

**STUDI PENGARUH MASUKNYA PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA ANGIN DI KABUPATEN BULUKUMBA KE SISTEM  
SULSEL DENGAN MEMANFAATKAN SOFTWARE  
DIGSILENT**



**TUGAS AKHIR**

*Sebagai salah satu syarat untuk  
Mencapai Gelar Sarjana Teknik dari  
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin*

**Oleh :**

**ARYANTO**  
**D411 08 333**

**AZHAR**  
**D411 08 347**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2013**

**STUDI PENGARUH MASUKNYA PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA ANGIN DI KABUPATEN BULUKUMBA KE SISTEM  
SULSEL DENGAN MEMANFAATKAN SOFTWARE  
DIGSILENT**



**TUGAS AKHIR**

*Sebagai salah satu syarat untuk  
Mencapai Gelar Sarjana Teknik dari  
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin*

**Oleh :**

**ARYANTO**

**D411 08 333**

**AZHAR**

**D411 08 347**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2013**

## **LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR**

**STUDI PENGARUH MASUKNYA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN DI KABUPATEN  
BULUKUMBA KE SISTEM SULSEL DENGAN MEMANFAATKAN SOFTWARE DIGSILENT**

### **TUGAS AKHIR**

Diterima dan disahkan sebagai kolokium  
untuk memenuhi persyaratan guna mencapai  
Sarjana Teknik Sub Program Studi  
Teknik Energi Listrik  
dari  
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin

Oleh

**ARYANTO**

**D411 08 333**

**AZHAR**

**D411 08 347**

Disetujui:  
30 Januari 2013  
Pembimbing Tugas Akhir

Pembimbing I

Pembimbing II

**Ir. Tajuddin Waris, MT**

**NIP. 19650424 199203 1 003**

**Ikhlas Kitta, ST., MT**

**NIP. 19760914 200801 1 006**

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

**Dr. Ir. Andani Achmad, MT**  
**NIP. 19601231 198703 1 022**

## **ABSTRAK**

*Sistem interkoneksi antar pembangkit dalam sebuah sistem memungkinkan tiap-tiap pembangkit dalam satu sistem tersebut saling bekerjasama menjaga kontinuitas ketersediaan tenaga listrik ke beban. Ketika ada pembangkit yang rusak, maka pembangkit lain yang terinterkoneksi tetap dapat bekerja menyuplai listrik ke beban. Sistem ini juga dapat membantu meringankan kerja suatu pusat pembangkitan listrik karena beban yang ada dapat ditanggung oleh banyak pembangkit yang terinterkoneksi.*

*Suatu sistem tenaga listrik yang baik adalah ketika sistem tersebut selain dapat menyuplai beban secara terus menerus tetapi juga dapat menyuplai listrik ke beban dengan tegangan dan frekuensi yang konstan. Selain itu, sistem tersebut harus stabil terhadap gangguan dan dapat kembali ke kondisi normal secara cepat setelah terjadi gangguan.*

*Pada tugas akhir ini, disimulasikan adanya penambahan pembangkit listrik tenaga angin dengan kapasitas 30X200KW di Kabupaten Bulukumba yang terhubung secara interkoneksi ke sistem SULSEL. Software yang digunakan untuk simulasi sistem dalam tugas akhir ini adalah software DIgSILENT. Dari simulasi diperoleh hasil bahwa setelah adanya penambahan pembangkit listrik tenaga angin di Kabupaten Bulukumba ke sistem SULSEL, aliran daya sistem dan kestabilan transien tetap stabil.*

## **KATA PENGANTAR**

**Puji Syukur kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya tugas akhir ini dapat kami selesaikan dengan sebaik-baiknya. Dalam penyusunan tugas akhir ini, kami sadari terdapat banyak hambatan dan rintangan yang harus kami lalui. Namun berkat bantuan dan kerjasama berbagai pihak, akhirnya kami dapat mengatasi hambatan dan rintangan tersebut. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis dengan tulus mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya**

**kepada :**

1. Orang tua dan saudara-saudara kami tercinta, serta seluruh keluarga atas segala doa, bantuan, nasehat, dan motivasinya.
2. Bapak DR. Ir. H. Andani Achmad, MT sebagai Ketua Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Ir. Tajuddin Waris, MT dan Bapak Ikhlas Kitta, ST., MT sebagai Pembimbing I dan Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, petunjuk, dan saran selama kami menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Indra Jaya, MT sebagai Ketua Sub Program Studi Teknik Energi Listrik Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Seluruh dosen dan staf pengajar, serta pegawai Jurusan Teknik Elektro atas segala ilmu, bantuan, dan kemudahan yang diberikan selama kami menempuh proses perkuliahan.
6. Teman-teman SPYWARE 08 dan seluruh sahabat atas bantuan dan kerjasamanya selama ini.

7. Seluruh pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu-persatu yang telah membantu dan mendukung kami dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Akhirnya, dengan segala kerendahan hati kami menyadari bahwa kami hanyalah manusia biasa yang tidak luput dari kesalahan dalam penyusunan tugas akhir ini. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat kami harapkan agar kami dapat berkarya lebih baik lagi di masa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini membawa manfaat bagi pembacanya.

Makassar, Februari 2013

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah .....	5
1.5 Metode Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan Tugas Akhir.....	6
<b>BAB II TEORI PENUNJANG</b>	
2.1 Pengenalan Perangkat Lunak ( <i>Software</i> ) DIGSILENT PowerFactory.....	8
2.2 Sumber Energi Terbarukan.....	9
2.3 Pemanfaatan Angin sebagai Sumber Energi.....	10

2.3.1	Massa Jenis Udara.....	12
2.3.2	Modus dan Kecepatan Angin Rata-rata.....	13
2.3.3	Daya yang Dihasilkan oleh Energi Angin.....	14
2.3.4	Sistem Operasi Turbin Angin.....	15
2.3.5	Efisiensi Turbin.....	16
2.3.6	Pembangkit Listrik Tenaga Angin.....	17
2.4	Sistem Tenaga Listrik.....	20
2.5	Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik.....	21
2.6	Stabilitas Sistem Tenaga Listrik.....	23
2.6.1	Kestabilan Keadaan Tetap.....	24
2.6.2	Kestabilan Dinamis.....	24
2.6.3	Kestabilan Peralihan.....	25
2.7	Persamaan Ayunan ( <i>Swing Equation</i> ).....	27
2.8	Sudut Daya dan Daya Elektris.....	31
2.9	Mesin Induksi.....	34
2.9.1	Motor Induksi.....	34
2.9.2	Aplikasi Generator Induksi pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin.....	39
2.9.3	Pemasangan Kapasitor.....	39

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

3.1	Lokasi Penelitian.....	41
3.2	Waktu Penelitian.....	41
3.3	Prosedur Pengambilan Data.....	41
3.4	Sistem Interkoneksi SULSEL.....	42
3.5	Pemodelan Sistem Interkoneksi.....	43
3.6	Analisis Data.....	45
3.7	Diagram Alir Program.....	45

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1	Data Sistem.....	51
4.1.1	Data Sistem Interkoneksi SULSELBAR.....	51
4.1.2	Data Sistem <i>Wind Turbine</i> .....	57
4.2.	Aplikasi DIgSILENT PowerFactory.....	63
4.3.	Hasil Simulasi.....	72
4.3.1	Perhitungan Aliran Daya ( <i>Load Flow Calculation</i> ).....	72
4.3.2	Analisa Kestabilan Transien.....	73
4.3.3	Analisa Daya Aktif dan Daya Reaktif pada Turbin Angin 30X200KW.....	79
4.4.	Analisa Hasil Simulasi.....	89

**BAB V PENUTUP**

5.1 Kesimpulan..... 92

5.2 Saran..... 93

**DAFTAR PUSTAKA..... 94**

**LAMPIRAN**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Grafik Penggunaan Tenaga Angin Dunia.....	11
Gambar 2.2	Komponen-Komponen PLTA Angin.....	17
Gambar 2.3	Turbin Angin Horizontal dan Turbin Angin Vertical.....	18
Gambar 2.4	Sistem Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik.....	22
Gambar 2.5	Sistem Dengan Mesin Tunggal.....	32
Gambar 2.6	Hubungan Sudut Daya Kondisi Normal.....	33
Gambar 2.7	Hubungan Sudut Daya Setelah Terjadi Gangguan.....	33
Gambar 2.8	Jenis Rotor Belitan.....	36
Gambar 2.9	Jenis Rotor Sangkar.....	36
Gambar 2.10	Jenis Stator Motor Induksi.....	37
Gambar 4.1	Cp Karakteristik Rotor.....	58
Gambar 4.2	Penginputan Data Karakteristik Turbin Angin di DIGSILENT.....	59
Gambar 4.3	Penginputan Data Karakteristik <i>Shaft Model</i> di DIGSILENT.....	60
Gambar 4.4	Penginputan Data Karakteristik <i>Pitch Control</i> di DIGSILENT.....	61
Gambar 4.5	Penginputan Data Karakteristik Generator di DIGSILENT.....	62

Gambar 4.6	Block Diagram dan <i>DPL Pitch Controller</i> .....	64
Gambar 4.7	Block Diagram dan <i>DPL Shaft Model</i> .....	65
Gambar 4.8	Block Diagram dan <i>DPL Turbine</i> .....	66
Gambar 4.9	Block Diagram <i>Wind Frame</i> .....	67
Gambar 4.10	<i>Single Line Diagram</i> Interkoneksi SULSELBAR dan Turbin Angin.....	68
Gambar 4.11	Menghitung <i>Load Flow</i> pada Aplikasi DIgSILENT.....	69
Gambar 4.12	Hasil Simulasi <i>Load Flow</i> pada Aplikasi DIgSILENT.....	70
Gambar 4.13	Aplikasi <i>Transient Stability</i> pada Aplikasi DIgSILENT.....	71
Gambar 4.14	Hasil Simulasi <i>Transient Stability</i> pada aplikasi DIgSILENT.....	71
Gambar 4.15	Grafik Sistem Interkoneksi SULSELBAR Tanpa Masuknya Turbin Angin 30X200KW di Bulukumba Gangguan di Transmisi Pangkep .....	75
Gambar 4.16	Grafik Sistem Interkoneksi SULSELBAR Tanpa Masuknya Turbin Angin 30X200KW di Bulukumba Gangguan di Transmisi Sinjai.....	75
Gambar 4.17	Grafik Sistem Interkoneksi SULSELBAR Tanpa Masuknya Turbin Angin 30X200KW di Bulukumba Gangguan di Transmisi Polewali.....	76

Gambar 4.18	Grafik Sistem Interkoneksi SULSELBAR dengan Masuknya Turbin Angin 30X200KW di Bulukumba	
	Gangguan di Transmisi Pangkep.....	77
Gambar 4.19	Grafik Sistem Interkoneksi SULSELBAR dengan Masuknya Turbin Angin 30X200KW di Bulukumba	
	Gangguan di Transmisi Sinjai.....	78
Gambar 4.20	Grafik Sistem Interkoneksi SULSELBAR dengan Masuknya Turbin Angin 30X200KW di Bulukumba	
	Gangguan di Transmisi Polewali.....	78
Gambar 4.21	Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Tegangan Bus pada Turbin Angin di Bulukumba	
	dengan Kapasitor Terpasang.....	80
Gambar 4.22	Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Daya Aktif pada Turbin Angin di Bulukumba dengan Kapasitor Terpasang.....	81
Gambar 4.23	Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Daya Reaktif pada Turbin Angin di Bulukumba dengan Kapasitor Terpasang.....	81
Gambar 4.24	Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Tegangan Bus pada Turbin Angin di Bulukumba	
	dengan Kapasitor dibuka .....	82
Gambar 4.25	Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Daya Aktif pada Turbin Angin di Bulukumba	
	dengan Kapasitor dibuka .....	83
Gambar 4.26	Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Daya Reaktif	

	pada Turbin Angin di Bulukumba dengan Kapasitor dibuka .....	83
Gambar 4.27	Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Tegangan Bus pada Turbin Angin di Bulukumba dengan Kapasitor Terpasang pada Gangguan 3 Phasa .....	85
Gambar 4.28	Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Daya Aktif pada Turbin Angin di Bulukumba dengan Kapasitor Terpasang pada Gangguan 3 Phasa .....	86
Gambar 4.29	Grafik Hubungan Kecepatan Angin dengan Daya Reaktif pada Turbin Angin di Bulukumba dengan Kapasitor Terpasang pada Gangguan 3 Phasa.....	86
Gambar 4.30	Grafik Perbandingan Nilai Tegangan Bus saat Wind Turbine dipasang dan dilepas pada Sistem SULSELBAR ketika Gangguan 3 Phasa di Saluran Transmisi Pangkep.....	88
Gambar 4.31	Grafik Perbandingan Nilai Tegangan Bus saat Wind Turbine dipasang dan dilepas pada Sistem SULSELBAR ketika Gangguan 3 Phasa di Saluran Transmisi Sinjai.....	88
Gambar 4.32	Grafik Perbandingan Nilai Tegangan Bus saat Wind Turbine dipasang dan dilepas pada Sistem SULSELBAR ketika Gangguan 3 Phasa di Saluran Transmisi Polewali.....	89

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kelas Tenaga Angin.....	11
Tabel 4.1	Data Transmisi Interkoneksi SULSELBAR.....	51
Tabel 4.2	Data Transformator Interkoneksi SULSELBAR.....	52
Tabel 4.3	Data Beban Trafo Sistem Interkoneksi SULSELBAR.....	54
Tabel 4.4	Data Pembangkitan.....	56
Tabel 4.5	Data Cp Karakteristik Rotor.....	58
Tabel 4.6	Data Karakteristik Turbin Angin.....	59
Tabel 4.7	Karakteristik <i>Shaft Model</i> .....	60
Tabel 4.8	<i>Pitch Angel Controller</i> .....	61
Tabel 4.9	Karakteristik Generator.....	62
Tabel 4.10	Aliran Daya Setelah Masuknya Turbin Angin 30X200KW di Bulukumba.....	72
Tabel 4.11	Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Tegangan dengan Kapasitor Bank Terpasang pada Kecepatan Angin 0-6 m/s.....	80
Tabel 4.12	Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Tegangan dengan Kapasitor Bank dibuka pada Kecepatan Angin 0-6 m/s.....	82

Tabel 4.13	Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Tegangan dengan Kapasitor Bank Terpasang dengan Gangguan 3 Phasa pada Kecepatan Angin 0-6 m/s.....	84
Tabel 4.14	Tegangan pada Bus-Bus yang Terdekat dengan <i>Wind Turbine</i> pada Gangguan 3 Phasa dengan Kondisi <i>Wind Turbine</i> Terkoneksi dan Terlepas dari Sistem SULSELBAR.....	87

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Di era modern seperti sekarang ini, listrik sudah menjadi sebuah kebutuhan pokok dalam kehidupan manusia. Hampir setiap aktivitas keseharian manusia, selalu bergantung pada ketersediaan listrik. Manusia menjadi sangat bergantung pada listrik sehingga mengakibatkan kebutuhan listrik dari masa ke masa semakin meningkat.

Tidak terkecuali kebutuhan listrik untuk area Sulawesi Selatan yang terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Pada tahun 2011 beban puncak untuk wilayah Sulawesi Selatan mencapai angka 600 MW. Angka ini melebihi beban puncak pada tahun 2010 yaitu berkisar pada 563 MW atau naik sekitar 15% dari tahun sebelumnya. Sementara, pasokan listrik untuk wilayah Sulawesi Selatan saat ini hanya mencapai 615 MW yang diperoleh dari beberapa pembangkit tenaga listrik seperti PLTA Bili-bili, PLTA Bakar, PLTD Tello, PLTG Sengkang dan PLTA Sawito yang terinterkoneksi satu sama lain.

Oleh karena itu, untuk mengatasi kurangnya pasokan listrik untuk wilayah Sulawesi Selatan, maka PLN harus menambah kapasitas pembangkit listrik yang telah ada atau menambah jumlah pembangkit listrik dengan membangun pembangkit-pembangkit listrik baru. Pembangkit listrik yang potensial untuk

dikembangkan saat ini adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan sumber daya terbarukan karena biaya operasionalnya cukup murah dan ramah lingkungan.

Salah satu pembangkit listrik dengan energi terbarukan yang potensial dikembangkan di Sulawesi Selatan adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan tenaga angin. Sulawesi Selatan memiliki banyak pulau dan garis pantai yang cukup panjang sehingga pembangkit listrik tenaga angin sangat potensial untuk dikembangkan di wilayah Sulawesi Selatan. Salah satu daerah yang berpotensi untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin adalah Kabupaten Bulukumba.

Dengan akan adanya penambahan pasokan listrik dari pembangkit listrik tenaga angin di Kabupaten Bulukumba maka pasokan listrik untuk sistem Sulawesi Selatan akan ikut bertambah. Sehingga, diharapkan dengan adanya penambahan ini kebutuhan listrik dapat terpenuhi dan pemadaman bergilir dapat dihindari.

Pembangkit listrik tenaga angin di Kabupaten Bulukumba akan berinterkoneksi dengan pembangkit-pembangkit lain yang sudah ada yang kemudian akan terhubung oleh saluran transmisi ke pusat beban. Tujuan dari sistem interkoneksi antara lain adalah untuk menjaga kontinuitas penyediaan tenaga listrik karena apabila salah satu pusat pembangkit mengalami gangguan masih dapat disuplai dari pembangkit lain yang terhubung secara interkoneksi. Tujuan lainnya adalah saling memperingan beban yang harus ditanggung oleh suatu pusat listrik.

Dalam sistem interkoneksi, semua pembangkit perlu dikoordinir agar dicapai biaya pembangkitan yang minimum, tentunya dengan tetap memperhatikan mutu serta keandalan. Mutu dan keandalan penyediaan tenaga listrik menyangkut frekuensi, tegangan, dan gangguan. Demikian pula masalah penyaluran daya yang juga perlu diamati dalam sistem interkoneksi agar tidak ada peralatan penyaluran (transmisi) yang mengalami beban lebih.

Pembangkitan dalam sistem interkoneksi merupakan pembangkitan terpadu dari semua pusat listrik yang ada. Dimana dalam sistem interkoneksi, pembagian beban antara pusat-pusat listrik menghasilkan aliran daya dalam saluran transmisi dan juga menghasilkan profil tegangan dalam sistem. Keseluruhan sistem harus dijaga agar tegangan, arus, dan dayanya masih dalam batas-batas yang diizinkan.

Dengan mensimulasikan adanya pembangkit baru dengan memanfaatkan tenaga angin di Kabupaten Bulukumba dan penambahan pasokan listrik untuk sistem Sulsel, maka kita ingin mengetahui bagaimana pengaruh pasokan listrik ini terhadap sistem interkoneksi Sulawesi Selatan. Selain itu kita juga akan menganalisa karakteristik yang perlu diperhatikan dalam pengoperasian pembangkit listrik tenaga angin. Dan untuk memudahkan mencari tahu pengaruh dan menganalisa karakteristiknya maka kita akan menggunakan *software* DIgSILENT PowerFactory.

DIgSILENT PowerFactory adalah solusi yang paling ekonomis sebagai tempat mengolah data, pemodelan, dan fungsi secara keseluruhan mengganti satu set sistem perangkat lunak lain, sehingga meminimalkan biaya pelaksanaan

proyek dan persyaratan pelatihan. Solusi *all in one* PowerFactory membuat seseorang dapat mengoptimalkan alur kerja dari sebuah rancangan. DIgSILENT itu sendiri merupakan singkatan dari Digital Simulation and Electrical Network. DIgSILENT PowerFactory mudah digunakan dan dapat melayani semua kebutuhan standar sistem daya analisis, termasuk aplikasi *high-end* dalam teknologi baru seperti tenaga angin yang akan dibahas dalam tugas akhir ini serta pembangkit listrik terbarukan lainnya dan penanganan sistem tenaga yang sangat besar. Selain itu, mesin PowerFactory dapat juga diintegrasikan ke dalam GIS, DMS, dan EMS yang mendukung standar sistem terbuka.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan pasokan listrik dari pembangkit listrik tenaga angin di Kabupaten Bulukumba pada sistem interkoneksi Sulawesi Selatan bila dianalisa dengan *software* DIgSILENT?
2. Bagaimana karakteristik pembangkit listrik tenaga angin bila dianalisa dengan *software* DIgSILENT?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui dan menganalisa pengaruh penambahan pasokan listrik dari pembangkit listrik tenaga angin di Kabupaten Bulukumba pada sistem interkoneksi Sulawesi Selatan dengan *software* DIgSILENT.
2. Mengetahui dan menganalisa karakteristik pembangkit listrik tenaga angin dengan *software* DIgSILENT.

### **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Penentuan kapasitas pembangkit listrik tenaga angin berdasarkan kecepatan angin rata-rata di Kabupaten Bulukumba.
2. Penentuan jenis dan letak gangguan pada sistem untuk melihat pengaruh pembangkit listrik tenaga angin terhadap sistem saat terjadi gangguan.

## **1.5 Metode Penelitian**

Metode yang akan dilaksanakan untuk mewujudkan program ini antara lain :

### **1. Studi Literatur**

Studi literatur adalah kajian penulis atas referensi-referensi yang ada baik berupa buku, karya-karya ilmiah, internet, maupun melalui media massa yang berhubungan dengan penulisan laporan ini.

### **2. Pengumpulan data**

Berupa pengumpulan data yang penting dan untuk diolah dalam penelitian ini.

### **3. Perancangan sistem**

Perancangan sistem interkoneksi Sulawesi Selatan dengan penambahan pembangkit listrik tenaga angin dengan menggunakan *software* DIGSILENT PowerFactory.

## **1.6 Sistematika Penulisan Tugas Akhir**

Pembahasan tugas akhir ini memiliki susunan sebagai berikut:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini berisi tentang penguraian secara singkat latar belakang, rumusan masalah, tujuan, ruang lingkup, dan batasan masalah, serta sistematika penulisan.

### **BAB II TEORI PENUNJANG**

Pada bab ini akan dijelaskan tentang teori penunjang yang relevan untuk bahan penelitian yang diperoleh dari sumber referensi untuk menyusun kerangka teori dan konseptual.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Dalam bab ini berisi tentang waktu dan tempat penelitian, metode pengambilan data, analisa data, dan langkah-langkah penelitian.

#### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini membahas tentang bagaimana aliran daya dan kestabilan transien dari sistem interkoneksi SULSEL setelah masuknya pembangkit listrik tenaga angin di Kabupaten Bulukumba serta karakteristik pembangkit listrik tenaga angin dengan menggunakan *software* DIgSILENT.

#### **BAB V PENUTUP**

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari pembahasan permasalahan dan saran-saran untuk perbaikan dan penyempurnaan tugas akhir ini.

## BAB II

### TEORI PENUNJANG

#### 2.1 Pengenalan Perangkat Lunak (*Software*) DIgSILENT PowerFactory

DIgSILENT adalah singkatan dari *Digital Simulation and Electrical Network* yang merupakan sebuah aplikasi sistem tenaga buatan PowerFactory, Jerman. *Software* DIgSILENT mulai dikembangkan pada tahun 1976 dan merupakan hasil dari pemikiran beberapa ahli sistem tenaga dan pengembang perangkat lunak yang sering terlibat dengan perencanaan, operasi, dan pemeliharaan sistem tenaga. Sejak pengoperasian DIgSILENT, program ini telah berkembang untuk memasukkan *array* yang luas dari fitur analisis yang diperlukan untuk merencanakan, mengoperasikan, dan memelihara setiap aspek dari sistem tenaga. DIgSILENT PowerFactory yang merupakan generasi baru dari perangkat lunak analisis sistem tenaga pertama kali dirilis pada tahun 1997 dan menyediakan stabilitas produk yang diperlukan untuk menjamin efisiensi dalam aplikasi sehari-hari.

DIgSILENT merupakan salah satu aplikasi yang dikembangkan untuk membantu mengatasi begitu banyak permasalahan yang ada pada sistem tenaga listrik yang cukup sulit dan butuh waktu lama bila diselesaikan secara manual. DIgSILENT dapat mensimulasikan suatu sistem tenaga listrik dan dapat menghitung aliran daya atau *load flow* maupun nilai arus hubung singkat pada sistem tenaga listrik tersebut. Pada bidang proteksi, DIgSILENT dapat diaplikasikan untuk melakukan *scanning* guna melihat koordinasi di antara proteksi penghantar dengan fasilitas *time distance* diagram. Adapun peralatan proteksi yang ada pada aplikasi DIgSILENT ini seperti *current transformer (CT)*, *voltage transformer (VT)*, dan relay itu sendiri. Dengan berbagai fiturnya tersebut

DIGSILENT saat ini banyak digunakan di perusahaan-perusahaan dan industry-industri serta dalam penerapan teknologi baru seperti tenaga angin.

Berikut ini merupakan beberapa fungsi dari software DIGSILENT:

- a. *Load flow analysis*
- b. *Stability analysis*
- c. *Short circuit analysis*
- d. *Motor starting analysis*
- e. *OPF*
- f. *Harmonic load flow*
- g. *Electromagnetic transients analysis*
- h. *Distribution network analysis*
- i. Dll

## **2.2 Sumber Energi Terbarukan**

Energi terbarukan adalah energi yang berasal dari proses alam yang berkelanjutan seperti tenaga surya, tenaga angin, biomassa, panas bumi, dll. Penggunaan sumber-sumber energi terbarukan ini sangat giat ditingkatkan mengingat persediaan energi fosil yang semakin menipis serta semakin meningkatnya kesadaran manusia mengenai pentingnya pelestarian lingkungan. Energi terbarukan dikenal lebih ramah lingkungan serta tidak memiliki dampak emisi baik secara langsung maupun tidak langsung terhadap lingkungan, serta selalu tersedia di alam sehingga tidak perlu dikhawatirkan akan habis sumbernya.

### **2.3 Pemanfaatan Angin sebagai Sumber Energi**

Manusia sudah mulai memanfaatkan energi angin setidaknya sejak awal 5000 SM. Pada saat itu manusia menggunakan tenaga angin untuk mendorong perahu di sepanjang Sungai Nil. Pada 200 SM, kincir angin sederhana di China digunakan untuk memompa air, sementara di Persia dan Timur Tengah kincir angin digunakan untuk menggiling biji-bijian. Kincir angin yang digunakan merupakan kincir angin dengan poros vertikal, dan tiap-tiap kipas berbentuk segi-empat yang dilapisi dengan bahan kain. Kincir angin dengan poros horizontal pertama kali ditemukan di Eropa untuk menggiling gandum. Kincir angin pertama yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik ada di daerah pedesaan Amerika pada tahun 1890 dan dewasa ini penggunaan energi angin bersaing dengan jenis energi lainnya untuk menyuplai energi ramah lingkungan di berbagai belahan dunia.

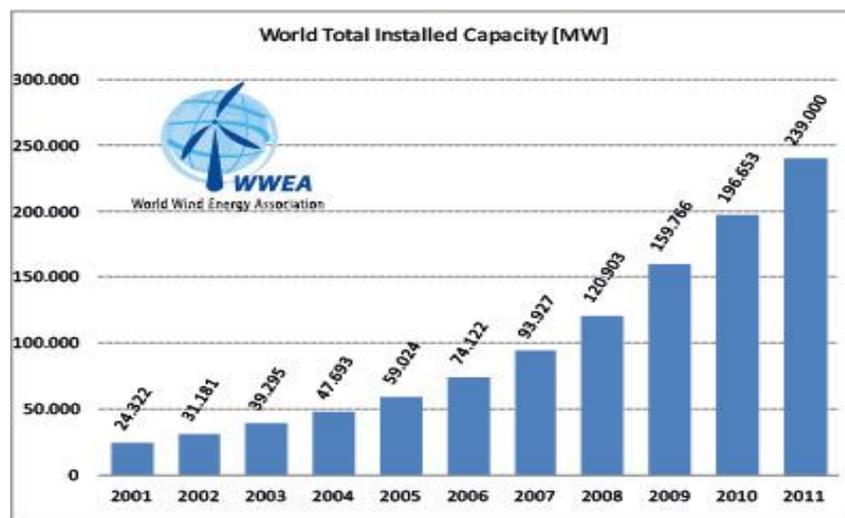
Besar daya listrik yang dibangkitkan oleh satu unit PLT angin dapat mencapai 300 KW dan sedang dilakukan penelitian untuk membuat PLT angin dengan daya sebesar 0,5 MW-1000 MW.

Berdasarkan kecepatan dan kerapatan angin, tenaga angin dapat dikategorikan menjadi tujuh kelas seperti pada tabel berikut:

**Tabel 2.1 Kelas Tenaga Angin**

Wind Power Class	At a Height of 10 m (33 ft)		At a Height of 50 m (164 ft)	
	Wind Power Density (W/m <sup>2</sup> )	Wind Speed (m/s)	Wind Power Density (W/m <sup>2</sup> )	Wind Speed (m/s)
1	0	0	0	0
1-2	100	4.4	200	5.6
2-3	150	5.1	300	6.4
3-4	200	5.6	400	7.0
4-5	250	6.0	500	7.5
5-6	300	6.4	600	8.0
6-7	400	7.0	800	8.8
7	1000	9.4	2000	11.9

Pemanfaatan tenaga angin merupakan pemanfaatan energi terbarukan yang sangat berkembang. Berdasarkan data dari WWEA (*World Wind Energy Association*), pasar dunia untuk turbin angin mencapai rekor baru di tahun 2011 yaitu mencapai 42 Gigawatt, cukup untuk mencakup 3% kebutuhan listrik dunia.



**Gambar 2.1 Grafik Penggunaan Tenaga Angin Dunia**

Di Indonesia sendiri, jumlah PLT Angin baru sebanyak 5 unit dengan kapasitas 80 KW dan pada tahun 2007 bertambah lagi sebanyak 7 unit yang beroperasi di pulau Selayar 3 unit, Sulawesi Utara dua unit, Nusa Penida, Bali, dan Bangka Belitung dengan kapasitas yang sama.

### 2.3.1 Massa Jenis Udara

Tenaga dari angin mempunyai hubungan yang linear dengan kerapatan udara ketika mengenai bilah kincir. Nilai dari massa jenis tersebut sangat bergantung dari tekanan udara dan suhu udara dimana secara rumus dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\rho = \frac{p}{R.T} \quad (2.1)$$

Dimana :

p = adalah tekanan udara

T = adalah suhu udara

R = adalah konstan gas

Massa jenis udara di permukaan laut dimana tekanan udara sama dengan 1 atm dan suhu 60<sup>0</sup>F sama dengan 1,225 kg/m<sup>3</sup>. Berdasarkan rumus di atas maka dapat diketahui besar massa jenis udara berbeda-beda di setiap tempat dan dipengaruhi pula oleh ketinggian tempat tersebut. Hal ini disebabkan karena ketinggian akan mempengaruhi suhu maupun tekanan udara.

Kombinasi dari hubungan tersebut akan berlaku sampai dengan ketinggian 6000 meter di atas permukaan laut. Secara rumus dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$\rho = \rho_0 - 1.194 \cdot 10^{-4} \cdot H_m \quad (2.2)$$

Dimana  $H_m$  adalah ketinggian.

Massa jenis udara dapat berubah secara signifikan pada daerah yang memiliki ketinggian yang besar contohnya pada daerah yang ketinggiannya 2000 meter massa jenis udara sebesar  $0,986 \text{ kg/m}^3$  20 persen lebih rendah daripada massa jenis udara di permukaan laut.

Sedangkan perubahan suhu pada perubahan ketinggian dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini:

$$T = 15.5 - \frac{19.83 H_m}{3048} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.3)$$

### 2.3.2 Modus dan Kecepatan Angin Rata-rata

Modus kecepatan didefinisikan sebagai kecepatan angin bertiup hampir sepanjang waktu atau dapat disebut juga nilai kecepatan yang paling sering terjadi di daerah tersebut. Sedangkan yang dimaksud kecepatan rata-rata dalam menghitung data angin ialah, rata-rata kecepatan selama periode tertentu yang didefinisikan sebagai luas total di bawah kurva ketinggian dan kecepatan angin yang terintegrasi dari  $v = 0$  sampai  $\infty$  dibagi dengan jumlah jam pada periode (8760 jika jangka panjang waktu satu tahun).

Kecepatan rata-rata tahunan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{\text{mean}} = \frac{1}{8760} \int_0^{\infty} h \cdot v \cdot dv \quad (2.4)$$

### 2.3.3 Daya yang Dihasilkan oleh Energi Angin

Daya yang dikonversi oleh bilah rotor kincir pembangkit akan berbeda pada tiap-tiap tingkat kecepatan angin yang melewatinya, secara rumus dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_o = \frac{1}{2} \text{ jumlah aliran massa perdetik} \cdot \{V^2 - V_0^2\} \quad (2.5)$$

Dimana:

$P_o$  = Daya yang dibangkitkan oleh rotor/turbin

$V$  = Kecepatan angin awal ketika memasuki rotor

$V_o$  = Kecepatan angin akhir ketika keluar dari rotor

Karena perbedaan kecepatan angin ketika memasuki rotor pembangkit dan keluar dari pembangkit dapat diabaikan, maka rumus jumlah aliran massa dapat diubah menjadi :

$$\text{Jumlah aliran massa udara perdetik} = \rho \cdot A \cdot \frac{V + V_0}{2} \quad (2.6)$$

Sedangkan jumlah daya dari rotor yang diubah menjadi energi listrik di generator biasanya dinyatakan dengan menggunakan kecepatan awal dari angin atau secara rumus ditulis sebagai berikut:

$$P_o = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (2.7)$$

Dimana  $C_p$  biasa disebut juga sebagai konstanta tenaga dari rotor atau rotor efisiensi dan sangat bergantung pada nilai kecepatan angin ketika memasuki bilah kincir dan ketika keluar dari bilah kincir.

Secara teori nilai maksimum dari  $C_p$  tersebut adalah 0,59 akan tetapi secara praktik nilainya sangat bergantung pada jenis generator dan jenis bilah kincirnya. Sebagai contoh nilai  $C_p$  maksimal yang dapat dicapai adalah dibawah 0,5 untuk kincir 2 bilah berkecepatan tinggi sedangkan untuk kincir yang memiliki jumlah bilah yang banyak serta kecepatan rendah maka nilai  $C_p$  yang biasanya didapat berkisar antara 0,2 sd 0,4. Sehingga didapat kesimpulan daya maksimum yang dapat dibangkitkan oleh sebuah kincir angin adalah:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot 0,59 \quad (2.8)$$

Atau secara sederhana dapat ditulis menjadi:

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot V^3 \text{ watts per m}^2 \quad (2.9)$$

### 2.3.4 Sistem Operasi Turbin Angin

Sistem pengendalian turbin angin dapat diklasifikasikan menjadi :

#### 1. Turbin Angin dengan Kecepatan Konstan

Untuk dapat beroperasi pada kecepatan yang hampir konstan perlu dirancang perbandingan roda gigi yang sesuai dengan putaran generator. Pengendalian digunakan dengan tujuan memaksimalkan pengambilan energi dan mengontrol torsi atau daya keluaran yang dihasilkan. Untuk turbin angin dengan kecepatan konstan, baling baling dirancang guna beroperasi pada daerah TSR (*top speed ratio*) yang optimal untuk kecepatan angin tertentu, sehingga ketika angin

meningkat kecepatannya, mengakibatkan penurunan efisiensi rotor dan daya keluaran generator.

## 2. Turbin Angin dengan Pengaturan Kecepatan

Pengaturan kecepatan turbin angin dapat dilakukan dengan metode perubahan sudut baling- baling. Strategi kontrol yang digunakan dengan tujuan pengoptimalan daya dan pembatasan daya. Strategi pengoptimalan daya digunakan ketika kecepatan angin berada di bawah nilai optimal. Pengendalian sudut ini akan mengoptimalkan menangkap energi dengan mempertahankan kecepatan agar konstan sesuai dengan kecepatan relatif rotor (*tip speed ratio /TSR*) secara optimal. Tetapi jika kecepatan berubah akibat variasi beban untuk kecepatan angin di atas nilai nominal maka generator akan *over load*. Untuk menghindari hal ini, metode seperti pengendalian torsi generator digunakan untuk mengontrol kecepatan.

Strategi pembatasan daya digunakan untuk mengendalikan kecepatan bila angin di atas nilai optimal. Strategi ini membatasi daya keluaran dengan mengubah sudut untuk mengurangi efisiensi aerodinamis.

### 2.3.5 Efisiensi Turbin

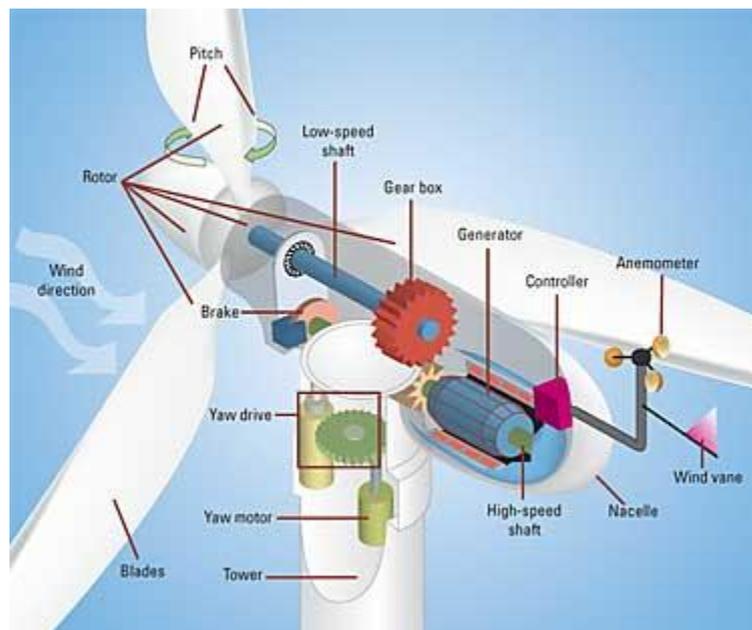
Meningkatkan efisiensi sebuah turbin angin bisa dilakukan dengan berbagai cara. Mulai dari *gear-box*, generator, hingga desain bilah rotor. Salah satunya yaitu bilah rotor dibuat dengan ukuran yang lebih panjang. Dengan bilah rotor yang lebih panjang, maka permukaan rotor yang menangkap energi angin menjadi lebih luas. Panjang bilah rotor tersebut juga dibarengi dengan desain

aerodinamika dan material yang lebih ringan. Hasilnya peningkatan efisiensi dengan memproduksi energi listrik lebih banyak.

### 2.3.7 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit listrik tenaga angin adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan angin sebagai sumber energi untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit ini dapat mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin.

Adapun komponen-komponen sistem tenaga angin antara lain:



**Gambar 2.2** Komponen-komponen PLT Angin

1. Menara atau tower merupakan penopang segala komponen PLT angin. Tinggi menara untuk kapasitas daya besar dan menengah sebaiknya sedikit lebih tinggi dari diameter bilah sedangkan untuk daya kecil biasanya tingginya sekitar beberapa kali dari panjang diameter bilah rotor. Semakin tinggi menara maka semakin besar energi angin yang didapat.

2. Turbin angin, secara garis besar terdapat 2 jenis rancangan turbin yaitu turbin sudut horizontal dan turbin sudut vertikal akan tetapi yang lebih berkembang pesat adalah turbin sudut horizontal.



**Gambar 2.3 Turbin Angin Horizontal dan Turbin Angin Vertikal**

Setiap jenis turbin angin memiliki ukuran dan efisiensi yang berbeda. Untuk memilih jenis turbin angin yang tepat untuk suatu kegunaan diperlukan tidak hanya sekedar pengetahuan tetapi juga pengalaman. Untuk keperluan pembangkitan listrik digunakan turbin angin dengan jumlah sudu sedikit, misalnya dua atau tiga. Turbin angin jenis ini mempunyai torsi rendah tetapi putaran rotor yang tinggi. Jika dikaitkan dengan sumber daya angin, turbin angin dengan jumlah sudu banyak lebih cocok digunakan pada daerah dengan potensi energi angin yang rendah karena *rated wind speed*-nya tercapai pada putaran rotor dan kecepatan angin yang tidak terlalu tinggi. Sedangkan turbin angin dengan sudu sedikit (untuk pembangkitan listrik) tidak akan beroperasi secara efisien pada daerah dengan kecepatan angin rata-rata kurang dari 4 m/s. Dengan demikian daerah-daerah dengan potensi energi angin rendah, yaitu

kecepatan angin rata-rata kurang dari 4 m/s, lebih cocok untuk dikembangkan turbin angin keperluan mekanikal.

3. *Controller* berfungsi sebagai alat pengontrol, *menstart* turbin pada kecepatan angin kira-kira 12-25 km/jam, dan mematikannya pada kecepatan 90 km/jam. Turbin tidak beroperasi di atas 90 km/jam, karena angin terlalu kencang dapat merusak turbin.
4. *Gear box* (roda gigi), menaikkan putaran dari 30-60 rpm menjadi kira-kira 1000-1800 rpm yaitu putaran yang biasanya disyaratkan untuk memutar generator listrik.
5. Generator sebagai pembangkit listrik yang dilengkapi dengan alternator arus bolak-balik.
6. *Brake* (rem), digunakan untuk menjaga putaran rotor agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya. Generator akan menghasilkan energi listrik maksimal pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Kehadiran angin diluar dugaan akan menyebabkan putaran yang cukup cepat pada poros generator. Sehingga jika tidak diatasi maka putaran ini dapat merusak generator. Dampak dari kerusakan akibat putaran berlebih diantaranya *overheat*, rotor *breakdown*, kawat pada generator putus karena tidak dapat menahan arus yang besar.
7. Penggerak arah, memutar turbin ke arah angin untuk desain turbin yang menghadap angin.

8. *Wind vane* (tebeng angin) berfungsi untuk mengukur arah angin, berhubungan dengan penggerak arah yang memutar arah turbin sesuai dengan arah angin.
9. Anemometer berfungsi sebagai pengukur kecepatan angin dan mengirim data kecepatan angin ke pengontrol.

Untuk pembangkit listrik tenaga angin yang terdiri dari banyak unit sebaiknya menggunakan unit kontrol sendiri untuk operasional dan keamanan operasi.

#### **2.4 Sistem Tenaga Listrik**

Listrik seperti kita ketahui dihasilkan dari proses konversi sumber energi primer seperti batu bara, minyak bumi, gas, panas bumi, potensial air, dan energi angin. Melalui energi-energi primer tersebut listrik dibangkitkan melalui mesin-mesin pembangkit. Tenaga listrik dihasilkan di pusat-pusat pembangkit tenaga listrik yang jauh dari pusat-pusat beban sehingga perlu ditransmisikan dan didistribusikan melalui sistem transmisi dan distribusi ke pusat-pusat beban tersebut.

Sistem pembangkitan listrik yang sudah umum digunakan adalah mesin generator tegangan AC, dimana penggerak utamanya bisa berjenis mesin turbin, mesin diesel, atau mesin baling-baling. Dalam pengoperasian pembangkit listrik, disediakan beberapa generator yang bekerja secara paralel untuk memenuhi kebutuhan beban. Oleh karena itu, setiap pembangkit harus terinterkoneksi untuk menanggung kebutuhan listrik pelanggan (beban).

## 2.6 Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik

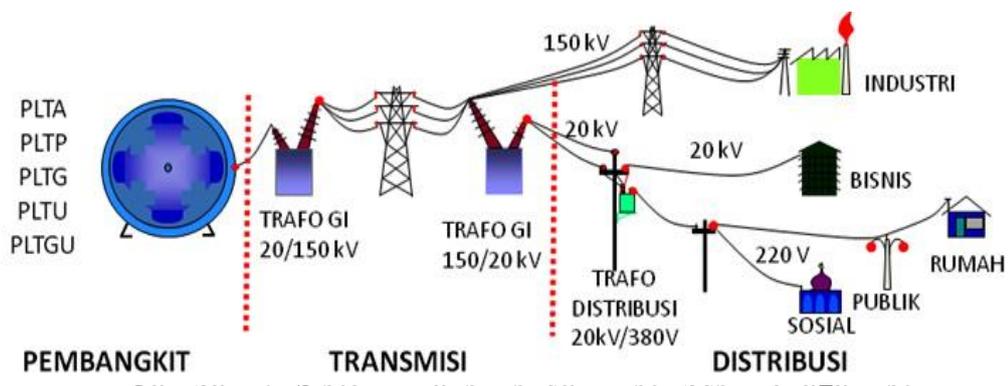
Letak pusat pembangkit listrik umumnya berjarak cukup jauh dari pusat beban. Sehingga untuk menyalurkan daya listrik yang telah dibangkitkan, diperlukan saluran pembawa yang dikenal dengan saluran transmisi. Energi listrik yang dibangkitkan oleh generator akan disalurkan melalui jaringan transmisi ke gardu-gardu induk (GI) setelah terlebih dahulu dinaikkan tegangannya oleh transformator penaik tegangan (*step up transformer*) menjadi Tegangan Tinggi. Saat ini di Indonesia, umumnya tegangan tinggi terbagi atas Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) bertegangan 150 kV dan untuk Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) bertegangan 500 kV.

Saluran transmisi ada yang berupa saluran udara dan ada pula yang berupa saluran bawah tanah. Namun, pada umumnya di Indonesia digunakan saluran udara karena lebih murah, lebih mudah dalam perawatan dan pengontrolan, serta lebih mudah dalam perbaikannya. Akan tetapi, kekurangan saluran udara adalah rentan terhadap gangguan cuaca seperti petir karena berada pada ruang terbuka. Sementara saluran transmisi bawah tanah biasanya digunakan di perkotaan agar tidak mengganggu estetika kota atau pada tempat-tempat yang tidak memungkinkan untuk dibangun saluran transmisi udara.

Tegangan transmisi yang berupa tegangan tinggi yang diterima oleh Gardu Induk (GI) akan diturunkan kembali tegangannya menjadi Tegangan Menengah (TM) sampai dengan 20 kV melalui transformator penurun tegangan (*step down transformer*). Tegangan menengah ini juga disebut sebagai Tegangan Distribusi Primer (TDP). Tegangan distribusi primer dari gardu induk kemudian disalurkan

melalui jaringan distribusi ke gardu-gardu distribusi. Gardu distribusi biasanya terletak dekat dengan konsumen. Akan tetapi, ada juga sebagian konsumen mendapat catu daya 20 kV langsung dari tegangan distribusi primer atau dari gardu induk dan bahkan mendapatkan sambungan langsung dari jaringan transmisi tegangan tinggi yang semuanya disesuaikan dengan permintaan pelanggan itu sendiri.

Energi listrik bertegangan menengah yang disalurkan melalui jaringan distribusi primer ke Gardu Distribusi (GD) tersebut kemudian tegangannya kembali diturunkan melalui *transformator step down* hingga menjadi Tegangan Rendah (TR) yang berkisar 380 Volt untuk 3 fasa dan 220 Volt untuk 1 fasa (380/220 Volt). Tegangan rendah inilah yang kemudian disalurkan ke sambungan rumah konsumen dan pelanggan melalui jaringan tegangan rendah dengan pembatas daya dan kWh meternya.



## 2.6 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi beberapa syarat, yaitu:

1. *Reliability* yaitu kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus.
2. *Quality* yaitu kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. *Stability* yaitu kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan.

Dalam sistem tenaga listrik yang baik maka ketiga syarat tersebut harus dipenuhi. Dimana, sistem harus mampu memberi pasokan listrik secara terus menerus dengan standar tegangan dan frekuensi sesuai dengan aturan yang berlaku serta harus segera kembali normal bila sistem terkena gangguan. Untuk jaringan yang sangat kompleks dimana beberapa pembangkit saling terhubung satu sama lain, maka tegangan dan frekuensi haruslah diperhatikan agar tidak ada pembangkit yang kelebihan beban sementara pembangkit yang lain bebannya kecil.

Sistem tenaga listrik mempunyai variasi beban yang sangat dinamis dan akan berubah-ubah setiap detiknya. Perubahan beban yang tidak terduga dapat dikategorikan sebagai gangguan yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara pasokan listrik dan permintaan energi listrik. Gangguan pada pembangkit ataupun pada sistem transmisi mengakibatkan kerja dari pembangkit yang lain menjadi

lebih berat. Untuk itu, diperlukan satu penelaahan kestabilan agar pembangkit yang terganggu tidak terlepas dari sistem.

Analisis kestabilan biasanya digolongkan kedalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan yaitu :

1. Kestabilan Keadaan Tetap (*Steady State Stability*)
2. Kestabilan Dinamis (*Dynamic Stability*)
3. Kestabilan Peralihan (*Transient Stability*)

### **2.6.1 Kestabilan Keadaan Tetap**

Kestabilan keadaan tetap adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menerima gangguan kecil yang bersifat gradual yang terjadi disekitar titik keseimbangan pada kondisi tetap.

Kestabilan ini tergantung pada karakteristik komponen yang terdapat pada sistem tenaga listrik antara lain: pembangkit, beban, jaringan transmisi, dan kontrol sistem itu sendiri.

Model pembangkit yang digunakan adalah pembangkit yang sederhana (sumber tegangan konstan) karena hanya menyangkut gangguan kecil disekitar titik keseimbangan.

### **2.6.2 Kestabilan Dinamis**

Kestabilan dinamis adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke titik keseimbangan setelah timbul gangguan yang relatif kecil secara tiba-tiba dalam waktu yang lama. Analisa kestabilan dinamis lebih kompleks karena juga memasukkan komponen kontrol otomatis dalam perhitungannya.

### 2.6.3 Kestabilan Peralihan

Kestabilan peralihan adalah kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan/sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar yang mengakibatkan sistem kehilangan stabilitas karena gangguan terjadi diatas kemampuan sistem. Analisis kestabilan peralihan merupakan analisis yang utama untuk menelaah perilaku sistem daya misalnya gangguan yang berupa:

1. Perubahan beban yang mendadak karena terputusnya unit pembangkit
2. Perubahan pada jaringan transmisi misalnya gangguan hubung singkat atau pemutusan saklar (*switching*)

Sistem daya listrik masa kini jauh lebih luas dengan sistem interkoneksi antar sistem yang rumit dan melibatkan beratus-ratus mesin yang dapat saling mempengaruhi melalui perantara jala-jala tegangan extra tinggi dan memiliki sistem penguatan yang berhubungan.

Kisaran masalah yang dianalisis banyak menyangkut gangguan yang besar dan tidak lagi memungkinkan menggunakan proses kelinearan. Masalah kestabilan peralihan dapat lebih lanjut dibagi kedalam kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multi swing*).

Kestabilan ayunan pertama didasarkan pada model generator yang cukup sederhana tanpa memasukkan sistem pengaturannya dan biasanya periode waktu yang diselidiki adalah detik pertama setelah timbulnya gangguan pada sistem. Bila pada sistem, mesin dijumpai tetap berada dalam keadaan serempak sebelum berakhirnya detik pertama, ini dikategorikan sistem masih stabil.

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan transien adalah:

1. Besar pembebanan pada generator
2. Output genetator selama gangguan. Hal ini dipengaruhi oleh lokasi dan tipe gangguan
3. Waktu pemutusan atau penghilangan gangguan
4. Reaktansi sistem transmisi pasca gangguan
5. Reaktansi generator. Semakin kecil nilai reaktansi akan meningkatkan daya puncak dan mengurangi sudut rotor awal
6. Inersia generator. Semakin besar inersia semakin lambat laju perubahan sudut. Hal ini mengurangi perbesaran energi kinetik selama periode gangguan
7. Besar tegangan internal generator. Hal ini tergantung pada medan eksitasi
8. Tegangan bus infinitif

Beberapa perbaikan yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kestabilan sistem diantaranya:

1. Mengembangkan konfigurasi dan desain sistem
2. Penambahan daya sinkronisasi
3. Perancangan peralatan pembangkit seperti pengembangan regulator tegangan, karakteristik *exciter*, dll
4. Penerapan *power system stabilizer*
5. Perancangan dan penambahan sistem proteksi
6. Penambahan skema *load shedding*

## 2.7 Persamaan Ayunan (*Swing Equation*)

Untuk melakukan analisis kestabilan suatu sistem tenaga listrik, maka hal pertama yang harus dilakukan adalah membangun model matematika yang dapat menggambarkan dinamika sistem tenaga listrik saat ada gangguan besar. Model matematika yang dipakai untuk pembangkit listrik adalah persamaan ayunan (*swing equation*).

Persamaan ayunan menyatakan "Momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya."

Persamaan ayunan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$j \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.10)$$

Dimana :

$j$  = momen kelembaman rotor (Kg.m)

$\theta$  = pergeseran sudut rotor terhadap sumbu diam (radian)

$t$  = waktu (detik)

$T_m$  = momen putar mekanis poros penggerak yang diberikan penggerak mula dikurangi rugi-rugi (N.m)

$T_e$  = momen putar elektris (N.m)

$T_a$  = momen putar percepatan (N.m)

Momen putar mekanis  $T_m$  dan momen putar listrik  $T_e$  dianggap positif, ini berarti bahwa  $T_m$  merupakan resultan torsi mekanik yang menyebabkan rotor mengalami perubahan arah  $\theta_m$  yang positif. Pada kondisi operasi *steady state* besar  $T_m$  dan  $T_e$  adalah sama sehingga torsi percepatan bernilai nol. Pada kondisi ini tidak ada percepatan atau perlambatan pada rotor.

Nilai  $T_m$  dianggap konstan pada kondisi operasi. Asumsi ini didasarkan karena input dari *prime mover* dikontrol oleh governor. Governor tidak akan bekerja sampai terjadi perubahan kecepatan. Periode waktu dalam dinamika tersebut tidak terlalu efektif untuk diperhitungkan dalam studi stabilitas. Nilai  $T_e$  (torsi elektrik) menggambarkan besar daya air gap pada mesin yang merupakan total daya keluaran pada generator ditambah  $|I|^2 R$  losses pada kumparan jangkar.  $T_e$  menyatakan daya air gap udara yang disuplai oleh sistem elektrik untuk mengendalikan rotor, sedangkan  $T_m$  merepresentasikan torsi beban dan losses rotasi yang cenderung memperlambat rotor.

$\theta_m$  merupakan sudut rotor yang dihitung dari axis stasioner pada stator sebagai referensi. Oleh karena itu,  $\theta_m$  meningkat secara kontinyu sejalan dengan waktu pada kecepatan sinkron yang konstan, yang dinyatakan oleh persamaan:

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.11)$$

Dimana:

$\omega_{sm}$  = kecepatan sinkron mesin (rad/sekon)

$\delta_m$  = pergeseran angular pada rotor (rad)



Apabila persamaan di atas kita turunkan sebagai berikut:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} t + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.12)$$

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.13)$$

Dari persamaan diatas kita dapat mengetahui bahwa kecepatan angular rotor  $\frac{d\theta_m}{dt}$  hanya akan konstan dan bernilai kecepatan sinkron pada saat  $\frac{d\delta_m}{dt}$  bernilai nol. Oleh karena itu  $\frac{d\delta_m}{dt}$  merepresentasikan deviasi dari kecepatan rotor dari nilai sinkronnya.

Dari persamaan tersebut dapat kita peroleh:

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.14)$$

Apabila persamaan diatas dikali dengan kecepatan angular rotor  $\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$  sedangkan perkalian torsi dengan kecepatan angular merupakan besar daya yang disuplai maka persamaan tersebut dapat kita nyatakan sebagai:

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.15)$$

Dimana:

$P_m$  = daya input ke mesin dikurangi losses putaran

$P_e$  = daya elektrik yang melewati air gap

$P_a$  = daya percepatan yang merupakan ketidakseimbangan antara  $P_m$  dan  $P_e$

Losses rotasi dan losses jangkar dapat diabaikan dan menganggap bahwa  $P_m$  adalah daya yang disuplyai dari *prime mover* dan  $P_e$  adalah daya keluaran

elektrik. Koefisien  $J\omega_m$  adalah momentum angular dari rotor pada kecepatan sinkron yang dinotasikan sebagai M yang disebut sebagai konstanta inersia dari mesin.

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.16)$$

Konstanta lain yang memiliki hubungan dengan inersia disebut konstanta H yang didefinisikan sebagai :

$$H = \frac{\text{Energi Kinetis (MJ) saat } v \text{ sinkron}}{\text{Rating mesin MVA}} \quad (2.17)$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{mesin}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{mesin}} \quad (2.18)$$

H mencakup konstanta inersia rotor mesin secara total yaitu generator, turbin, dan *exciter*. Dengan menstutbitusi persamaan diatas dengan persamaan sebelumnya, dapat diperoleh:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mesin}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mesin}} \quad (2.19)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P \text{ Per unit} \quad (2.20)$$

Untuk sistem dengan frekuensi f Hertz persamaan menjadi:

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P \text{ Per unit} \quad (2.21)$$

$\delta$  dalam radian elektrik, sehingga persamaan menjadi:

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P \text{ Per unit} \quad (2.22)$$

Persamaan diatas disebut sebagai persamaan ayunan mesin (*swing equation*) yang merupakan persamaan dasar yang menggambarkan dinamika rotasi pada mesin dalam studi kestabilan. Kita menggunakan persamaan diatas untuk menentukan kestabilan mesin pada sistem. Ketika persamaan ayunan dapat kita selesaikan kita akan mendapatkan persamaan  $\delta$  dalam fungsi waktu. Grafik dari solusi persamaan  $\delta(t)$  disebut kurva ayunan (*swing curve*). Inspeksi dari kurva ayunan bagi seluruh mesin dalam sistem akan menggambarkan apakah mesin tetap berada dalam keadaan serempak setelah gangguan.

Persamaan ayunan diatas menggunakan S mesin sebagai *base*. Dalam studi kestabilan sistem yang terdiri dari banyak mesin sinkron hanya ada satu MVA base yang dapat dipilih dalam sistem. Karena sisi kanan persamaan diekspresikan dan per unit maka H pada sisi kiri persamaan harus konsisten terhadap *base system*:

$$H_{sistem} = H_{mesin} \frac{S_{mesin}}{S_{sistem}} \quad (2.23)$$

## 2.8 Sudut Daya dan Daya Listrik

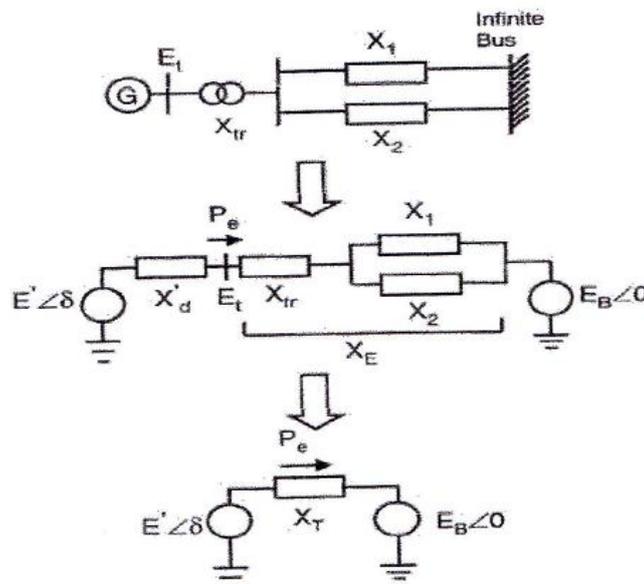
Dengan menganggap suatu model yang sederhana dari suatu pembangkit yang disambungkan ke sebuah *infinite bus* melalui suatu sistem transmisi. Model tersebut dapat dikurangi seperti yang ditunjukkan dengan menggantikan pembangkit dengan suatu tegangan konstan di balik suatu reaktansi transien (model klasik). Hal tersebut menunjukkan bahwa ada suatu daya maksimum bahwa yang dipancarkan kepada bus infinitif dalam sistem yang sedemikian.

Hubungan antara daya listrik dari pembangkit  $P_e$  dan sudut rotor  $\delta$  dari mesin dapat dituliskan persamaan berikut,

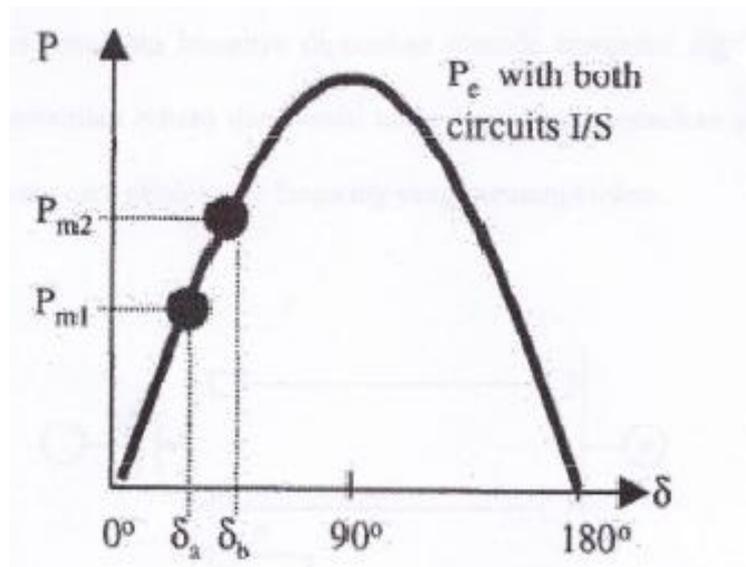
$$P_e = \frac{E' E_B}{X_r} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (2.24)$$

$$P_{max} = \frac{E' E_B}{X_T} \quad (2.25)$$

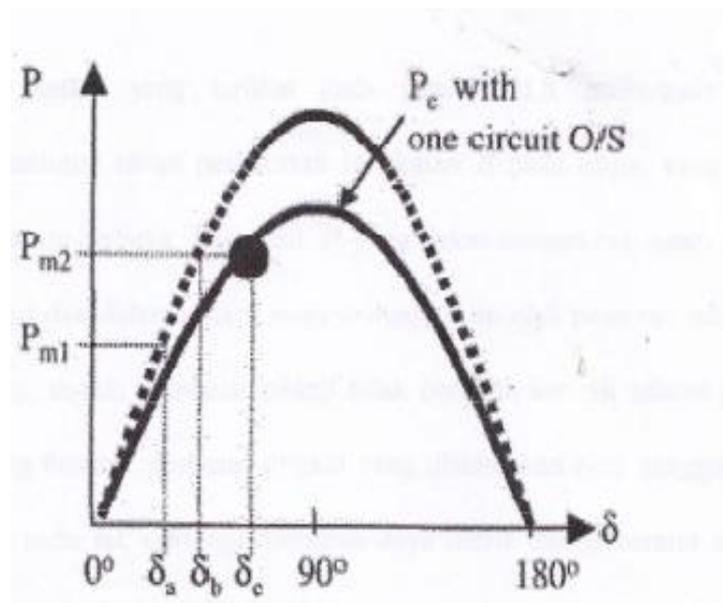
Persamaan 2.24 dapat ditunjukkan dengan jelas pada gambar 2.7 dimana pada gambar tersebut dapat dilihat adanya peningkatan daya awal, peningkatan  $\delta$  sampai  $90^\circ$  ketika  $P_e$  mencapai daya maksimumnya. Ketika  $\delta$  diatas  $90^\circ$  maka daya mengalami penurunan sampai  $\delta = 180^\circ$ ,  $P_e = 0$ . Hal ini disebut dengan hubungan sudut daya yang menggambarkan daya yang ditransmisikan sebagai sebuah fungsi sudut rotor, ini dijelaskan dari persamaan 2.25 bahwa daya maksimum adalah suatu fungsi tegangan dari generator dan bus infinitif.



**Gambar 2.5 Sistem Dengan Mesin Tunggal**



Gambar 2.6 Hubungan Sudut Daya Kondisi Normal



Gambar 2.7 Hubungan Sudut Daya Setelah Terjadi Gangguan

## **2.9 Mesin Induksi**

Untuk menghasilkan energi listrik dapat digunakan berbagai cara, salah satu cara yang paling umum digunakan adalah mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik dari penggerak mula digunakan untuk memutar generator. Generator inilah yang selanjutnya mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Pada umumnya generator yang dipakai adalah jenis generator sinkron. Karena generator tersebut lebih stabil saat terjadinya perubahan beban. Namun pada pembangkit listrik tenaga angin dan pembangkit energi alternatif lainnya seringkali digunakan generator induksi. Alasan mengapa generator induksi digunakan karena generator induksi ini memiliki keunggulan dari segi harga dan perawatan. Selain itu konstruksinya sederhana dengan rotor tanpa sikat (rotor sangkar) tidak memerlukan penguatan dc. Di negara maju dan berkembang dimana upaya konservasi energi merupakan suatu kebutuhan, pemakaian generator induksi telah banyak dijumpai pada sistem pembangkit listrik tenaga angin, biogas, dan lain-lain.

### **2.9.1 Motor Induksi**

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (AC) yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator.

Belitan stator yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan tiga fasa akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron. Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus; dan sesuai dengan Hukum *Lentz*, rotor pun akan ikut berputar mengikuti medan putar stator.

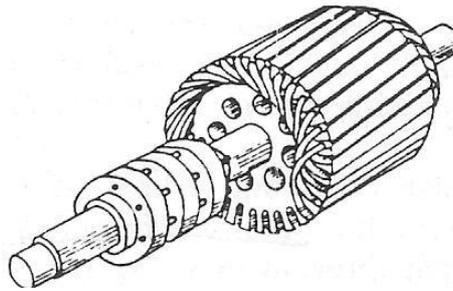
Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut slip. Bertambahnya beban, akan memperbesar kopel motor, yang oleh karenanya akan memperbesar pula arus induksi pada rotor, sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi, apabila beban motor bertambah, putaran rotor cenderung menurun.

Berdasarkan jenis rotor yang digunakan, motor induksi tiga fasa dapat dibedakan menjadi dua tipe yaitu :

1. Rotor Belitan

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan belitan kumparan tiga fasa sama seperti kumparan stator. Kumparan stator dan rotor juga mempunyai jumlah kutub yang sama. Rotor yang mempunyai tiga belitan yang mirip dengan belitan stator. Ketiga belitan tersebut biasanya terhubung bintang. Ujung-ujung belitan tersebut dihubungkan dengan *slipring* yang terdapat pada poros rotor.

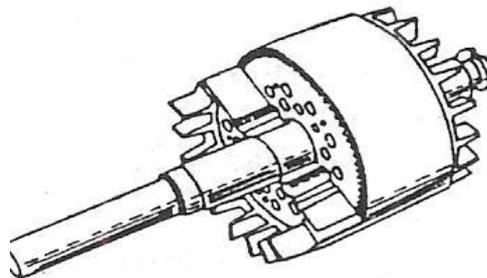
Belitan-belitan tersebut dihubung singkat melalui sikat (*brush*) yang menempel pada *slipring*. Jenis rotor belitan dapat dilihat pada gambar sebagai berikut:



**Gambar 2.8 Jenis Rotor Belitan**

## 2. Rotor Sangkar

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri atas beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa hingga menyerupai sangkar tupai. Rotor yang terdiri dari sederetan batang-batang penghantar yang terletak pada alur-alur sekitar permukaan rotor. Ujung-ujung batang penghantar dihubung singkat dengan menggunakan cincin hubung singkat. Jenis rotor sangkar dapat dilihat pada gambar berikut:



**Gambar 2.9 Jenis Rotor Sangkar**

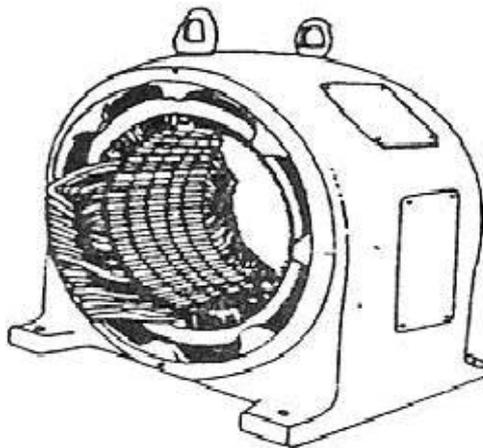
Adapun jenis konstruksi motor induksi terdiri dari:

1. Stator, bagian yang diam
2. Rotor, bagian yang berputar
3. Celah udara, adalah ruang antara stator dan rotor

Konstruksi stator terdiri dari:

1. Rumah stator dari besi tuang
2. Inti stator dari besi lunak atau baja silikon
3. Alur dan gigi materialnya sama dengan inti, alur tempat meletakkan belitan
4. Belitan stator dari tembaga

Belitan sator dirangkai untuk motor induksi tiga fasa tetapi juga dapat di rangkai untuk motor induksi satu fasa, disamping itu juga dirangkai untuk jumlah kutub tertentu. Jenis stator motor induksi dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



**Gambar 2.10 Jenis Stator Motor Induksi**

Konstruksi rotor terdiri dari:

- a. Inti rotor bahannya sama dengan inti stator
- b. Alur dan gigi materialnya sama dengan inti, alur tempat meletakkan belitan
- c. Belitan rotor bahannya dari tembaga
- d. Poros atau as

Rotor dan stator membentuk rangkaian magnetis, berbentuk silindris yang simetris dan diantaranya terdapat celah udara. Celah udara antara stator dan rotor, kalau terlalu luas maka efisiensi rendah, sebaliknya jika terlalu sempit menimbulkan kesukaran mekanis pada mesin. Apabila ada beda perputaran maka akan menimbulkan slip.

Prinsip kerja motor induksi adalah motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator ke kumparan rotor. Garis-garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya sehingga timbul GGL (gaya gerak listrik/tegangan induksi). Karena penghantar rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai arah medan induksi stator. Pada rangka stator terdapat kumparan stator yang ditempatkan pada slot-slotnya yang di lilitkan pada sejumlah kutub tertentu. Jumlah kutub ini menentukan kecepatan berputar medan stator yang terjadi yang di induksikan pada rotornya. Makin besar jumlah kutub akan

mengakibatkan makin kecil kecepatan putar medan stator dan sebaliknya. Kecepatan putar medan putar ini disebut kecepatan sinkron.

### **2.9.2 Aplikasi Generator Induksi pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin**

Generator induksi banyak digunakan pada sistem pembangkit tenaga angin karena mesin atau kincir angin yang memutar generator tidak mengharuskan motor berputar pada kecepatan sinkronnya. Dengan demikian, jika daya yang dibangkitkan tidak mensyaratkan frekuensi dan tegangan tetap, maka generator dapat dioperasikan *stand alone* atau terisolasi/terlepas dari saluran publik.

Jenis beban yang dapat dilayani oleh generator induksi ini diantaranya adalah mesin pompa air, kipas angin, atau pemanas. Angin hampir ada di setiap permukaan bumi, tetapi hanya sedikit daerah yang bisa memanfaatkan angin sebagai sumber energi. Daerah tersebut terutama terdapat dibelahan bumi bagian utara dan selatan, yaitu didaerah dimana keadaan angin cukup stabil kekuatan dan frekuensinya. Contohnya di Swedia dan Jerman dimana banyak unit tenaga angin dibangun di wilayah sepanjang pantai negara ini serta di daerah-daerah pegunungan.

### **2.9.3 Pemasangan Kapasitor**

Jika generator induksi langsung dihubungkan ke jala-jala maka daya reaktif disediakan oleh jala-jala. Jika generator induksi bekerja sendiri, maka diperlukan penyedia daya reaktif dimana daya reaktif tersebut didapat dari kapasitor yang dipasang pada terminal generator tersebut.

Besarnya nilai kapasitor tersebut ditentukan dari diagram Heyland yaitu dari besarnya arus buta yang diperlukan pada beban tertentu dimana:

$$X_c = \frac{V_n}{I_b} \quad (2.26)$$

$$c = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (2.27)$$

Dimana:

$V_n$  = tegangan nominal.

$I_b$  = Arus buta didapat dari diagram Heyland

$X_c$  = reaktansi yang diperlukan untuk menyediakan arus buta

$c$  = nilai kapasitor yang diperlukan untuk menyediakan arus buta

$f$  = frekuensi yang diinginkan