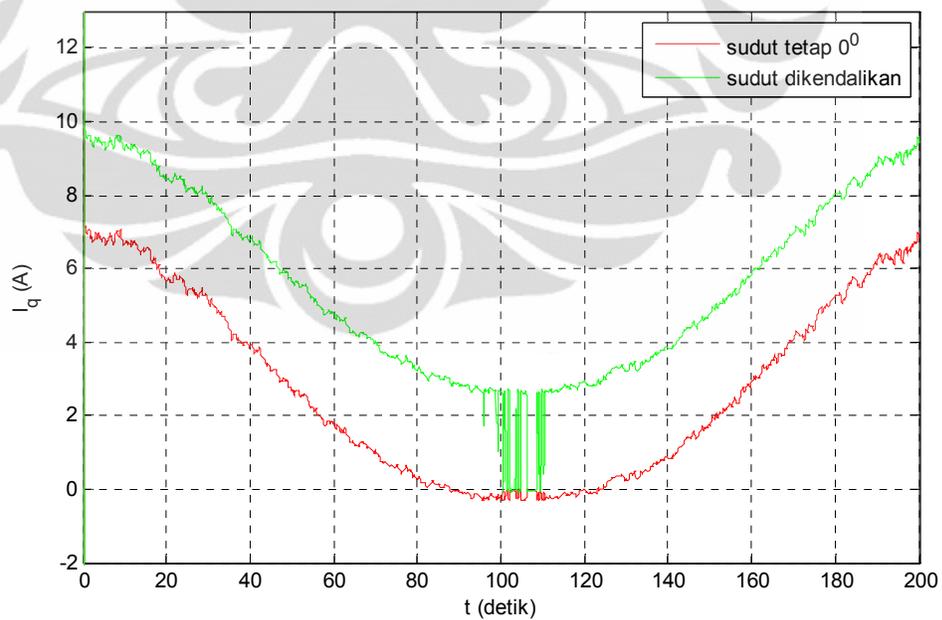
Dari grafik diatas, terlihat bahwa kecepatan putar generator untuk PLTB yang sudut *blade*-nya dikendalikan lebih besar jika dibandingkan dengan PLTB yang sudut *blade*-nya tetap untuk kecepatan angin 3-4 dan 4-5 m/s, sementara untuk kecepatan angin 5-6 m/s, nilai rata-rata kecepatan hampir sama untuk keduanya.

Nilai kecepatan putar generator adalah nilai kecepatan putar turbin dikali dengan rasio gearbox yang digunakan. Pada simulasi ini, digunakan rasio gearbox sebesar 20. Maka kecepatan putar generator adalah 20 kali kecepatan turbin.

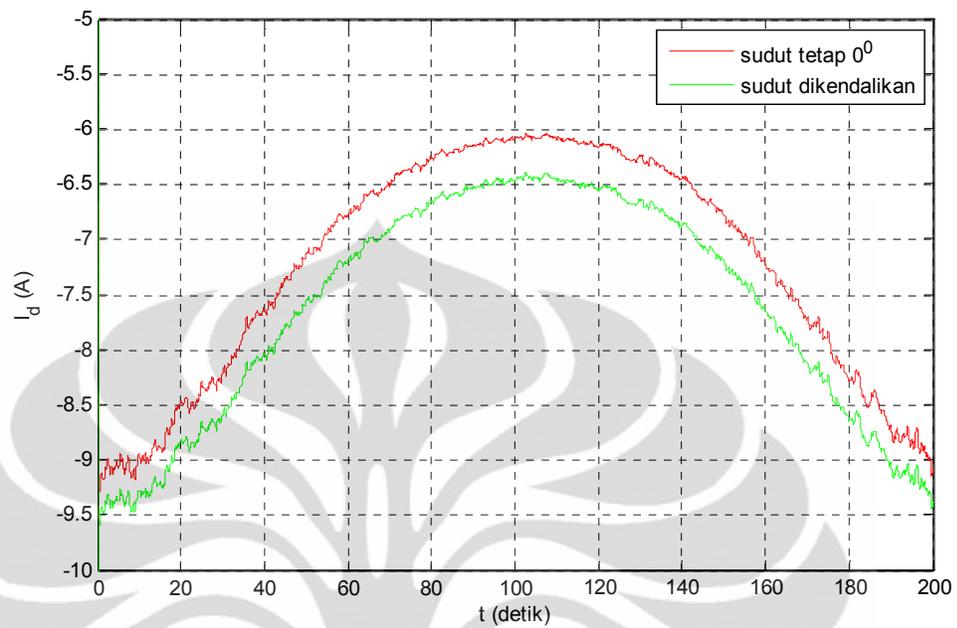
### 5.1.7 Arus Pada Generator



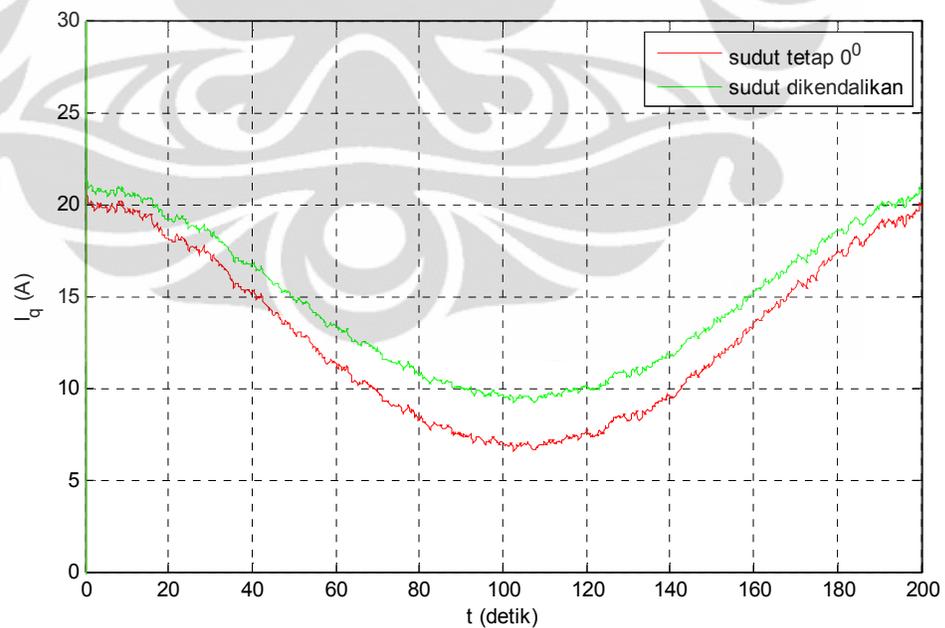
Gambar 5.19. Perbandingan Arus stator pada sumbu d antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^0$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s



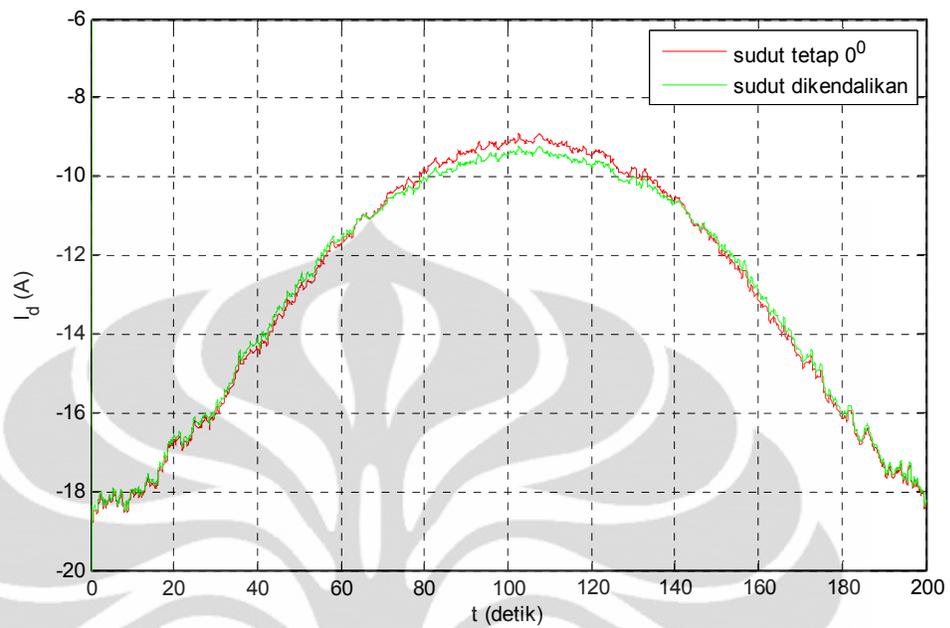
Gambar 5.20. Perbandingan Arus stator pada sumbu q antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^0$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s



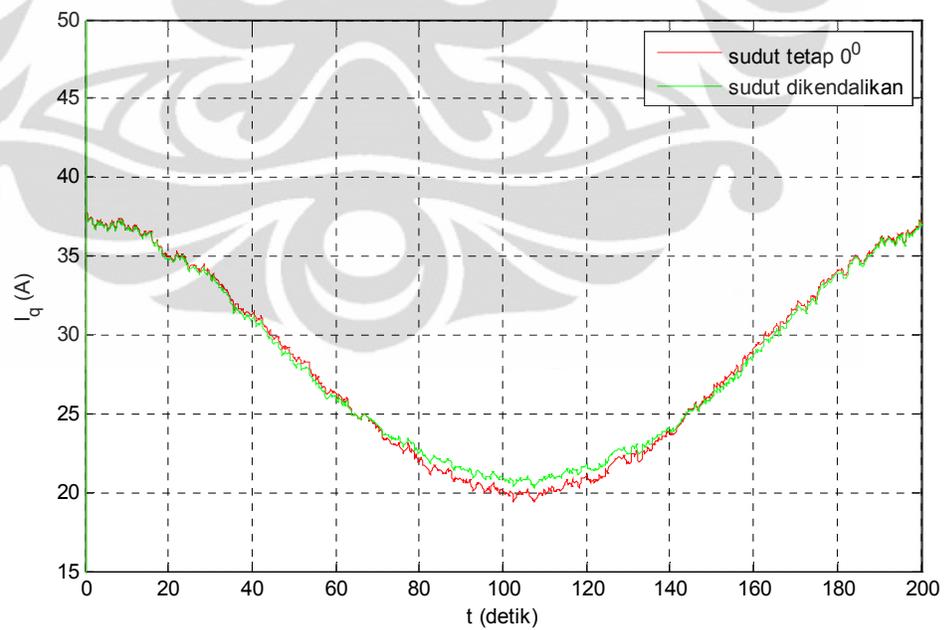
Gambar 5.21. Perbandingan Arus stator pada sumbu d antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^{\circ}$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s



Gambar 5.22. Perbandingan Arus stator pada sumbu q antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^{\circ}$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s



Gambar 5.23. Grafik arus keluaran PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^0$ ) dan kecepatan angin 5-6 m/s

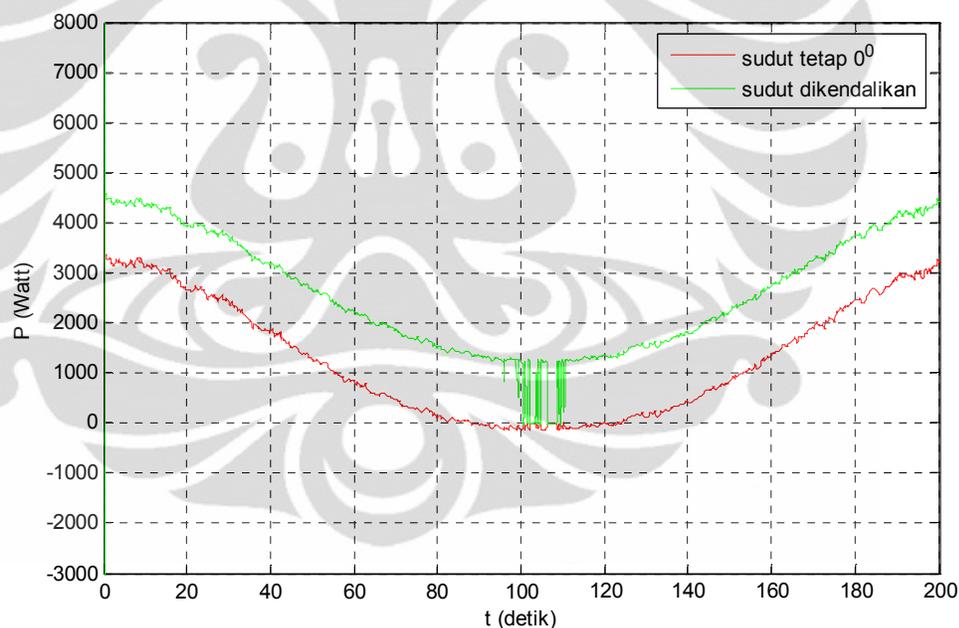


Gambar 5.24. Grafik arus keluaran PLTB dengan sudut *blade* dikendalikan dan kecepatan angin 5-6 m/s

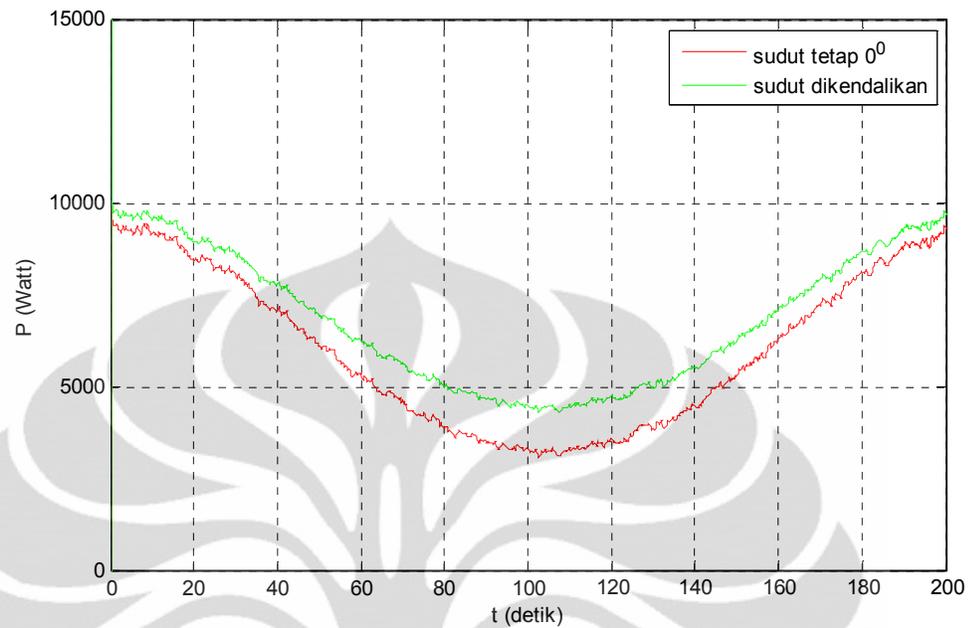
Dari grafik arus listrik diatas, terlihat bahwa nilai arus untuk PLTB yang sudut *blade*-nya dikendalikan lebih besar bila dibandingkan dengan PLTB yang sudut *blade*-nya tetap untuk kecepatan angin 3-4 dan 4-5 m/s, sementara untuk kecepatan angin 5-6 m/s, nilai rata-rata arus hampir sama untuk keduanya.

Nilai arus stator akan berbanding lurus dengan kecepatan putar generator selama kecepatan putar generator tidak mencapai *breakdown*. Sehingga PLTB yang memiliki kecepatan putar generator lebih cepat akan memiliki arus keluaran yang lebih besar pula.

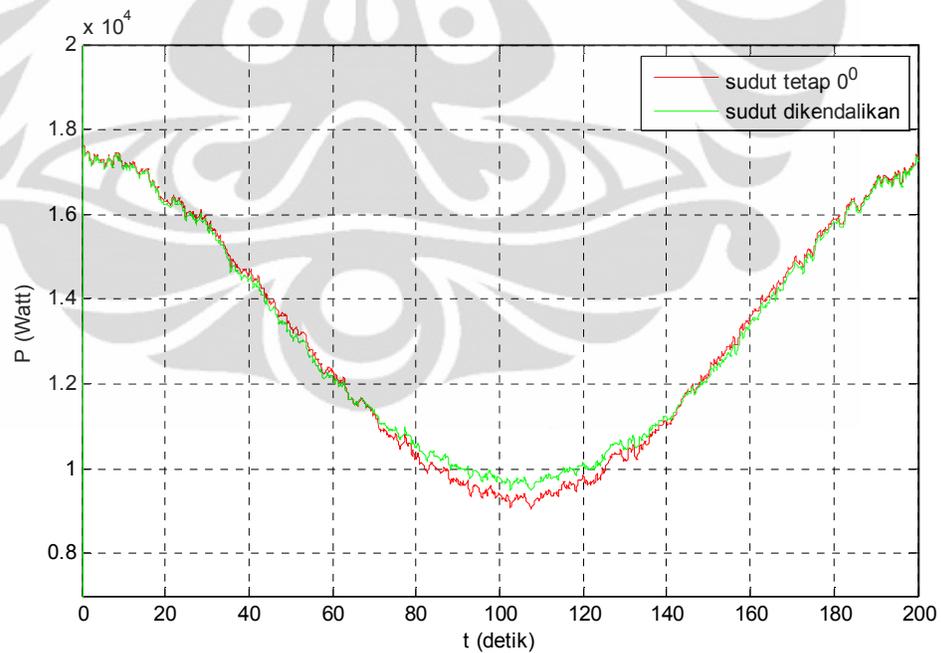
### 5.1.8 Daya Listrik Aktif dan Reaktif



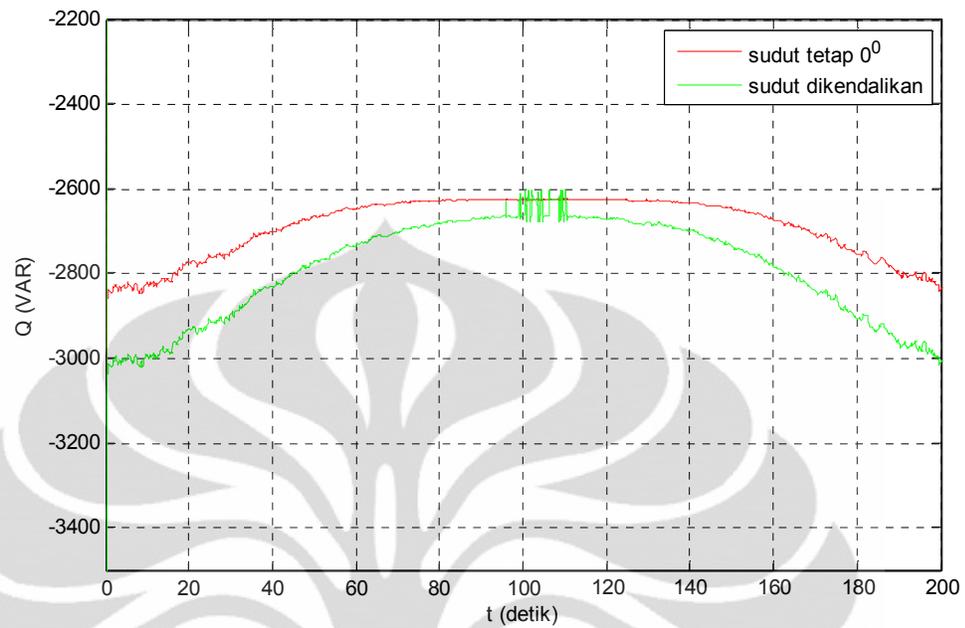
Gambar 5.25. Perbandingan daya listrik aktif generator antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s



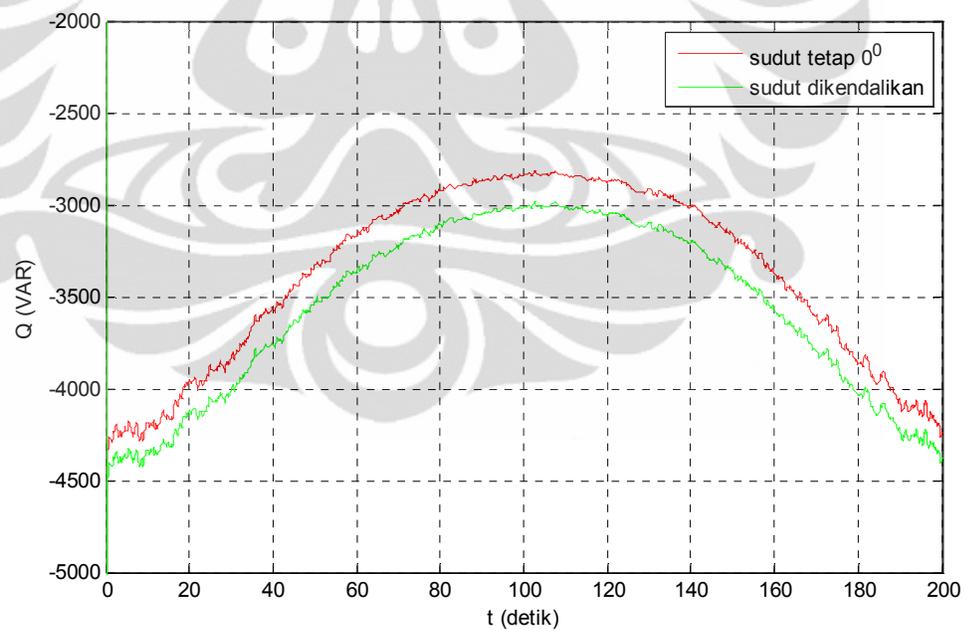
Gambar 5.26. Perbandingan daya listrik aktif generator antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^{\circ}$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s



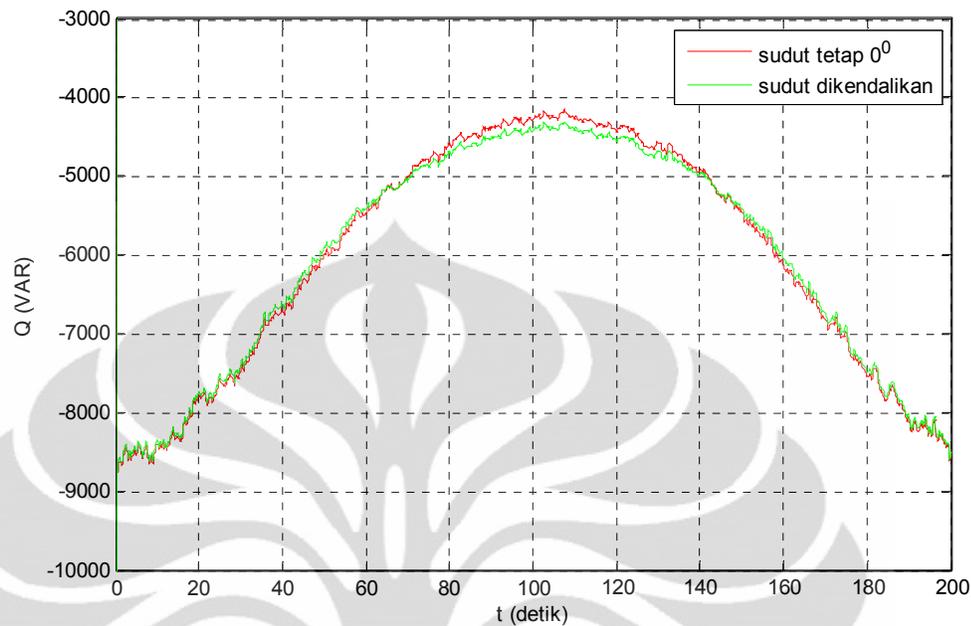
Gambar 5.27. Perbandingan daya listrik aktif generator antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^{\circ}$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s



Gambar 5.28. Perbandingan daya listrik reaktif antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^0$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s



Gambar 5.29. Perbandingan daya listrik reaktif antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^0$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s

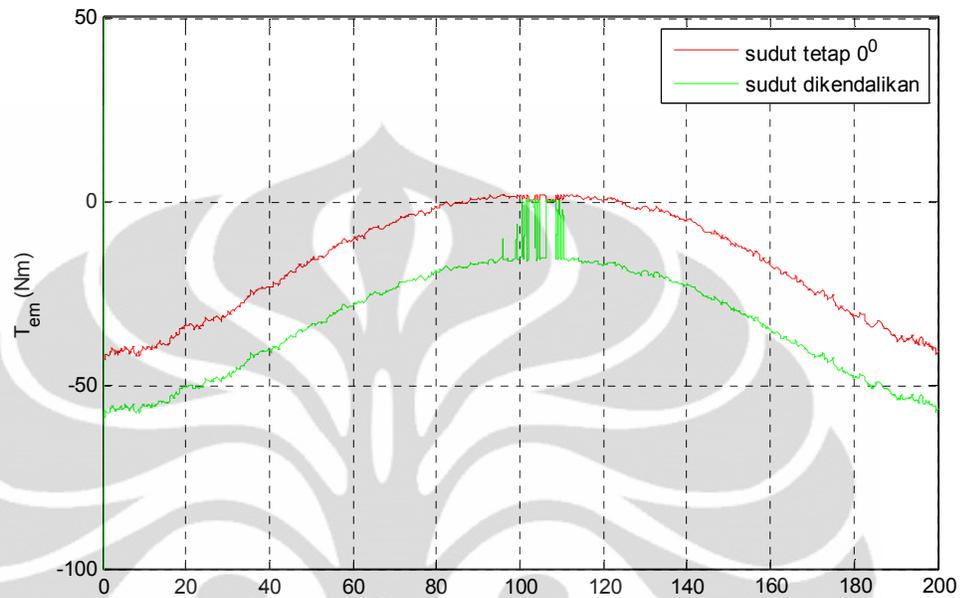


Gambar 5.30. Perbandingan daya listrik reaktif antara PLTB dengan sudut *blade* tetap ( $0^{\circ}$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s

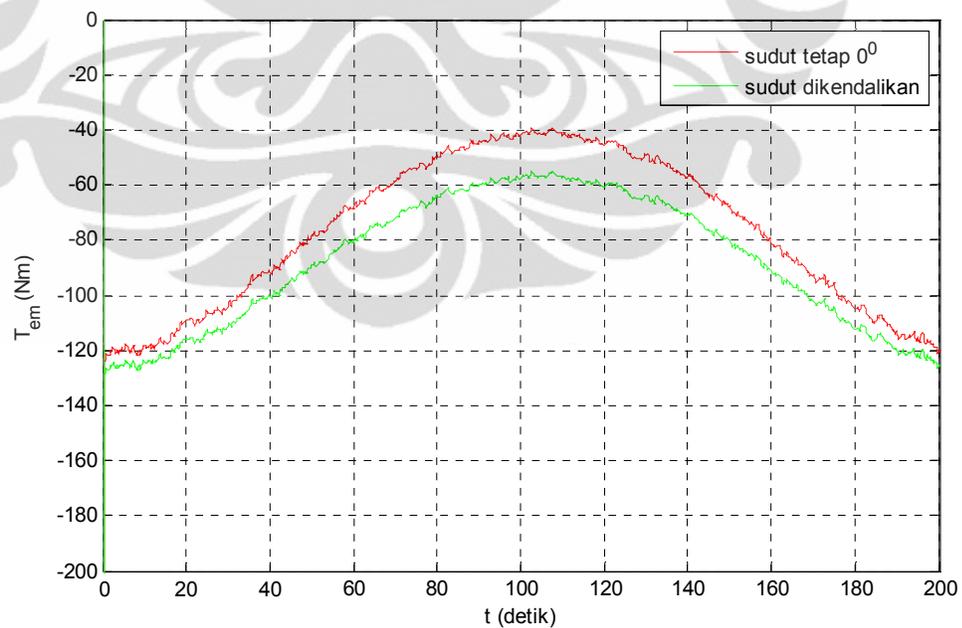
Dari grafik diatas, terlihat bahwa daya aktif dan reaktif untuk PLTB yang sudut *blade*-nya dikendalikan lebih besar apabila dibandingkan dengan PLTB yang sudut *blade*-nya tetap untuk kecepatan angin 3-4 dan 4-5 m/s, sementara untuk kecepatan angin 5-6 m/s, nilai rata-rata daya hampir sama untuk keduanya.

Dari grafik juga terlihat bahwa nilai daya reaktif cukup besar sehingga menyebabkan kualitas daya menurun. Hal ini disebabkan oleh nilai induktansi yang besar pada generator induksi.

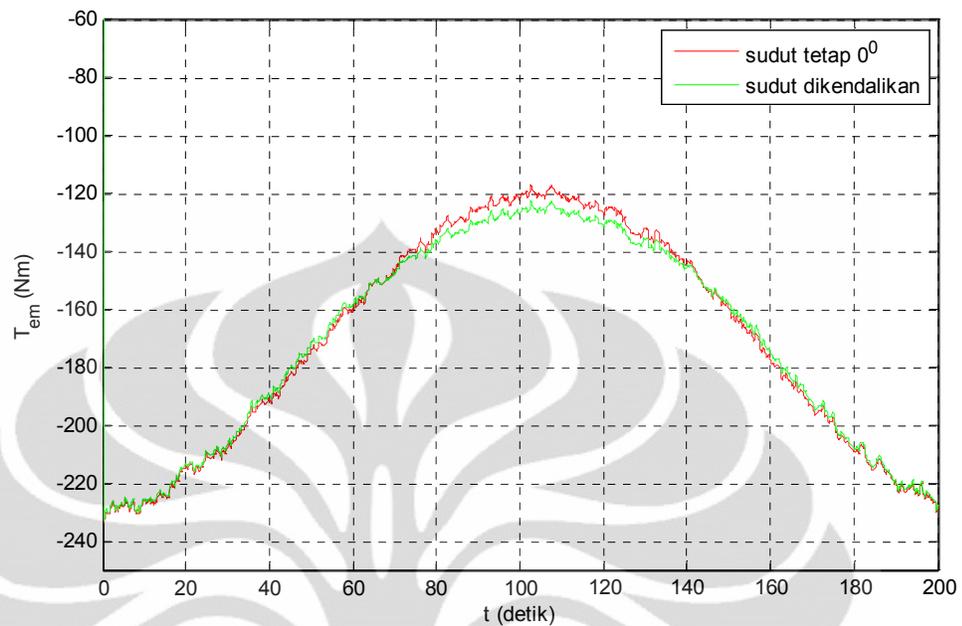
### 5.1.7 Torsi Elektromagnetik



Gambar 5.31. Perbandingan torsi elektromagnetik antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 3-4 m/s



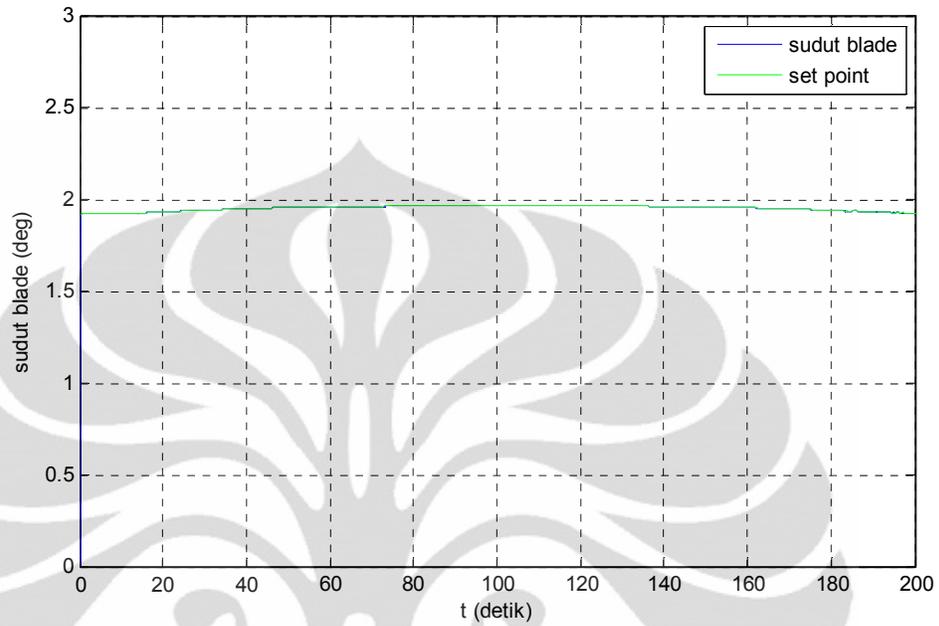
Gambar 5.32. Perbandingan torsi elektromagnetik antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 4-5 m/s



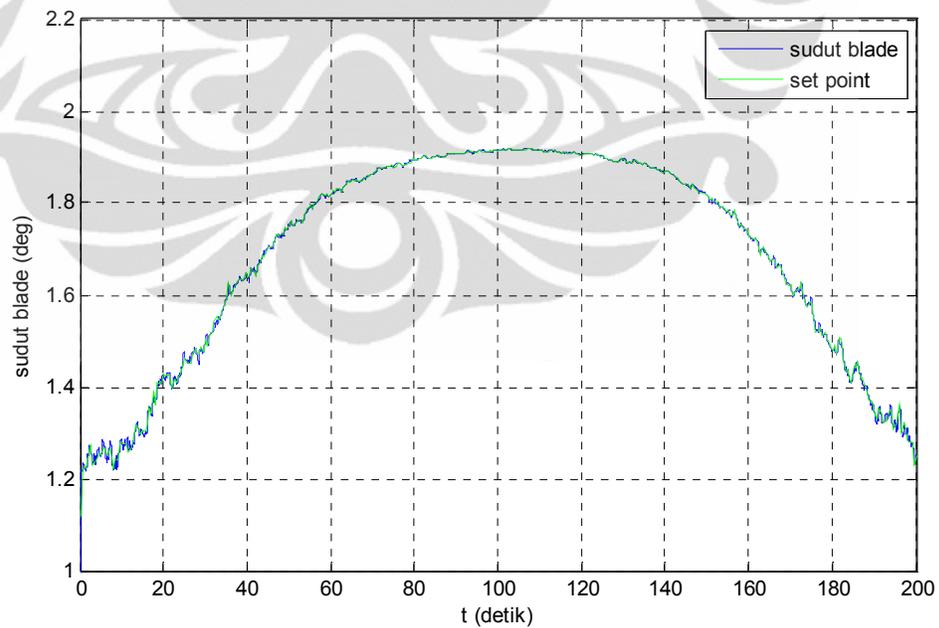
Gambar 5.33. Perbandingan torsi elektromagnetik antara turbin angin dengan sudut *blade* tetap ( $0^\circ$ ) dengan sudut *blade* dikendalikan saat kecepatan angin 5-6 m/s

Dari grafik diatas, terlihat bahwa nilai absolute dari torsi elektromagnetik pada system PLTB yang sudut *blade*-nya dikendalikan lebih besar dibandingkan dengan PLTB yang sudut *blade*-nya tetap. Hal ini disebabkan oleh kecepatan putar generator yang lebih besar. Dan torsi generator belum mencapai *breakdown*.

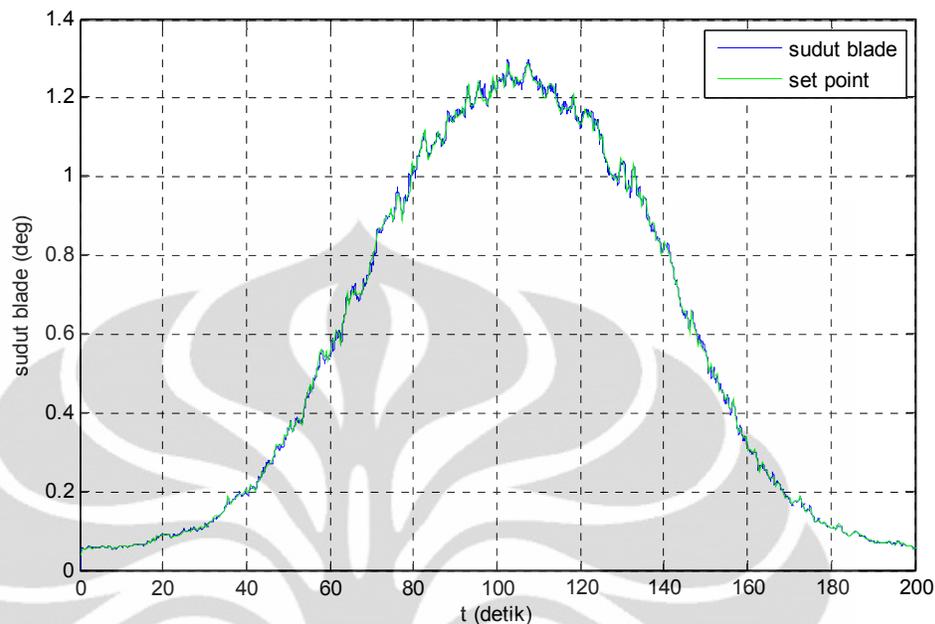
### 5.1.8 Sudut *Blade*



Gambar 5.34. Besar sudut *blade* yang diatur menggunakan pengendali JST pada kecepatan angin 3-4 m/s



Gambar 5.35. Besar sudut *blade* yang diatur menggunakan pengendali JST pada kecepatan angin 4-5 m/s



Gambar 5.36. Besar sudut *blade* yang diatur menggunakan pengendali JST pada kecepatan angin 5-6 m/s

Dari gambar diatas, terlihat bahwa *set point* untuk sudut *blade* pada turbin angin berubah sesuai dengan kondisi angin. Dari *set point* yang diberikan, *blade* bergerak sesuai dengan *set point* dengan respon yang sangat cepat, sehingga tercapai kondisi sudut *blade* yang sama dengan *set point* pada setiap waktu.

## 5.2 Analisa Hasil

### 5.2.1 Analisa Hasil Secara Umum

Dari hasil yang didapatkan, terlihat bahwa setelah menggunakan jaringan syaraf tiruan untuk mengendalikan sudut *blade* pada PLTB, didapatkan efisiensi energi yang lebih optimal dibandingkan dengan PLTB yang sudut *blade*-nya tetap.

Pada simulasi yang ketiga, nilai efisiensi PLTB yang sudut *blade*-nya dikendalikan tidak selalu lebih besar dibandingkan dengan PLTB yang sudut *blade*-nya tetap. Hal ini diakibatkan oleh pencapaian JST yang masih memiliki kekurangan yang dapat dilihat pada gambar 4.7. Dari gambar tersebut, terlihat saat

target sudut memiliki nilai  $0^0$ , nilai keluaran dari JST tidak tepat  $0^0$ . Oleh karena itu, pada saat terjadi kondisi yang mengharuskan sudut *blade* bernilai  $0^0$  agar efisiensinya optimal, JST tidak memberikan sudut  $0^0$  sebagai set point, sehingga pada saat tersebut, PLTB yang sudut *blade*-nya tetap  $0^0$ , akan memiliki efisiensi yang lebih besar.

Pada semua hasil eksperimen, terlihat bahwa daya keluaran memiliki hasil yang naik-turun. Hal ini diakibatkan oleh kecepatan angin yang tidak stabil. Pada aplikasi PLTB yang sesungguhnya harus dilakukan pengendalian kecepatan putar generator agar menghasilkan daya keluaran yang sesuai dengan beban yang ada.

Dari semua hasil eksperimen, terlihat bahwa hasil daya listrik reaktif yang cukup besar. Hal ini berarti daya yang dihasilkan memiliki kualitas daya yang buruk. Untuk memperbaiki kualitas daya tersebut, diperlukan adanya kapasitor bank pada saluran transmisi dari generator menuju ke grid.

### 5.2.2 Analisa Kenaikan Efisiensi Energi

Efisiensi energi dapat dilihat dari grafik  $C_p$ . Dari grafik tersebut, terlihat bahwa efisiensi energi naik dari sebelum dikendalikan, tetapi efisiensi masih kurang dari efisiensi maksimal yaitu 0.43.

Efisiensi tidak mencapai hasil yang maksimal karena pada simulasi yang dijalankan, terjadi penurunan kecepatan angin yang cukup signifikan dan membuat nilai  $\lambda$  menjadi sangat tinggi. Contohnya pada pengambilan data pertama dengan kecepatan angin berkisar 3-4 m/s. Pada simulasi tersebut, ada kejadian saat kecepatan angin 3 m/s dan kecepatan putar turbin 3.9 rad/s. Bila dihitung, akan didapatkan nilai  $\lambda$ , sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\lambda &= R \Omega_{wt} / V \\ &= 10 \times 3.9 / 3 \\ &= 13\end{aligned}$$

dengan nilai  $\lambda=13$ , apabila dilihat dalam grafik hubungan antara  $\lambda$ ,  $\beta$ , dan  $C_p$  pada gambar 3.5, nilai  $C_p$  maksimal hanya sekitar 0.25 yang didapat apabila nilai  $\beta=2^0$ .

### 5.2.3 Analisa Berdasarkan Angin

Dari ketiga simulasi yang dilakukan, terlihat bahwa semakin besar angin, maka efisiensi daya turbin yang didapatkan semakin besar. Hal ini disebabkan oleh nilai angin yang digunakan pada simulasi disesuaikan dengan kondisi di Indonesia yang memiliki kecepatan angin yang sangat rendah. Sementara kecepatan optimal untuk turbin angin yang memiliki jari-jari 10 m adalah 10 m/s.

Dalam rentang kecepatan angin tersebut, daya turbin mampu memberikan kecepatan putar yang cukup kepada generator sehingga dapat memberikan supply daya. Kecepatan putar tersebut, tidak pernah mencapai kondisi *breakdown*, sehingga efisiensi daya pada generator akan terus naik seiring dengan bertambahnya kecepatan putar.

Apabila kecepatan angin yang disimulasikan melebihi kecepatan optimal maka semakin besar kecepatan angin, akan menyebabkan daya yang dihasilkan oleh turbin angin melebihi daya optimal. Daya turbin yang terlalu besar akan menyebabkan kecepatan putar pada generator terlalu besar dan melebihi batas *breakdown*. Sehingga daya listrik yang dihasilkan akan turun.

Dari simulasi yang telah dilakukan, apabila dihitung rata-rata daya yang didapatkan, maka akan didapatkan tabel sebagai berikut.

Kecepatan angin (m/s)	Daya Listrik (Watt)		Kenaikan Daya (Watt)
	Sudut <i>blade</i> tetap	Sudut <i>bladed</i> dikendalikan	
3-4	$1.2687 \times 10^3$	$2.5653 \times 10^3$	$1.2966 \times 10^3$
4-5	$5.9455 \times 10^3$	$6.7918 \times 10^3$	846.2522
5-6	$1.3023 \times 10^4$	$1.3069 \times 10^4$	46.3247

Tabel 5.1 Daya angin rata-rata pada setiap kecepatan angin

Dari tabel 5.1 terlihat bahwa semakin besar kecepatan angin, kenaikan daya yang didapatkan menjadi semakin kecil. Hal ini diakibatkan oleh nilai lamda pada kecepatan angin yang cukup tinggi akan mendekati nilai lamda optimum, sehingga tanpa melakukan pengendalian pun, efisiensi yang didapatkan sudah cukup besar.

#### 5.2.4 Analisa Kestabilan Sudut *Blade*

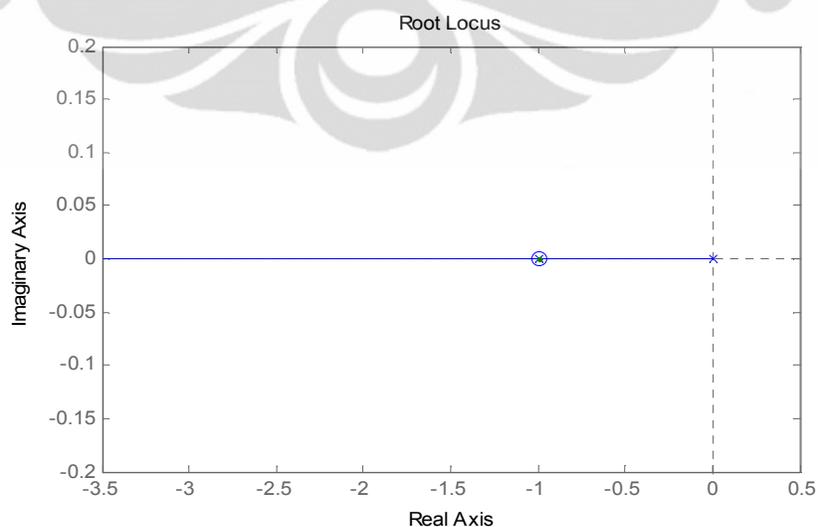
Kestabilan sudut *blade* dapat dianalisa menggunakan TKA. Blok diagram pada gambar 4.4, didapatkan persamaan loop terbuka pada sistem sudut *blade* sebagai berikut.

$$C(s).G(s) = \frac{15s + 15}{s^2 + s} \quad (5.1)$$

Sehingga didapatkan persamaan karakteristik sebagai berikut

$$1 + \frac{15s + 15}{s^2 + s} = 0 \quad (5.2)$$

Dan didapatkan gambar TKA sebagai berikut



Gambar 5.37. TKA untuk sistem penggerak sudut *blade*

Dari gambar TKA tersebut, terlihat bahwa berapapun gain yang ditambahkan terhadap system, system akan selalu stabil, karena TKA tidak pernah berada di sebelah kanan sumbu imajiner.



## **BAB 6**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **Kesimpulan dari tulisan ini adalah**

1. Pemodelan Sistem PLTB yang dibuat memberikan hasil yang cukup valid dengan menggunakan parameter-parameter yang sesuai dengan kondisi yang ada di Indonesia.
2. Pengendali yang dibuat dengan menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan dapat mengoptimalkan daya pada PLTB. Terbukti dari hasil simulasi yang diperoleh, efisiensi energi Turbin angin yang sudut *blade*-nya dikendalikan menggunakan JST lebih besar dibandingkan dengan Turbin Angin yang sudut *blade*-nya tetap.
3. Efisiensi energi masih kurang dari efisiensi maksimal turbin, disebabkan oleh nilai  $\lambda$  pada kondisi tertentu tidak memungkinkan untuk mencapai efisiensi maksimal.

#### **Saran untuk pengembangan ke depan**

1. Perlu dirancang simulasi koneksi PLTB dengan beban dan pengendalian kecepatan generator agar daya listrik yang dihasilkan sesuai dengan beban yang ada.
2. Dari hasil yang didapatkan, daya listrik reaktif lebih besar dari daya listrik aktif. Oleh karena itu, dibutuhkan kapasitor bank untuk memperbaiki factor daya yang diperoleh.

**DAFTAR ACUAN**

- [1] Iov Florin., Daniela HansenAnca., Sørensen Poul., Blaabjerg Frede. *Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink: General Overview and Description of the Models*. Aalborg University. 2004.
- [2] Primadusi Ungu. *Skripsi: Pengembangan Simulasi dan Uji Kinerja Pengendali PI Sistem Kendali Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*. Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia. 2010.
- [3] Munteanu Iulian., Bratcu Iuliana Antoneta., Cutululis-Antonio Nicolaos., Ceang Emil. *Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach*. Springer-Verlag London Limited. 2008.
- [4] A. Perdana, O. Carlson, J. Persson: Dynamic Response of Grid-Connected Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator during Disturbances. Workshop on Power and Industrial Electronics. Trondheim. 2004.
- [5] Sarangapani, Jagannathan. *Neural Network Control of Nonlinear Discrete-Time Systems*. Taylor and Francis Group. 2006.
- [6] Salman, S.K., Badrzadeh, Babak. *New Approach for modelling Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) for grid-connection studies*. The Robert Gordon University.
- [7] Barakati, S.M., Aplevich, J.D., Kazerani, M. *Design of a State-Feedback Controller and Optimal Observer for a Wind Turbine System Including a Matrix Converter*. IEEE. 2008

**DAFTAR PUSTAKA**

Ong, CM. *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink*;  
Prentice Hall, 1998.



