

SKRIPSI

**ANALISIS KESTABILAN FREKUENSI PADA SISTEM SULBAGSEL
DENGAN INTEGRASI PLTA BAKARU II 140 MW**

Disusun dan diajukan oleh

FIRDA FAJRYANI KAMIL

D041181008



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2023

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS KESTABILAN FREKUENSI PADA SISTEM SULBAGSEL DENGAN
INTEGRASI PLTA BAKARU II 140 MW**

Disusun dan diajukan oleh:

FIRDA FAJRYANI KAMIL

D041 18 1008

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 16 Februari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan



Pembimbing I,

Pembimbing II,

Dr. Ir. Zhenab Muslimin, M.T.
NIP. 19660201 199202 2 002

Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T.
NIP. 19731118 199803 2 001

Ketua Departemen Teknik Elektro,

Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.
NIP. 19691026 199412 2 001

LEMBAR PERBAIKAN SKRIPSI

ANALISIS KESTABILAN FREKUENSI PADA SISTEM SULBAGSEL DENGAN INTEGRASI PLTA BAKARU II 140 MW

Oleh:

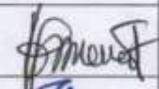
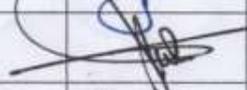
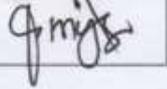
FIRDA FAJRYANI KAMIL

D041 18 1008

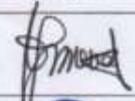
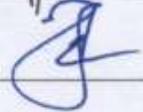
Skripsi ini telah dipertahankan pada Ujian Akhir Sarjana pada tanggal 16 Februari 2023

Telah dilakukan perbaikan penulisan dan isi skripsi berdasarkan usulan dari
penguji dan pembimbing skripsi.

Persetujuan perbaikan oleh tim penguji:

	Nama	Tanda Tangan
Ketua	Dr. Ir. Zaenab Muslimin, M.T.	
Sekretaris	Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T.	
Anggota	Ir. Tajuddin Waris, M.T.	
	Dr. Fitriyanti Mayasari, S.T., M.T.	

Persetujuan perbaikan oleh tim pembimbing:

Pembimbing	Nama	Tanda Tangan
I	Dr. Ir. Zaenab Muslimin, M.T.	
II	Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T.	

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Firda Fajryani Kamil

NIM : D041 18 1008

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

ANALISIS KESTABILAN FREKUENSI PADA SISTEM SULBAGSEL DENGAN INTEGRASI PLTA BAKARU II 140 MW

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 27 Februari 2023

Yang Menyatakan



Firda Fajryani Kamil

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah SWT, penulis panjatkan puji dan syukur atas segala rahmat dan hidayah yang telah dilimpahkan kepada penulis sehingga dengan izin-Nya, skripsi ini dapat dikerjakan hingga selesai. Sholawat beserta salam penulis curahkan kepada kekasih Allah SWT, yaitu Nabi Muhammad SAW yang telah menggulung tikar kejahilian dan membenteng tikar peradaban kepada umat manusia. Berkat perjuangan beliau, penulis bisa mendapatkan banyak ilmu hingga di titik ini.

Penyelesaian skripsi ini merupakan upaya penulis dalam memenuhi salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini berjudul “**Analisis Kestabilan Frekuensi pada Sistem Sulbagsel dengan Integrasi PLTA Bakaru II 140 MW**”. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini mengalami berbagai hambatan. Namun, berkat kegigihan, usaha, dan doa, penulisan skripsi ini akhirnya dapat terselesaikan. Penyusunan skripsi ini juga tidak terlepas dari bantuan, doa, dorongan, semangat serta bimbingan dari berbagai pihak. Tanpa menghilangkan rasa hormat, kami ucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini, antara lain:

1. Ibunda Ir. Kasmiati dan Ayahanda Kamil Pampang, S.E selaku kedua orang tua yang tak henti-hentinya medoakan dan memberikan dukungan baik moral maupun materil kepada penulis. Juga kepada saudaraku Kakanda Karlyana Rachmasari Kamil, S.Mat, Adinda Alif Akbar Kamil, Adinda Muammar Khadafi Kamil, dan Adinda Ary Onassis Kamil.
2. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

3. Ibu Dr. Ir. Hj. Zaenab Muslimin, MT. selaku dosen pembimbing I dan Bapak Dr. Indar Chaerah Gunadin, ST. MT. selaku dosen pembimbing II, terima kasih telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan, gagasan serta ide-ide dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak Ir. Tajuddin Waris, MT. dan Ibu Dr. Fitriyanti Mayasari, ST., MT. selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan masukan serta kritik dan saran guna penyempurnaan tugas akhir ini.
5. Seluruh dosen dan staf pengajar serta pegawai Departemen Teknik Elektro atas segala ilmu, bantuan dan kemudahan yang diberikan selama penulis menempuh proses perkuliahan.
6. Seluruh pihak PT. PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan dan Penyaluran Sulawesi dan PT. PLN (Persero) Unit Pelayanan Pengaturan Beban Makassar serta Unit Layanan PLTA Bakar yang telah membantu dalam memperoleh data-data yang diperlukan dan memberikan masukan mengenai penelitian yang dilakukan.
7. Saudara Muhajir Ahmad Sigi, terima kasih telah menjadi teman berjuang dan teman berbagi cerita.
8. Saudara Fatimah Az-Zahra yang telah menemani perjuangan memperoleh data-data penelitian.
9. Teman-teman seperjuangan Laboratorium Riset Relay Proteksi dan Pengukuran, Aisyah Nur Jihan, Abd. Rahim, Caesar William Alexander dan Irsan Sadri. terima kasih atas kebersamaan, kerjasama, saran dan dukungan yang diberikan.

10. Kepada rekan-rekan CAL18RATOR yang sejak pertama kali menginjakkan kaki di Universitas Hasanuddin hingga saat ini berjuang bersama penulis untuk menuntut ilmu di kampus merah tercinta.
11. Kepada kanda-kanda EQUAL17ER dan EXCITER 16 yang telah memberi masukan dan saran kepada penulis dalam proses penelitian.
12. Rekan-rekan pengurus HME FT-UH Periode 2020 dan MENTOR FAMILY FT-UH yang telah memberi pembelajaran selama periode kepengurusan.
13. Penyelenggara beasiswa BAKTI BCA 2020-2021 dan penyelenggara beasiswa Yayasan Hadji Kalla 2021-2022 yang telah memberikan bantuan dana dan kesempatan menjalani rangkaian program beasiswa.
14. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terdapat dalam skripsi ini, oleh karena itu saran dan kritik dari semua pihak diharapkan untuk kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat diterima sebagai sumbangan pikiran penulis yang mendatangkan manfaat baik bagi penulis maupun pembacanya.

Makassar, 4 Februari 2023



Penulis

ABSTRAK

FIRDA FAJRYANI KAMIL. *Analisis Kestabilan Frekuensi Pada Sistem Sulbagsel Dengan Integrasi PLTA Bakaru II 140 MW* (dibimbing oleh Zaenab Muslimin dan Indar Chaerah Gunadin)

Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030 memuat rencana perubahan sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan (Sulbagsel) salah satunya pembangunan PLTA Bakaru II dengan kapasitas 140 MW. Disisi lain, Pada sistem interkoneksi Sulbagsel, integrasi dari PLTB yang fluktuatif seringkali membuat frekuensi sistem berosilasi. Oleh karena itu dilakukan simulasi kestabilan frekuensi pada sistem Sulbagsel menggunakan *software* Digsilent untuk melihat bagaimana kontribusi integrasi PLTA Bakaru II yang memiliki inersia yang lebih besar, dalam meredam osilasi frekuensi.

Penelitian dimulai dengan pengumpulan data sistem Sulbagsel di kantor UIKL Sulawesi dan UP2B Makassar. Kemudian menggambar SLD sistem Sulbagsel, menginput data pembangkit, interbus, transformator, saluran transmisi, governor, dan beban pada *aplikasi Digsilent Powerfactory 15.1*. Penelitian dilanjutkan dengan melakukan simulasi kestabilan frekuensi pada berbagai macam skenario.

Simulasi pertama dengan skenario integrasi PLTA Bakaru II 140 MW. Simulasi kedua dengan skenario lepas sinkron PLTA Bakaru II 140 MW. Simulasi ketiga dengan skenario PLTB Sidrap tidak membangkitkan daya (0 MW), yang membandingkan keadaan sebelum dan sesudah integrasi PLTA bakaru II. Dan Simulasi keempat dengan skenario pembangkitan maksimum PLTB Sidrap (72.75 MW), yang juga membandingkan keadaan sebelum dan sesudah integrasi PLTA bakaru II.

Hasil simulasi memperlihatkan frekuensi naik menjadi 50.202 Hz ketika integrasi PLTA Bakaru II terjadi, sedangkan saat lepas sinkron PLTA Bakaru II, frekuensi turun menjadi 49.867 Hz. Frekuensi tersebut masih dalam batas frekuensi yang diizinkan. Ketika PLTB tidak membangkitkan daya, frekuensi turun menjadi 49.909 Hz sebelum integrasi, dan 49.944 Hz setelah integrasi PLTA Bakaru II. Sedangkan ketika PLTB membangkitkan daya maksimum, frekuensi naik menjadi 50.183 Hz sebelum integrasi, dan 50.162 Hz setelah integrasi PLTA Bakaru II. Hal ini menunjukkan integrasi PLTA Bakaru II berkontribusi meredam osilasi frekuensi sistem yang disebabkan oleh fluktuasi PLTB.

Kata Kunci: *Kestabilan frekuensi, Integrasi, Lepas sinkron, Inersia, PLTA Bakaru, PLTB Sidrap, Digsilent PowerFactory 15.1*

ABSTRACT

FIRDA FAJRYANI KAMIL. Analysis of Frequency Stability in the South Sulawesi System With the Integration of PLTA Bakaru II CAPACITY 140 MW (supervised by Zaenab Muslimin and Indar Chaerah Gunadin)

PT PLN (Persero)'s Electricity Supply Business Plan (RUPTL) for 2021-2030 includes plans to change the Southern Sulawesi (Sulbagsel) electricity system, one of which is the construction of the Bakaru II hydropower plant with a capacity of 140 MW. On the other hand, in the Sulbagsel interconnection system, fluctuating PLTB integration often makes the system frequency oscillate. Therefore, a frequency stability simulation was carried out in the Sulbagsel system using Digsilent software to see how the integration of the Bakaru II hydropower plant, which has greater inertia, contributes to dampening frequency oscillations.

The research began with collecting data on the Sulbagsel system at the UIKL Sulawesi and UP2B Makassar offices. Then draw the SLD of the Sulbagsel system, input data on generators, interbuses, transformers, transmission lines, governors, and loads on the Digsilent Powerfactory 15.1 application. The research is continued by simulating frequency stability in various scenarios.

The first simulation is with the 140 MW Bakaru II hydropower integration scenario. The second simulation is with the 140 MW Bakaru II hydropower off-synchronous scenario. The third simulation is with the PLTB Sidrap minimum generation scenario (0 MW), which compares the situation before and after the integration of the Bakaru II hydropower plant. And the fourth simulation is with the maximum generation scenario of PLTB Sidrap (72.75 MW), which also compares the situation before and after the integration of PLTA Bakaru II.

The simulation results show that the frequency increases to 50,202 Hz when the integration of PLTA Bakaru II occurs, while when the Bakaru II hydropower is out of sync, the frequency drops to 49,867 Hz. The frequency is still within the permitted frequency limit. When the PLTB generates minimum power, the frequency drops to 49,909 Hz before integration, and 49,944 Hz after the integration of PLTA Bakaru II. Meanwhile, when the PLTB generates maximum power, the frequency increases to 50.183 Hz before integration, and 50.162 Hz after the integration of PLTA Bakaru II. This shows that the integration of PLTA Bakaru II contributes to dampening system frequency oscillations caused by PLTB fluctuations.

Keywords: Frequency stability, Integration, Out of sync, Inertia, PLTA Bakaru, PLTB Sidrap, Digsilent PowerFactory 15.1

DAFTAR ISI

	Halaman
SAMPUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	ii
LEMBAR PERBAIKAN SKRIPSI.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxi
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN.....	xxii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	4

1.3.1 Tujuan Penelitian.....	4
1.3.2 Manfaat Penelitian.....	5
1.4 Ruang Lingkup.....	5
1.5 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II.....	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.2 Sistem Interkoneksi	8
2.2.1 Sistem Interkoneksi Sulawesi Bagaian Selatan (Sulbagsel).....	9
2.3 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	10
2.3.1 Kestabilan Tegangan	13
2.3.2 Kestabilan Sudut rotor.....	13
2.3.3 Kestabilan Frekuensi	13
2.4 Regulasi Frekuensi	22
2.4.1 Tingkatan Kontrol Frekuensi	23
2.4.2 Karakteristik Governor Tiap Pembangkit.....	26
2.5 PLTA Bakaru	28
2.7.1 Gambaran Umum PLTA Bakaru.....	28
2.7.2 Prinsip Kerja PLTA	28
2.7.3 Peralatan Utama PLTA Bakaru.....	29

2.6	Pembangkit Listrik Tenaga Bayu	32
2.6.1	Komponen pada PLTB	32
2.6.2	Jenis Generator Berdasarkan Sumber Eksitasinya	35
2.6.3	Jenis PLTB Berdasarkan Konfigurasi Turbin Angin	38
2.6.4	PLTB Sidrap	39
2.6.5	Dampak PLTB Terhadap Frekuensi Sistem	42
2.7	Penggunaan <i>Software DigSilent</i>	43
BAB III		44
METODE PENELITIAN.....		44
3.1	Rancangan Penelitian	44
3.2	Waktu dan Lokasi Penelitian	45
3.3	Bahan dan Alat.....	45
3.4	Teknik Pengumpulan Data.....	46
3.5	Teknik Pengolahan Data.....	46
3.6	Teknik Analisis Data	55
3.7	Diagram Alir	57
3.7.1	Diagram Alir Penelitian.....	57
3.7.2	Diagram Alir Pembuatan <i>Single Line Diagram</i>	58
3.7.3	Diagram Alir Pelaksanaan Skenario Simulasi	59
3.8	Data Kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan.....	60

BAB IV	87
HASIL DAN PEMBAHASAN	87
4.1 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Sulawesi Bagian Selatan	87
4.2 Pelaksanaan Simulasi	89
4.3 Hasil dan Pembahasan Simulasi.....	90
4.3.1 Simulasi Kestabilan Frekuensi Sebelum dan Sesudah Integrasi PLTA Bakaru II ke Sistem Sulbagsel	90
4.3.2 Simulasi Kestabilan Frekuensi dengan Skenario Lepas Sinkron PLTA Bakaru II 140 MW dari Sistem Sulbagsel	99
4.3.3 Simulasi Kestabilan Frekuensi Sebelum dan Sesudah Integrasi PLTA Bakaru II ke Sistem Sulbagsel dengan Skenario Bahwa PLTB Sidrap Tidak Membangkitkan Daya.....	105
4.3.4 Simulasi Kestabilan Frekuensi Sebelum dan Sesudah Integrasi PLTA Bakaru II ke Sistem Sulbagsel dengan Skenario bahwa PLTB Sidrap Membangkitkan Daya Maksimum	110
4.4 Rekapitulasi Hasil Simulasi	115
4.5 Validasi Simulasi Aliran Daya (<i>Load Flow</i>) Sistem Sulbagsel.....	117
4.5.1 Data Daya bangkitan dan Data Pembebanan Daya Aktif Pada Sistem Sulbagsel.....	117
4.5.2 Hasil Simulasi Aliran Daya pada <i>Software Digsilent</i>	117
4.6 Validasi Simulasi Frekuensi	118

4.6.1 Perhitungan Perubahan Frekuensi Sistem Sulbagsel setelah Penambahan Beban 140 MW Secara Teori	118
4.6.2 Hasil Simulasi Perubahan Frekuensi Sistem Sulbagsel setelah Penambahan Beban 140 MW pada <i>Digsilent Powerfactory 15.1</i>	123
BAB V.....	125
KESIMPULAN DAN SARAN	125
5.1 Kesimpulan	125
5.2 Saran.....	126
DAFTAR PUSTAKA.....	127
LAMPIRAN	130

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2. 1 Rentang Frekuensi Sistem Tenaga Listrik	14
Tabel 3. 1 Data Tegangan dan Arus Saluran Transmisi Sistem Sulbagsel	61
Tabel 3. 2 Data Impedansi Saluran Transmisi Sistem Sulbagsel	66
Tabel 3. 3 Data Pembangkit Sistem Sulbagsel	70
Tabel 3. 4 Data Transformator Distribusi Sistem Sulbagsel	73
Tabel 3. 5 Data Transformator IBT Sistem Sulbagsel	77
Tabel 3. 6 Data Daya Bangkitan Sistem Sulbagsel.....	78
Tabel 3. 7 Data Beban Sistem Sulbagsel.....	80
Tabel 3. 8 Data Daya Bangkitan PLTB Sidrap.....	84
Tabel 3. 9 Data Tipikal Inersia Pembangkit.....	85
Tabel 3. 10 Data Tipikal Governor pada Pembangkit.....	86
Tabel 4. 1 Frekuensi Sistem Sulbagsel Sebelum dan Setelah Integrasi PLTA Bakaru II Tanpa Penambahan Beban	93
Tabel 4. 2 Frekuensi Sistem Sulbagsel Sebelum dan Setelah Integrasi PLTA Bakaru II Dengan Penambahan Beban.....	95
Tabel 4. 3 Pembangkitan Daya Aktif Maksimum Tiap Pembangkit pada Sistem Sulbagsel.....	102
Tabel 4. 4 Frekuensi Sistem Sulbagsel Sebelum dan Setelah Lepas Sinkron PLTA Bakaru II 140 MW	104

Tabel 4. 5 Frekuensi Sistem Sulbagsel Sebelum Integrasi PLTA Bakaru II dengan Skenario Tidak Adanya Pembangkitan Daya PLTB Sidrap.....	106
Tabel 4. 6 Frekuensi Sistem Sulbagsel Setelah Integrasi PLTA Bakaru II dengan Skenario Tidak Adanya Pembangkitan Daya PLTB Sidrap.....	108
Tabel 4. 7 Frekuensi Sistem Sulbagsel Sebelum Integrasi PLTA Bakaru II dengan Skenario Pembangkitan Maksimum PLTB Sidrap	111
Tabel 4. 8 Frekuensi Sistem Sulbagsel Setelah Integrasi PLTA Bakaru II dengan Skenario Pembangkitan Maksimum PLTB Sidrap	113
Tabel 4. 9 Rekapitulasi Hasil Simulasi	115
Tabel 4. 10 Data <i>Speed Droop</i> Governor tiap Pembangkit	119
Tabel 4. 11 Data Nilai Patisipasi Faktor tiap Governor Pembangkit.....	121

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Dampak PLTB terhadap frekuensi sistem Sulbagsel.....	3
Gambar 2.1 Single Line Diagram Sistem Tenaga Listrik	7
Gambar 2.2 Sistem Interkoneksi.....	8
Gambar 2.3 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	12
Gambar 2.4 Ilustrasi Kestabilan Frekuensi.....	21
Gambar 2.5 Tingkatan Kontrol Frekuensi Sistem	24
Gambar 2.6 Diagram Perubahan Frekuensi Terhadap Beban.....	25
Gambar 2.7 Proses Konversi Energi pada PLTA	29
Gambar 2.8 Generator PLTA Bakaru I	31
Gambar 2.9 Transformator PLTA Bakaru I	31
Gambar 2.10 Komponen-Komponen pada PLTB.....	40
Gambar 3.1 Pembuatan Project Baru Pada Aplikasi Digsilent.....	47
Gambar 3.2 Letak Komponen pada Aplikasi Digsilent	47
Gambar 3.3 Penginputan Data Bus pada Aplikasi Digsilent.....	48
Gambar 3.4 Penginputan Data Line pada Aplikasi Digsilent.....	48
Gambar 3.5 Penginputan Data Pembangkit pada Aplikasi Digsilent	49
Gambar 3.6 Penginputan Data Transformator pada Aplikasi Digsilent.....	50
Gambar 3.7 Penginputan Data Beban pada Aplikasi Digsilent	50
Gambar 3.8 Penginputan Data Pembangkitan Generator pada Aplikasi Digsilent	51

Gambar 3. 9 Penginputan Data Inersia pada Aplikasi Digsilent	52
Gambar 3. 10 Penginputan Data Governor pada Aplikasi Digsilent	52
Gambar 3. 11 Pemodelan Skenario Simulasi pada Aplikasi Digsilent	53
Gambar 3. 12 <i>Icon Calculate Load Flow</i> pada Aplikasi Disgsilent	53
Gambar 3. 13 Simulasi Aliran Daya pada Aplikasi Digsilent	54
Gambar 3. 14 <i>Icon Calculate Initial Conditions</i> pada Aplikasi Disgsilent.....	54
Gambar 3. 15 Simulasi Transien pada Aplikasi Digsilent	55
Gambar 3.16 Diagram Alir Penelitian.....	57
Gambar 3. 17 Diagram Alir Pembuatan Single Line Diagram.....	58
Gambar 3. 18 Diagram Alir Pelaksanaan Simulasi.....	59
Gambar 4.1 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Sulbagsel 2022	88
Gambar 4.2 Simulasi Frekuensi Pada Sistem Sulbagsel sebelum integrasi PLTA Bakaru II.....	90
Gambar 4.3 Letak PLTA Bakaru II pada Sistem Interkoneksi Sulbagsel.....	91
Gambar 4.4 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel setelah integrasi PLTA Bakaru II Tanpa Penambahan Beban	92
Gambar 4.5 Simulasi Frekuensi Pada Sistem Sulbagsel setelah integrasi PLTA Bakaru II Dengan Penambahan Beban.....	94
Gambar 4. 6 Perubahan Daya Bangkitan Pembangkit	96
Gambar 4.7 Perbandingan Frekuensi Sistem Sulbagsel Sebelum dan sesudah Integrasi PLTA Bakaru II 140 MW	97
Gambar 4.8 Perbandingan Daya Aktif Sebelum dan Sesudah Integrasi PLTA Bakaru II 140 MW	98

Gambar 4.9 Simulasi Frekuensi Pada Sistem Sulbagsel Skenario Lepas Sinkron PLTA Bakaru II Dengan Adanya Governor.....	99
Gambar 4.10 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Sulbagsel Dengan Simulasi Lepas Sinkron PLTA Bakaru II Menggunakan Governor.....	100
Gambar 4.11 Kondisi Lepas Sinkron PLTA Bakaru II Dengan Menggunakan Governor.....	101
Gambar 4.12 Simulasi Frekuensi Pada Sistem Sulbagsel Sebelum Integrasi PLTA Bakaru II dengan Skenario Pembangkitan Daya Minimum PLTB Sidrap	105
Gambar 4.13 Simulasi Frekuensi Pada Sistem Sulbagsel Setelah Integrasi PLTA Bakaru II dengan Skenario Pembangkitan Daya Minimum PLTB Sidrap	107
Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Frekuensi Sistem Sulbagsel Sebelum dan Sesudah Integrasi PLTA Bakaru II dengan Skenario Pembangkitan Daya Minimum PLTB Sidrap.....	109
Gambar 4.15 Simulasi Frekuensi Pada Sistem Sulbagsel Sebelum Integrasi PLTA Bakaru II dengan Skenario Pembangkitan Daya Maksimum PLTB Sidrap	110
Gambar 4.16 Simulasi Frekuensi Pada Sistem Sulbagsel Setelah Integrasi PLTA Bakaru II dengan Skenario Pembangkitan Daya Maksimum PLTB Sidrap	112

Gambar 4.17 Grafik Perbandingan Frekuensi Sistem Sulbagsel Sebelum dan Setelah Integrasi PLTA Bakaru II dengan Skenario Pembangkitan Daya Maksimum PLTB Sidrap.....	114
Gambar 4. 18 Hasil Simulasi Aliran Daya (<i>Load Flow</i>) Sistem Sulbagsel.....	117
Gambar 4. 19 Perubahan Frekuensi Sistem Sulbagsel setelah Penambahan Beban 140 MW pada <i>Digsilent Powerfactory 15.1</i>	123

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Single Line Diagram Sistem Sulbagsel September 2022.....	131
Lampiran 2. Data Tipikal Line Transmisi.....	132
Lampiran 3. Balasan Surat Permohonan Penelitian di PT.PLN (Persero) UP2B Makassar	134
Lampiran 4. Balasan Surat Permohonan Penelitian di PT.PLN (Persero) UIKL Sulawesi	135
Lampiran 5 Surat Penugasan Pembimbing Skripsi.....	136
Lampiran 6 Surat Penugasan Tim Penguji Sidang Skripsi.....	137

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
A	Ampere, satuan arus listrik
BP	Beban Puncak
EBT	Energi Baru Terbarukan
ESDM	Energi dan Sumber Daya Mineral
HP	Horsepower, satuan daya yang setara dengan tenaga kuda
Hz	Hertz, satuan frekuensi
IBT	Interbus Transformer, transformator antarbus
IPP	Independent Power Producer, perusahaan pembangkitan independent
kV	Kilo Volt, satuan tegangan listrik
MVA	Mega Volt Ampere, satuan daya semu
MW	Mega Watt, satuan daya aktif
Mdpl	Meter di atas permukaan laut
PLN	Perusahaan Listrik Negara
PLTA	Pembangkit Listrik Tenaga Air
PLTB	Pembangkit Listrik Tenaga Bayu
Pu	Per-Unit, satuan sistem per unit
R	Resistansi

Rms	Root Mean Square, nilai besaran sinyal AC yang setara dengan nilai besaran DC
Rpm	Revolution Per Minute, putaran dalam satu menit
Sulbagsel	Sulawesi bagian selatan
Sulbar	Sulawesi barat
Sulteng	Sulawesi tengah
Sultra	Sulawesi utara
SUTET	Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi
UIKL	Unit Induk Pembangkit dan Penyaluran
UP2B	Unit Pelayanan dan Pengaturan Beban
V	Volt, satuan tegangan listrik
VA	Volt Ampere, satuan daya semu
VAR	Volt Ampere Reactive, satuan daya reaktif
W	Watt, satuan daya aktif
X	Reaktansi

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara umum, sumber energi terbagi menjadi dua yaitu sumber energi tidak terbarukan (energi konvensional) dan sumber energi baru terbarukan (*renewable energy*). Energi tak terbarukan adalah energi yang diperoleh dari sumber daya alam yang waktu pembentukannya sampai jutaan tahun. Contoh sumber energi tak terbarukan adalah yang berasal dari energi fosil dan nuklir yakni minyak bumi, batu bara, dan gas alam. Penggunaan sumber energi tak terbarukan di Indonesia saat ini masih mendominasi karena kelebihannya yaitu mudah diperoleh dan harga yang relatif lebih murah sehingga dapat digunakan untuk perkembangan, kemajuan, dan pertumbuhan perekonomian kedepannya atau di masa yang akan datang. Namun seiring berjalannya waktu, mulai muncul keresahan dari penggunaan sumber energi tak terbarukan karena persediaan yang makin menipis serta berbagai dampak negatif yang ditimbulkan yakni meningkatnya polusi berupa racun dalam udara karena pembakaran, menyebabkan hujan asam, menyebabkan pencemaran lingkungan tanah dan air akibat limbah pengelolaannya, meningkatkan efek buruk pada pemanasan global, serta mempengaruhi perubahan iklim yang ekstrim.

Dari keresahan tersebut, manusia kemudian mulai beralih sedikit demi sedikit untuk menggunakan sumber energi baru terbarukan. Energi terbarukan adalah sumber energi yang cepat dipulihkan kembali secara alami dan prosesnya berkelanjutan. Energi terbarukan dihasilkan dari sumber energi yang secara alami tidak akan habis bahkan berkelanjutan jika dikelola dengan baik. Selain itu, energi terbarukan diyakini lebih bersih (ramah lingkungan), aman, dan terjangkau masyarakat. Penggunaan energi terbarukan lebih ramah lingkungan karena mampu mengurangi pencemaran lingkungan dan kerusakan lingkungan dibanding energi tidak terbarukan.

Berangkat dari hal tersebut, Pemerintah Indonesia terus memacu pemanfaatan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) dapat berjalan optimal demi mencapai target bauran sebesar 23% pada tahun 2025. Pemerintah pun menargetkan akan ada penambahan kapasitas terpasang PLT EBT sebesar 905,73 Mega Watt (MW), terdiri dari 196 MW dari PLT Panas Bumi, 557,93 MW dari PLT Air, 138,8 MW dari PLT Surya, dan 13 MW dari PLT Bio (Humas EBKTE, 2021).

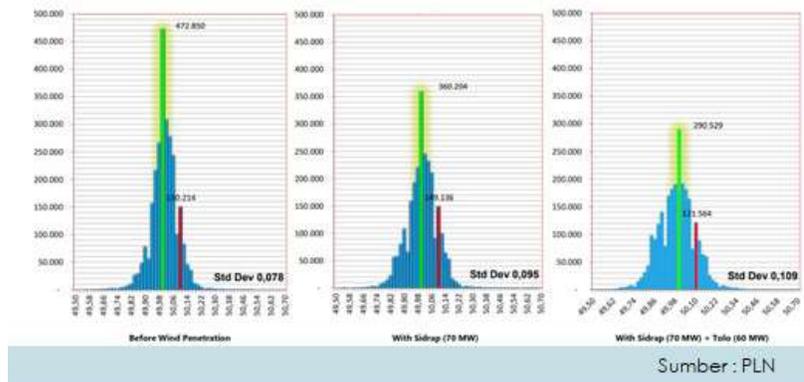
Untuk mencapai target tersebut, Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030 memuat rencana perubahan sistem tenaga listrik di berbagai daerah termasuk Sulawesi Bagian Selatan (Sulbagsel). Rencana pengembangan sistem untuk memenuhi kebutuhan beban di Sulawesi periode tahun 2021-2030 dirincikan sebagai berikut:

- Tambahan kapasitas pembangkit tahun 2021-2030 adalah 3.157 MW atau penambahan kapasitas rata-rata 316 MW per tahun.
- Porsi terbesar penambahan pembangkit adalah PLTA/PLTM yang mencapai 1.600 MW (50,7%) disusul PLTG/GU/MG 390 GW (12,4%), PLTU Batubara 506 MW (16,0%), PLT EBT *base* 230 MW (7,3%), PLTP 75 MW (2,4%), kemudian pembangkit EBT lainnya 356 MW (11,3%) berupa PLTS 176 MW, PLTB 130 MW dan PLTBm 50 MW.
- Rencana pengembangan PLTS termasuk PLTS Lises, PLTS Dedieselisasi dan PLTS Grid (terkoneksi ke sistem).

Sebagai upaya untuk mengoptimalkan target tersebut, pada wilayah Sulawesi Bagian Selatan (Sulbagsel) diupayakan beberapa proyek pembangunan pembangkit listrik, salah satunya ada PLTA Bakaru II dengan kapasitas 140 MW (Kementrian ESDM, 2021).

PLTA Bakaru merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan energi potensial dan energi kinetik air untuk menghasilkan energi mekanik yang dapat memutar turbin yang terkopel dengan generator sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Proyek ini direncanakan akan rampung pada tahun 2025. Masuknya pembangkit baru pada sistem interkoneksi Sulbagsel tentunya mempengaruhi kestabilan frekuensi sistem Sulbagsel yang merupakan sistem interkoneksi dengan pembangkit lainnya.

Pada sistem interkoneksi Sulbagsel saat ini, adanya pembangkit listrik tenaga bayu seperti PLTB Sidrap dan PLTB Tolo membuat frekuensi sistem yang stabil dalam jangka waktu yang lama, menjadi stabil dalam waktu yang lebih pendek dari sebelum adanya integrasi PLTB. Dengan kata lain, integrasi PLTB membuat frekuensi normal yaitu 50 Hz berubah-ubah dengan cepat seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Dampak PLTB terhadap frekuensi sistem Sulbagsel (PT. PLN Persero)

Dengan adanya integrasi PLTA Bakaru II dengan inersia yang lebih tinggi pada Sistem Sulbagsel, diharapkan mampu meredam adanya osilasi frekuensi yang terjadi pada sistem yang disebabkan oleh perubahan kecepatan angin pada PLTB Sidrap dan PLTB Tolo yang membuat sistem tidak seimbang.

Apabila terjadi masalah pada pembangkit yang menyebabkan pembangkit secara tiba-tiba mengalami lepas sinkron dari sistem, maka beberapa kemungkinan yang terjadi adalah terjadinya gangguan frekuensi. Ketika generator pada sistem tersebut bekerja diluar rentang frekuensi kerja, maka generator akan cepat mengalami kerusakan. Sebab itu perlu dilakukan regulasi frekuensi yang dapat mengatur keseimbangan daya aktif pada sistem untuk meminimalisasi terjadinya gangguan frekuensi pada sistem interkoneksi. Oleh karena itu, akan dianalisis bagaimana keadaan frekuensi sistem apabila PLTA Bakaru II tiba-tiba lepas dari sistem dengan adanya regulasi frekuensi primer berupa governor untuk mengetahui apakah metode regulasi tersebut masih mampu menjaga kestabilan frekuensi atau tidak.

Berdasarkan masalah diatas maka dilakukan sebuah penelitian yang berjudul “**Analisis Kestabilan Frekuensi pada Sistem Sulbagsel dengan Integrasi PLTA Bakaru II 140 MW**” yang akan disimulasikan menggunakan *software Digsilent*. Dalam penelitian ini, akan dibandingkan kestabilan frekuensi pada sistem Sulbagsel sebelum dan sesudah masuknya PLTA Bakaru II, kemudian akan dianalisis kestabilan frekuensi ketika PLTA II Bakaru tiba-tiba lepas dalam sistem dengan adanya regulasi frekuensi, serta akan dianalisis pengaruh kestabilan frekuensi setelah masuknya PLTA Bakaru ke sistem apabila PLTB Sidrap mengalami fluktuasi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana perbandingan kestabilan frekuensi sistem Sulbagsel sebelum dan sesudah masuknya PLTA Bakaru II 140 MW?
2. Bagaimana kestabilan frekuensi sistem Sulbagsel ketika PLTA Bakaru II 140 MW tiba-tiba lepas dari sistem dengan adanya regulasi frekuensi?
3. Bagaimana pengaruh kestabilan frekuensi setelah masuknya PLTA Bakaru II 140 MW ke sistem apabila PLTB Sidrap mengalami fluktuasi?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.3.1 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini antara lain:

1. Menganalisis perbandingan kestabilan frekuensi sistem Sulbagsel sebelum dan sesudah masuknya PLTA Bakaru II 140 MW.
2. Menganalisis kestabilan frekuensi sistem Sulbagsel ketika PLTA II Bakaru 140 MW tiba-tiba lepas dari sistem dengan adanya regulasi frekuensi.

3. Menganalisis pengaruh kestabilan frekuensi setelah masuknya PLTA II Bakaru ke sistem apabila PLTB Sidrap mengalami fluktuasi.

1.3.2 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Secara akademis, penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat bagi penambahan referensi yang berkaitan dengan analisis kestabilan frekuensi di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Secara praktis, penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat untuk pihak PT PLN (Persero) UP2B Sistem Makassar sebagai bahan masukan dalam sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan (Sulbagsel) untuk mengatasi gangguan kestabilan frekuensi setelah masuknya pembangkit baru.

1.4 Ruang Lingkup

Untuk menghindari permasalahan yang lebih luas maka penelitian ini dibatasi pada ruang lingkup sebagai berikut:

1. Sistem kelistrikan yang dianalisis adalah sistem interkoneksi Sulbagsel.
2. Jenis kestabilan yang disimulasikan merupakan kestabilan frekuensi.
3. Perangkat lunak yang digunakan *Digsilent Powerfactory 15.1*.
4. Perkiraan beban dan pembangkitan yang digunakan berdasarkan data dari PT. PLN (Persero) UP2B Sistem Makassar pada tanggal 16 September 2022 pukul 19.00 WITA.
5. Simulasi lepasnya PLTA Bakaru II 140 MW dari sistem menggunakan regulasi frekuensi primer berupa governor.
6. Tidak membahas lebih lanjut mengenai regulasi frekuensi yang bekerja selanjutnya apabila governor tidak mampu menjaga kestabilan frekuensi saat terjadi gangguan.

1.5 Sistematika Penulisan

Agar Penyusunan tugas akhir ini lebih teratur dan sistematis penulisannya, maka hal-hal yang dibahas dibagi dalam beberapa bab yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi 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 rancangan penelitian, lokasi penelitian, waktu penelitian, peralatan penelitian, metode analisis data dan alur penelitian serta data kelistrikan sistem Sulbagsel.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memuat hasil analisis kestabilan frekuensi yang diperoleh dengan menggunakan *software Digsilent* berdasarkan data yang telah diperoleh serta membahas hasil tersebut dalam bentuk narasi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil analisis dan saran-saran.

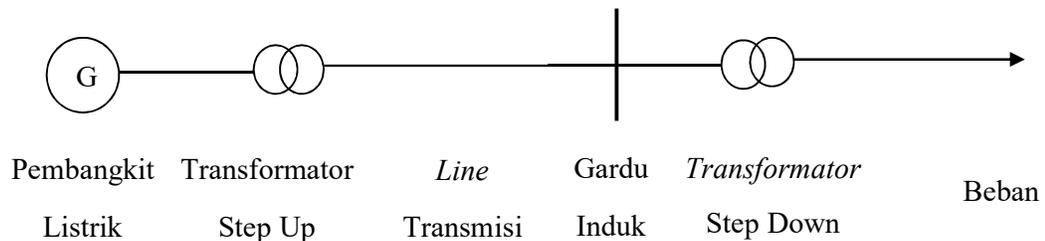
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang terdiri dari berbagai komponen diantaranya yaitu pembangkit, transmisi, distribusi, dan beban yang saling berkesinambungan untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai dengan kebutuhan.

Secara garis besar, sistem tenaga listrik diilustrasikan seperti Gambar 2.1 yang terdiri dari komponen kelistrikan.



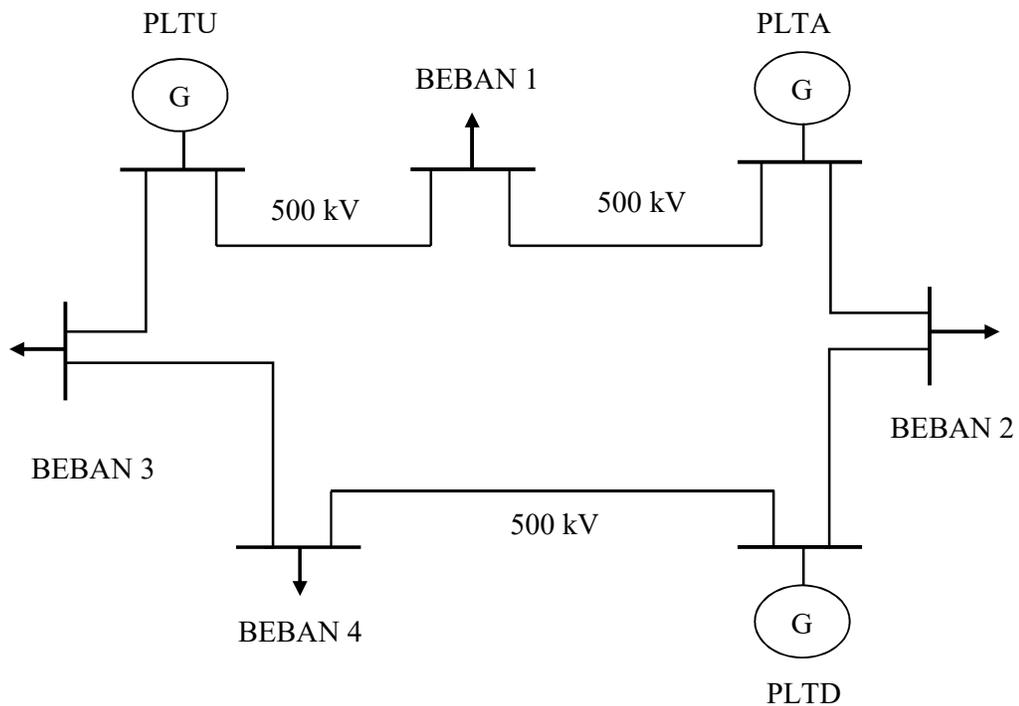
Gambar 2.1 *Single Line Diagram* Sistem Tenaga Listrik (Suripto, 2016)

Fungsi masing-masing komponen pada Gambar 2.1 yaitu:

1. Pembangkit berfungsi membangkitkan tenaga listrik dengan cara mengkonversi energi yang berasal dari sumber energi lain misalnya air, batu bara, atau cahaya matahari menjadi energi listrik.
2. Transformator merupakan komponen elektrik yang berfungsi menaikkan atau menurunkan tegangan berdasarkan dengan prinsip induksi elektromagnetik.

3. Transmisi merupakan komponen yang berfungsi menyalurkan daya atau energi menggunakan kabel penghantar dari pusat pembangkitan ke pusat beban melalui gardu induk.
4. Distribusi merupakan komponen yang berfungsi mendistribusikan energi listrik dari gardu distribusi ke lokasi konsumen energi listrik berupa pabrik, industri, atau perumahan.
5. Beban adalah peralatan listrik di lokasi konsumen yang memanfaatkan energi listrik dari sistem tersebut (Suripto, 2016).

2.2 Sistem Interkoneksi



Gambar 2.2 Sistem Interkoneksi (Suripto, 2016)

Gambar 2.2 merupakan sistem interkoneksi sederhana yang memuat beberapa sistem pembangkit yang melayani beberapa macam beban yang ada pada lokasi yang berbeda. Untuk memperoleh kualitas pelayanan yang lebih baik, maka seluruh sistem sebaiknya saling berhubungan atau terinterkoneksi sehingga dapat

dikendalikan dari satu tempat saja. Demikian pula kebutuhan daya yang dapat melayani pusat beban dimana saja sekalipun lokasi pembangkitnya berada jauh dari beban tersebut. Sistem tersebut dinamakan sistem interkoneksi. Dengan sistem ini diharapkan kualitas pelayanan dapat menjadi lebih baik.

Dengan sistem interkoneksi, sistem tenaga listrik menjadi lebih kompleks sehingga biaya pembangunan dan opsionalnya menjadi lebih besar dan pengelolaannya menjadi lebih rumit. Dengan demikian sistem interkoneksi hanya digunakan pada sistem tenaga listrik dengan daya besar dan memerlukan standar kualitas pelayanan yang tinggi (Suripto, 2016).

2.2.1 Sistem Interkoneksi Sulawesi Bagaian Selatan (Sulbagsel)

Transmisi 150 kV yang menghubungkan antara sistem Sulbagsel dengan sistem Sultra telah beroperasi, sehingga sistem Sulbagsel saat ini telah menghubungkan empat provinsi di Pulau Sulawesi. Pada sistem Sulbagsel akan tersambung beberapa proyek PLTA skala besar yang letaknya di sekitar perbatasan Sulsel, Sulbar dan Sulteng. Sedangkan potensi beban industri besar pengolahan mineral/tambang diperkirakan akan banyak dibangun di Sultra sebagai sumber utama bahan mentah mineral seperti nikel. Makassar dan sekitarnya yang merupakan pusat beban, diperkirakan masih akan terus tumbuh cukup tinggi.

Sedangkan di sisi lain, jarak antara pusat pembangkit listrik tenaga air (PLTA) skala besar ke pusat beban sangat berjauhan, sehingga untuk menyalurkan daya perlu dibangun SUTET sebagai *backbone* (jaringan yang menghubungkan pembangkit ke beban menggunakan transmisi tegangan tinggi). Potensi pembangkit listrik tenaga air banyak berlokasi di Sulawesi Selatan bagian utara dan Sulawesi Tengah. Untuk menyalurkan dayanya ke pusat beban (Sulawesi bagian selatan) termasuk untuk melayani beban smelter di Kabupaten Bantaeng, direncanakan akan dibangun transmisi *Extra High Voltage* (EHV) dengan konstruksi tegangan 275 kV yang harus selesai pada tahun 2027, khususnya ruas transmisi PLTA Bakar II-Palopo-Sidrap-Maros/Daya Baru-Punagaya (Kementrian ESDM, 2021).

2.3 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik dapat dikatakan baik jika memenuhi syarat sebagai berikut:

1. Keandalan (*Reliability*) yaitu kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus-menerus.
2. Kualitas (*Quality*) yaitu kemampuan suatu sistem untuk menghasilkan besaran-besaran sesuai standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. Kestabilan (*Stability*) yaitu kemampuan suatu sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan kelistrikan.

Sistem tenaga listrik dapat dikatakan baik apabila telah memenuhi ketiga syarat tersebut. Dalam artian, sistem tenaga listrik harus mampu menyalurkan daya listrik secara terus menerus dengan standar tegangan dan frekuensi sesuai dengan aturan yang ditetapkan 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. Jika terjadi gangguan pada pembangkit tertentu atau pada sistem transmisi tertentu, maka akan mengakibatkan kerja dari pembangkit yang lain menjadi lebih berat. Untuk itu, diperlukan suatu analisis kestabilan agar pembangkit yang terganggu tidak lepas dari sistem (Kundur, 1994).

Menurut Stevenson (1983), analisis kestabilan biasanya digolongkan kedalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan yaitu:

- a. Kestabilan keadaan tetap (*Steady State Stability*)

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. Model pembangkit yang digunakan adalah pembangkit yang sederhana (sumber tegangan konstan) karena hanya menyangkut gangguan kecil disekitar titik keseimbangan (Rosalina, 2010).

b. Kestabilan dinamis (*Dynamic Stability*)

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. Analisis kestabilan dinamis lebih kompleks karena juga memasukkan komponen kontrol otomatis dalam perhitungannya (Rosalina, 2010).

c. Kestabilan peralihan (*Transient Stability*)

Kestabilan peralihan adalah kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan atau sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan stabilitas karena gangguan terjadi diatas kemampuan sistem (Rosalina, 2010).

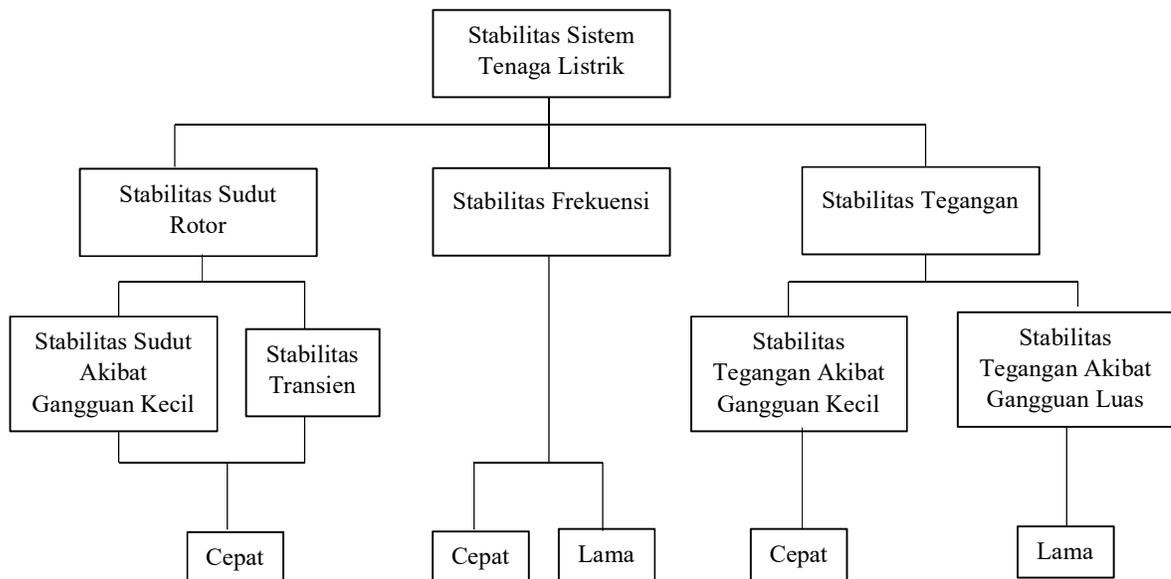
Analisis kestabilan peralihan merupakan analisis yang utama untuk menelaah perilaku sistem daya misalnya gangguan yang berupa:

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

Sistem daya listrik masa kini jauh lebih luas, ditambah interkoneksi antar sistem yang rumit dan melibatkan beratus-ratus mesin yang secara dinamis saling mempengaruhi melalui perantara jala-jala tegangan ekstra tinggi, mesin-mesin ini mempunyai sistem penguatan yang berhubungan. Kisaran masalah yang dianalisis banyak menyangkut gangguan yang besar dan tidak lagi memungkinkan menggunakan proses kelinieran. 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, 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 (Rosalina, 2010).

Transien atau peralihan merupakan suatu keluaran dari keadaan perubahan mendadak pada sistem tenaga listrik pada saat terjadi *switching* saluran atau timbulnya gangguan pada sistem tersebut. Waktu transien umumnya sangat singkat dibandingkan dengan waktu keadaan tunak. Masa transien menjadi sangat penting dalam sistem karena pada masa tersebut suatu perubahan mendadak akan termanifestasikan baik dalam bentuk arus maupun tegangan yang kadangkala dalam hal ekstrim akan mengakibatkan kerusakan fatal pada sistem tenaga listrik (Winarsih, 2002).



Gambar 2.3 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik (Kundur, 1994)

Gambar 2.3 merupakan klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik. Klasifikasi ini berdasarkan pada rentang waktu dan mekanisme terjadinya ketidakstabilan tersebut. Secara umum permasalahan kestabilan pada sistem tenaga

listrik berupa gangguan pada kestabilan sudut rotor (*Rotor Angle Stability*), kestabilan tegangan (*Voltage Stability*), dan kestabilan frekuensi (*Frequency Stability*) (Sadaat, 1999).

2.3.1 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan dari level tegangan di semua bus sesuai dengan batas yang diizinkan apabila terjadi gangguan pada sistem. Sebuah sistem dapat dikatakan stabil apabila mampu menjaga naik turunnya level tegangan pada batas yang sesuai standar dalam jangka waktu yang diizinkan saat terjadi keadaan tidak seimbang antara beban dan pembangkit. Sebaliknya sistem dikatakan tidak stabil apabila tidak dapat mengembalikan keadaan menjadi normal setelah gangguan terjadi. Salah satu penyebab ketidakstabilan adalah ketidaksinkronan antara kebutuhan beban dan pembangkitan. Biasanya gangguan yang terjadi adalah lepasnya beban yang signifikan atau lepasnya generator dari sistem sehingga tegangan beresilasi tidak stabil (Samondra, 2018).

2.3.2 Kestabilan Sudut rotor

Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari dua generator atau lebih yang saling terhubung pada sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi dalam kondisi operasi normal dan dalam kondisi setelah mengalami gangguan. Ketidakstabilan pada sudut rotor dapat terjadi karena adanya peningkatan ayunan sudut dari beberapa generator yang menyebabkan hilangnya sinkronisasi pada generator (Samondra, 2018).

2.3.3 Kestabilan Frekuensi

Pada suatu sistem tenaga listrik, besaran frekuensi merupakan indikator dari keseimbangan antara total daya yang dibangkitkan dengan total beban pada sistem.

Frekuensi sistem akan turun bila terjadi kekurangan pembangkitan atau kelebihan beban. Penurunan frekuensi yang cukup besar dapat menyebabkan kegagalan dari unit-unit pembangkitan secara beruntun yang kemudian mengakibatkan kegagalan sistem secara total. Pelepasan sebagian beban secara otomatis dapat dilakukan dengan menggunakan relay frekuensi (*under frequency relay*) yang mencegah penurunan frekuensi dan mengembalikan kondisi frekuensi menjadi normal (Marsudi, 2006).

Salah satu karakteristik pada sistem tenaga listrik yang sangat penting untuk dijaga kestabilannya adalah frekuensi. Pentingnya menjaga frekuensi berkaitan erat dengan upaya untuk menyediakan sumber energi yang berkualitas bagi konsumen. Pasokan energi dengan frekuensi yang berkualitas baik akan menghindarkan peralatan konsumen dari kerusakan (umumnya peralatan listrik di Indonesia dirancang untuk dapat bekerja secara optimal pada batasan frekuensi tertentu saja seperti 50 s.d 60 Hz). Pengendalian frekuensi tidak semata untuk memuaskan pelanggan, tindakan ini juga bertujuan untuk menjaga kestabilan sistem. Batas frekuensi sistem yang diperbolehkan di Indonesia diatur dalam Peraturan Menteri ESDM Nomor 20 Tahun 2022 seperti pada Tabel 2.1 yang memuat bahwa batas frekuensi normal yang diizinkan untuk beroperasi secara terus menerus yaitu pada rentan 49 sampai dengan 51 Hz.

Tabel 2. 1 Rentang Frekuensi Sistem Tenaga Listrik

RENTANG FREKUENSI	RENTANG WAKTU OPERASI
$51,50 \text{ Hz} < f \leq 52,00 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 15 menit
$51,00 \text{ Hz} < f \leq 51,50 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
$49,00 \text{ Hz} < f \leq 51,00 \text{ Hz}$	Beroperasi secara terus menerus
$47,50 \text{ Hz} < f \leq 49,00 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
$47,00 \text{ Hz} < f \leq 47,50 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 6 menit

Sumber: Peraturan Menteri ESDM No.20 (2020)

2.3.3.1 Penyebab Gangguan Frekuensi

Pada dasarnya setiap generator memiliki spesifikasi tertentu berkaitan dengan rentang frekuensi kerja yang diizinkan beserta waktu operasi dari frekuensi tersebut. Ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban akan menyebabkan frekuensi bergeser menjadi lebih kecil dari nilai normalnya. Dalam hal ini ketika pembangkitan lebih kecil daripada beban maka frekuensi sistem akan lebih kecil dari 50 Hz, begitu pula sebaliknya. Oleh karena itu perlu selalu dijaga keadaan yang seimbang antara pembangkitan dan beban agar tercipta frekuensi sistem yang normal yaitu 50 Hz.

Penurunan frekuensi yang disebabkan oleh adanya beban lebih sangat membahayakan generator. Hal ini diakibatkan oleh kondisi generator yang mengalami kekurangan daya aktif sehingga daya aktif yang dihasilkan generator tidak dapat memenuhi permintaan beban. Akibatnya frekuensi yang dimiliki generator semakin lama semakin menurun. Ketika laju penurunan frekuensi menurun tajam, hal terburuk yang mungkin terjadi adalah pemadaman total. Namun, apabila laju penurunan frekuensi tidak terlalu tajam, dapat segera dilakukan pelepasan beban (Nugraheni, 2011).

Suatu generator akan berputar dengan frekuensi yang semakin menurun apabila kopel penggerak mekanik generator besarnya kurang dari torsi beban. Ketika terdapat generator pembangkit lain yang berada dalam suatu interkoneksi lepas atau keluar dari sistem, secara otomatis beban yang ditanggung pembangkit yang lepas akan menjadi tanggungan generator yang masih bekerja dalam sistem. Dengan demikian torsi beban pada generator yang masih mampu bekerja akan bertambah. Peningkatan torsi beban pada generator ini akan diimbangi dengan peningkatan kopel mekanik penggerak generator dengan melakukan pengaturan pada governor untuk mempertahankan frekuensi kerja sistem tetap konstan. Namun, pada saat governor telah dibuka secara maksimal untuk mengalirkan sumber energi penggerak turbin, kopel penggerak mekanik generator besarnya masih kurang dari torsi beban, hal inilah yang menjadikan frekuensi generator menjadi turun. Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan suatu pengurangan torsi

beban dengan beberapa cara diantaranya adalah pelepasan beban (Nugraheni, 2011).

2.3.3.2 Hubungan Antara Frekuensi dan Daya Aktif

Sistem tenaga listrik harus mampu menyediakan tenaga listrik bagi para pelanggan dengan frekuensi yang konstan. Penyimpangan frekuensi dari nilai nominal harus selalu dalam batas toleransi yang diperbolehkan. Daya aktif mempunyai hubungan erat dengan nilai frekuensi dalam sistem, sedangkan beban sistem yang berupa daya aktif maupun reaktif selalu berubah sepanjang waktu. Untuk mempertahankan frekuensi dalam batas toleransi yang diperbolehkan, penyediaan atau pembangkitan daya aktif dalam sistem harus disesuaikan dengan kebutuhan pelanggan atas daya aktif, harus selalu disesuaikan dengan beban daya aktif. Penyesuaian daya aktif ini dilakukan dengan mengatur besarnya kopel penggerak generator (Marsudi, 2016).

Menurut Nugraheni (2011) daya dalam gerak lurus dapat didefinisikan sebagai gaya yang dialami suatu benda yang bergerak pada jarak tertentu per satuan waktu. Hal ini juga berlaku bagi daya yang dihasilkan generator. Generator memiliki bagian yang berputar, sehingga tinjauan daya yang dihasilkan generator adalah daya yang dihasilkan oleh suatu benda berputar (rotasi) dan bukan merupakan benda statis. Oleh sebab itu, daya yang dihasilkan generator dapat didefinisikan sebagai momen gaya (torsi) yang dialami generator yang berputar sebesar sudut tertentu per satuan waktu seperti pada persamaan 1.

$$P = \tau \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

Keterangan:

P = daya yang dibangkitkan generator (Watt)

τ = momen gaya/kopel mekanik generator (Nm)

θ = sudut rotasi (rad)

t = waktu (s)

Besarnya perubahan sudut rotasi dari bagian generator yang berputar per satuan waktu merupakan nilai dari kecepatan sudut generator tersebut.

$$P = \tau \omega = \tau \cdot 2\pi f \quad (2)$$

$$P \approx \tau$$

Keterangan:

- P = daya yang dibangkitkan generator (Watt)
- τ = momen gaya/kopel mekanik generator (Nm)
- θ = sudut rotasi (rad)
- ω = kecepatan putar sudut generator (rad/s)
- f = Frekuensi Generator (Hz)
- t = waktu (s)

Dari persamaan 2 terlihat bahwa perubahan daya aktif yang dibangkitkan generator akan menyebabkan perubahan pada torsi kerja. Perubahan torsi kerja ini akan mempengaruhi frekuensi sistem. Perubahan daya aktif yang dihasilkan generator terjadi apabila permintaan daya oleh beban berubah. Hal ini tidak boleh dibiarkan terjadi karena generator memiliki rentang frekuensi kerja tertentu. Ketika generator bekerja di luar rentang frekuensi kerja, maka generator tersebut akan cepat mengalami kerusakan. Oleh sebab itu, untuk mempertahankan besarnya frekuensi sistem diperlukan pengaturan pada besarnya kopel mekanis penggerak generator (Nugraheni, 2011).

2.3.3.3 Hubungan Antara Torsi dan Frekuensi

Menurut Nugraheni (2011) Kopel mekanis penggerak generator berkaitan dengan besarnya bahan bakar yang digunakan untuk menggerakkan *prime mover* atau turbin. Pengaturan ini dilakukan oleh governor. Untuk mendapatkan frekuensi konstan, besarnya kopel mekanis penggerak generator sama dengan besarnya torsi beban. Ketika kopel mekanis penggerak generator kurang dari torsi beban maka frekuensi generator semakin lama semakin menurun. Ketika kopel mekanis penggerak generator lebih besar daripada torsi beban maka semakin lama frekuensi generator semakin meningkat. Frekuensi yang diinginkan adalah konstan di rentang yang diizinkan, untuk mendapatkan keadaan tersebut, hal ini merupakan tugas dari

governor untuk mengatur banyaknya bahan bakar yang digunakan. Hal ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$T_G - T_B = J \frac{d\omega}{dt} = J 2\pi \frac{df}{dt} \quad (3)$$

Keterangan:

- T_G = Kopel penggerak mekanik generator (Nm)
- T_B = Torsi beban (Nm)
- J = Momen inersia penggerak mekanik generator (kg.m²)
- ω = Kecepatan sudut putar generator (rad/s)
- f = Frekuensi Generator (Hz)
- t = Waktu (s)

Dari persamaan 3 dapat diketahui bahwa (Nugraheni, 2011):

- a. Jika kopel penggerak mekanik generator lebih besar daripada torsi beban maka perubahan kecepatan sudut putar generator terhadap waktu bernilai positif, artinya frekuensi generator semakin meningkat.
- b. Jika kopel penggerak mekanik generator bernilai sama dengan torsi beban maka perubahan kecepatan sudut putar generator terhadap waktu bernilai nol, artinya kecepatan sudut tetap setiap satuan waktu akibatnya frekuensi sistem konstan.
- c. Jika kopel penggerak mekanik generator bernilai lebih kecil daripada torsi beban maka perubahan kecepatan sudut putar generator terhadap waktu bernilai negatif, artinya kecepatan sudut putar semakin lama semakin melambat dan frekuensinya semakin turun.

2.3.3.4 Hubungan Antara Konstanta Inersia dan Frekuensi

Penurunan frekuensi suatu generator dapat disebabkan oleh lepasnya salah satu pembangkit yang berkapasitas besar dari sistem tenaga listrik maupun gangguan hubung singkat. Terjadinya gangguan hubung singkat mengakibatkan penurunan frekuensi dalam waktu singkat, setelah itu frekuensi dapat pulih dengan sendirinya dengan bantuan pengaturan governor. Sedangkan penurunan frekuensi

akibat beban lebih yang sangat besar diperlukan suatu pelepasan beban untuk memulihkan frekuensi (Nugraheni, 2011).

Besarnya laju penurunan frekuensi sangat berpengaruh terhadap beberapa hal, antara lain:

a. Jenis pelepasan beban yang dilakukan

Ketika tingkat laju penurunan frekuensi yang terjadi rendah maka pelepasan beban dilakukan secara manual oleh operator. Namun, bila tingkat laju penurunan frekuensi tinggi maka diperlukan pelepasan beban secara otomatis.

b. Waktu tunda relay

Laju penurunan frekuensi mempengaruhi pengaturan waktu tunda relay. Untuk laju penurunan frekuensi yang tinggi tentu diatur agar waktu tunda yang dimiliki relay sesingkat mungkin. Semakin lama waktu tunda relay, tentu penurunan frekuensi yang terjadi semakin besar.

c. Jumlah beban yang dilepas

Penurunan frekuensi yang besar harus diimbangi dengan pelepasan beban yang besar, hal ini bertujuan agar mempercepat pemulihan frekuensi. Sedangkan ketika laju penurunan frekuensi rendah, dimungkinkan untuk melakukan pelepasan beban dalam jumlah besar namun bertahap. Hal ini bertujuan untuk meminimalisasi jumlah beban yang dilepaskan.

Menurut Nugraheni (2011) Demikian berpengaruhnya besar laju penurunan frekuensi terhadap pelepasan beban, maka perlu diketahui faktor-faktor yang mempengaruhi besar laju penurunan frekuensi. Faktor-faktor tersebut antara lain sebagai berikut:

1. Konstanta inersia
2. Daya mekanik generator
3. Daya elektrik yang dibutuhkan beban

Faktor-faktor tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan laju penurunan frekuensi. Dengan perkiraan tersebut, dapat juga ditentukan besar frekuensi akhir saat sebelum pemutus tenaga terbuka. Jumlah beban yang harus dilepas untuk pemulihan frekuensi dapat ditentukan (Nugraheni, 2011).

Hubungan yang mendefinisikan perubahan frekuensi terhadap waktu, dalam hal ini disebut dengan laju perubahan frekuensi berdasarkan perubahan besarnya daya yang dihasilkan generator dan daya yang dibutuhkan beban dapat digambarkan oleh persamaan *swing* suatu generator sederhana sebagai berikut:

$$\frac{GH}{\pi f_0} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_A \quad (4)$$

Keterangan:

- G = Rating MVA generator
- H = Konstanta inersia generator (MJ/MVA)
- δ = Sudut torsi generator
- f_0 = Frekuensi nominal generator (Hz)
- P_A = Daya percepatan (MW)

Kecepatan putaran generator dapat dinyatakan sebagai:

$$\omega = \omega_0 + \frac{d\delta}{dt} = 2\pi f \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = 2\pi \frac{df}{dt} \quad (6)$$

Dengan ω_0 = Kecepatan generator saat frekuensi nominal (rpm)

Dari persamaan 4 dan 6 dapat disimpulkan bahwa:

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_A f_0}{2GH} \quad (7)$$

Dengan $P_A = P_M - P_E$

Keterangan:

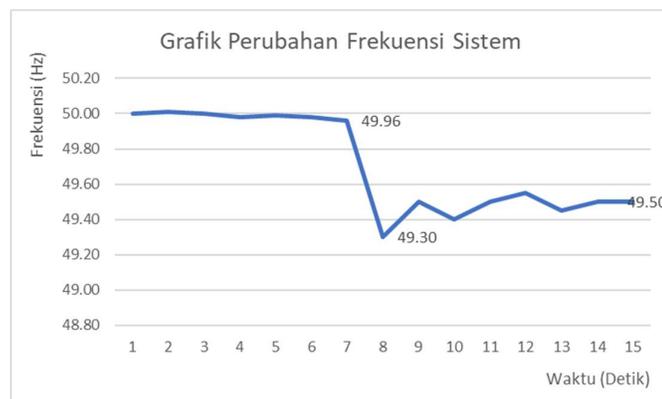
- P_A = Daya percepatan
- P_M = Daya mekanik generator
- P_E = Daya elektrik permintaan beban

Sesuai dengan persamaan 7 terbukti bahwa besarnya laju penurunan frekuensi dipengaruhi oleh tiga faktor yang telah disebutkan sebelumnya. Ketika suatu generator menerima tambahan beban akibat adanya gangguan pada sistem transmisi maupun generator lain yang lepas dari sistem, kestabilan dari generator tersebut akan terganggu. Beban lebih yang diterima oleh generator secara tidak

langsung merupakan gangguan bagi generator. Tanggapan dari gangguan tersebut adalah terjadinya penurunan frekuensi. Besarnya tanggapan ini bergantung pada kemampuan generator untuk mempertahankan diri dari gangguan. Semakin besar momen inersia suatu generator maka semakin besar pula nilai konstanta inersia generator tersebut untuk frekuensi kerja dan rating MVA yang sama. Tingginya nilai momen inersia suatu benda dapat memberikan ketahanan yang lebih tinggi menanggapi terjadinya gangguan (Nugraheni, 2011).

Salah satu faktor yang mempengaruhi besar laju penurunan frekuensi suatu generator adalah konstanta inersia. Semakin besar nilai konstanta inersia maka kemampuan suatu generator dalam mempertahankan diri dalam menghadapi gangguan dalam hal ini adalah respon frekuensi terhadap kelebihan beban semakin tinggi (Nugraheni, 2011).

Sesuai dengan persamaan 7 ketika nilai konstanta inersia suatu generator semakin tinggi maka laju penurunan frekuensi semakin rendah. Nilai konstanta inersia yang digunakan dalam persamaan tersebut mampu menggambarkan nilai konstanta inersia sebuah generator maupun kumpulan beberapa generator.



Gambar 2.4 Ilustrasi Kestabilan Frekuensi (Sadaat, 1999)

Ilustrasi Gambar 2.4 menunjukkan bahwa ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban akan menyebabkan frekuensi bergeser menjadi lebih kecil dari nilai normalnya. Dalam hal ini ketika pembangkitan lebih kecil daripada beban maka frekuensi sistem akan lebih kecil dari 50 Hz, begitu pula sebaliknya. Pada gambar 2.4 terlihat bahwa frekuensi turun hingga mencapai nilai 49.3 Hz pada detik

ke delapan. Oleh karena itu perlu selalu dijaga keadaan yang seimbang antara pembangkitan dan beban agar tercipta frekuensi sistem yang normal yaitu 50 Hz (Sadaat, 1999).

Penanganan ketika terjadi keadaan dimana frekuensi kurang dari 50 Hz dapat dilakukan dengan cara:

- Menambahkan jumlah total energi yang di suplai ke sistem melalui cara menambah unit pembangkit yang bekerja.
- Memanfaatkan fasilitas LFC (*Load Frequency Control*) atau AGC (*Automatic Generation Control*) yang mengendalikan putaran generator sesuai dengan fluktuasi beban. Ketika beban besar maka LFC akan memberikan bahan bakar lebih banyak agar unit pembangkit dapat membangkitkan energi sesuai yang dibutuhkan oleh beban.
- Apabila unit pembangkit sudah beroperasi maksimal, maka dengan terpaksa harus dilakukan pengurangan beban melalui manual *load shedding* (pelepasan beban) ataupun melalui relai UFR yang bekerja ketika frekuensi sistem berada dibawah nilai settingnya (Marsudi, 2006).

2.4 Regulasi Frekuensi

Frekuensi sistem dalam sistem tenaga listrik pada umumnya tidak berada dalam kondisi seimbang, hal ini dikarenakan kebutuhan daya berganti secara terus-menerus. Pada sebuah sistem kelistrikan, daya yang dibangkitkan harus sebanding dengan kebutuhan daya. Jika tidak, maka akan terjadi kekurangan daya. Ketika kebutuhan daya melebihi daya yang dibangkitkan, frekuensi sistem akan menurun dan akan mengalami kenaikan ketika daya yang dibangkitkan melebihi kebutuhan daya (Saputra, 2021).

Frekuensi sistem tenaga listrik secara langsung sepadan dengan kecepatan rotasi generator, dimana hubungan persamaanya adalah sebagai berikut:

$$f = \frac{n \cdot p}{120} \quad (8)$$

Keterangan:

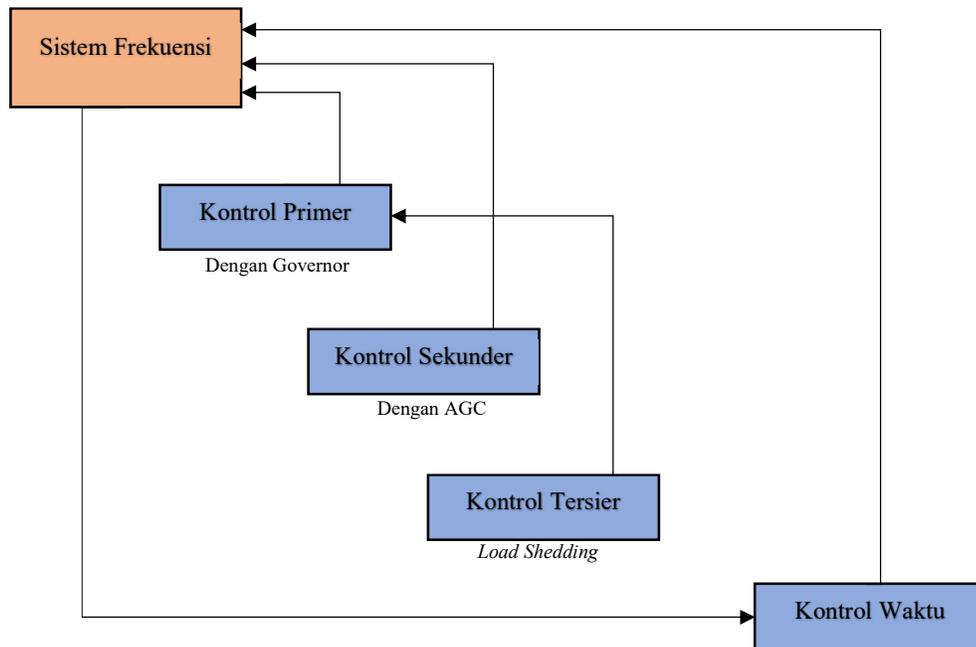
f = Frekuensi sistem (Hz)

p = Jumlah kutub pada generator

n = kecepatan rotasi mesin sinkron (rpm)

2.4.1 Tingkatan Kontrol Frekuensi

Secara praktik, pengaturan kecepatan generator dapat mengatur frekuensi sistem. Pada umumnya generator dilengkapi dengan governor untuk mengawasi dan mendeteksi kecepatan secara konstan. Pada sebuah sistem tenaga listrik terpisah yang memiliki sebuah generator tunggal, ketika beban meningkat, kebutuhan energi yang ditambahkan menunjang inersia dari generator listrik. Hasilnya, kecepatan generator akan berkurang dan oleh karena itu frekuensi sistem akan berkurang. Fungsi utama governor adalah untuk membuka pintu turbin sehingga kecepatan turbin meningkat. Kecepatan turbin yang meningkat akan meningkatkan frekuensi. Frekuensi sistem dalam hal ini akan kembali dalam jangkauan nilai yang memungkinkan. Untuk interkoneksi sistem tenaga listrik, pengaturan frekuensi diatur oleh sebuah mekanisme kontrol untuk mengembalikan frekuensi sistem selama kondisi kontinjensi (Saputra, 2021).

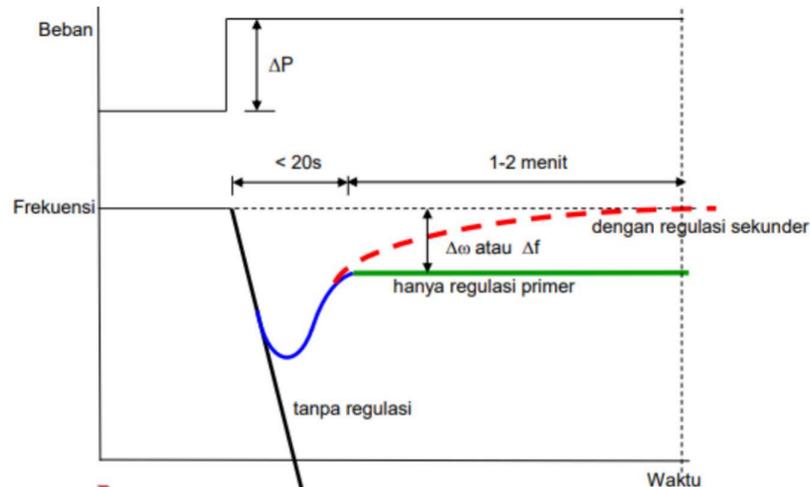


Gambar 2.5 Tingkatan Kontrol Frekuensi Sistem (E. N. o. T. System, 2015)

Gambar 2.5 menggambarkan berbagai tindakan pengendalian yang diperlukan dalam mengembalikan frekuensi sistem untuk menghindari *blackout* sistem tenaga listrik. *Primary frequency control* merupakan regulasi utama pada frekuensi yang ditanggung oleh masing-masing pembangkit (generator) yang paralel terhadap jaringan. Definisi dari kontrol ini adalah generator beroperasi (menghasilkan daya aktual) dengan mengacu pada perubahan nilai frekuensi dimana 100% *output* generator beroperasi dengan metode *free governor*. Mode *free governor* merupakan mode operasi governor untuk mempertahankan *speed* turbin tetap *steady* pada *speed rate*-nya dalam kondisi sistem (*frequency*) yang dinamis. Secara sederhana, *output* generator (dalam hal ini daya aktual/aktif) beroperasi menyesuaikan perubahan *frequency* dalam sistem (*grid*). *Secondary frequency control* merupakan pengaturan otomatis (*Automatic Generation Control/AGC*) oleh pusat kontrol (pengatur beban) dalam mengatur variasi beban agar terciptanya frekuensi sistem tenaga listrik yang stabil. *Tertiary frequency control* merupakan

upaya menjaga kestabilan frekuensi dengan melakukan pelepasan beban *atau load shedding* (Saputra, 2021).

Gambar 2.6 adalah diagram yang menggambarkan perubahan beban yang diikuti oleh perubahan nilai frekuensi pada system tenaga listrik.



Gambar 2. 6 Diagram Perubahan Frekuensi Terhadap Beban (Saputra, 2021)

Pada pada kurva diagram yang diperlihatkan gambar 2.6, menjelaskan bahwa karakteristik mode operasi *free governor* saat beban meningkat adalah menghindari frekuensi jatuh terlalu jauh atau Δf yang tinggi saat frekuensi dinamis terjadi pada system tenaga listrik. Responsif mode operasi *free governor* sebagai *primary frequency control* dalam menjaga kestabilan frekuensi system tenaga listrik sangat bergantung pada *speed droop* masing-masing pembangkit. *Speed droop* merupakan respon batas titik drop frekuensi dalam mengaktivasi mode operasi dari normal mode menjadi *free governor mode* (FG) atau dengan kata lain *speed droop* adalah perubahan 100% nilai *output* generator (daya aktif yang dibangkitkan) pada tiap persen perubahan nilai frekuensi. Contoh *speed droop* 5% adalah merupakan perubahan nilai daya yang dibangkitkan menyesuaikan kebutuhan system guna mengembalikan atau memperbaiki nilai frekuensi sistem pada tiap 5% perubahan frekuensi atau speed. Semakin kecil nilai *speed droop*, maka akan semakin *responsive governor* dalam mengontrol frekuensi sistem, sedangkan semakin besar

speed droop akan mengurangi tingkat *responsive* pembangkit dalam partisipasi perbaikan frekuensi dalam jaringan (Saputra, 2021).

Berikut formulasi *free governor (FG) mode* dalam partisipasi guna menormalkan frekuensi sistem tenaga listrik (Sadaat, 1999):

$$k = \frac{1}{\text{speed drop}} \times \frac{P_{nom}}{f_{ref}} \quad (9)$$

Keterangan:

- k = Partisipasi Faktor ((MW/Hz)
- P_{nom} = Daya aktif yang dibangkitkan generator (MW)
- f_{ref} = Frekuensi Referensi (50 Hz)

Dimana:

$$\Delta P = -k \cdot \Delta f \quad (10)$$

Keterangan:

- ΔP = Governor action (MW)
- Δf = Defiasi perubahan nilai frekuensi ($f-f_0$)

2.4.2 Karakteristik Governor Tiap Pembangkit

Pada sistem tenaga listrik, pasokan listrik ke beban dimulai dengan mengaktifkan satu generator kemudian sedikit demi sedikit beban diintegrasikan sampai dengan kemampuan generator tersebut. Generator lain diaktifkan dan diparalelkan dengan generator pertama untuk memikul beban yang lebih besar lagi. Saat generator kedua diparalelkan dengan generator pertama yang sudah memikul beban, diharapkan terjadinya pembagian beban yang semula ditanggung generator pertama sehingga terjadi kerjasama sebelum beban-beban selanjutnya dimasukkan. Besar pembagian beban yang ditanggung oleh masing-masing pembangkit yang bekerja paralel bergantung pada jumlah penggerakannya. Semakin banyak jumlah penggerakannya, maka pembangkit tersebut akan lebih banyak berkontribusi untuk membangkitkan daya (pada batas pembangkitan generator). Bila pembangkit berasal dari tenaga diesel maka akan bergantung pada bahan bakar dan udara yang

digunakan sebagai pembakaran mesin diesel. Bila mesin penggeraknya merupakan turbin air maka bergantung pada jumlah (debit) air ke turbin air. Bila penggeraknya berupa turbin gas maka bergantung pada jumlah (entalpi) uap/gas ke turbin uap/gas. Dan apabila pembangkitnya merupakan pembangkit tenaga bayu maka bergantung pada debit aliran udara ke baling-baling (Marsudi, 2006).

Jumlah masukan bahan bakar ini diatur oleh peralatan atau katup yang digerakkan oleh governor yang menerima sinyal dari perubahan frekuensi listrik yang stabil pada 50 Hz, yang ekuivalen dengan perubahan putaran (rpm) mesin penggerak utama generator listrik. Bila beban listrik naik maka frekuensi akan turun, sehingga governor harus memperbesar masukan (bahan bakar/udara, air, uap/gas atau aliran udara) ke mesin penggerak utama untuk menaikkan frekuensinya sampai dengan frekuensi listrik kembali ke nilai normalnya. Sebaliknya bila beban turun, governor dari mesin-mesin pembangkit harus mengurangi masukan bahan bakar/udara, air, uap air/gas atau aliran udara ke mesin-mesin penggerak sehingga putarannya turun sampai putaran normalnya atau frekuensinya kembali normal pada 50 Hz. Bila tidak ada governor maka mesin-mesin penggerak utama generator akan mengalami *overspeed* bila beban turun mendadak atau akan mengalami *overload* bila beban listrik naik. Governor beroperasi pada mesin penggerak sehingga generator menghasilkan keluaran arus yang dapat diatur dari 0 persen sampai dengan 100 persen kemampuannya. Jadi masukan ke mesin penggerak sebanding dengan keluaran arus generatornya atau dengan kata lain pengaturan governor 0 persen sampai dengan 100 persen sebanding dengan arus generator 0 persen sampai dengan 100 persen pada tegangan dan frekuensi yang konstan (Marsudi, 2006).

Sistem governor adalah sistem kontrol yang digunakan untuk menstabilkan putaran turbin. Pengontrolan putaran turbin berfungsi untuk menjaga nilai nominal frekuensi sebesar 50 Hz karena sistem tenaga listrik di Indonesia menggunakan frekuensi 50 Hz. Salah satu metode operasi governor adalah dengan setting nilai *speed droop*. *Speed droop* merupakan perbandingan antara beban listrik dengan frekuensi. Nilai dari *speed droop* menyatakan seberapa peka pengaturan putaran (governor) terhadap perubahan frekuensi. Nilai *speed droop* harus dalam rentang

yang sekecil mungkin untuk keandalan kerja governor. Dalam menjaga kestabilan sistem governor dengan setting *speed droop* akan berpengaruh terhadap perubahan frekuensi akibat beban listrik yang tidak stabil. Semakin kecil nilai *speed droop* governor pembangkit, maka akan semakin baik pembangkit tersebut dalam merespon perubahan frekuensi. Pembangkit yang memiliki *nilai speed droop* governor yang kecil adalah pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) sehingga PLTU menjadi pembangkit listrik yang paling cepat dalam merespon frekuensi sistem. Selain nilai *speed droop* yang kecil, inersia PLTU yang besar juga berkontribusi terhadap respon perubahan frekuensi.

2.5 PLTA Bakaru

2.7.1 Gambaran Umum PLTA Bakaru

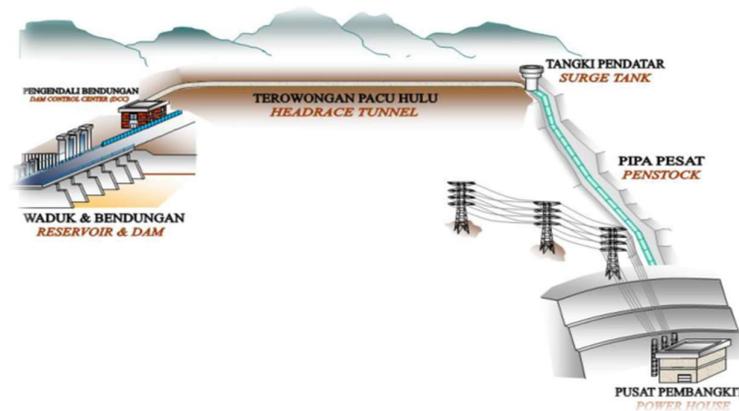
Proyek PLTA Bakaru merupakan salah satu proyek di lingkungan PT. PLN (Persero) yang berada di Desa Ulu Saddang dan Desa Bakaru Kec. Lembang Kab. Pinrang, Sulawesi Selatan dengan luas wilayah mencapai 630 Hektar yang terdiri dari waduk, perkantoran, *power house*, *penstock*, perumahan karyawan, dan sarana penunjang lainnya.

PLTA Bakaru memperdayakan potensi air dari sungai Mamasa, sungai ini merupakan anak sungai Saddang yang dikembangkan menjadi sumber tenaga listrik berkapasitas 2x63 MW. Air sungai dialihkan dengan menggunakan DAM yang dibangun dan memotong aliran sungai. Air sungai ini kemudian disalurkan ke turbin air dari PLTA.

2.7.2 Prinsip Kerja PLTA

PLTA Bakaru menggunakan bendungan tipe *run of river* yang terdiri dari 2 unit turbin air tipe *francis* dan memanfaatkan aliran sungai Mamasa dengan elevasi sebesar 615.50 mdpl, serta dilengkapi dengan pengatur waduk untuk mengatur limpasan harian dari sungai Mamasa.

Prinsip Kerja PLTA Bakaru yaitu menampung air aliran sungai pada waduk, setelah itu akan dilakukan konversi bentuk energi, dari energi kinetik dan energi potensial air menjadi energi mekanik, dan kemudian dikonversi lagi menjadi energi listrik. Proses konversi tersebut diilustrasikan seperti Gambar 2.7. Tenaga air dengan ketinggian dan debit tertentu disalurkan melalui pipa pesat sehingga mampu menggerakkan turbin yang kemudian akan memutar generator untuk menghasilkan energi listrik (Bakaru HPP, 1990).



Gambar 2.7 Proses Konversi Energi pada PLTA (Bakaru HPP, 1990)

2.7.3 Peralatan Utama PLTA Bakaru

Peralatan utama PLTA Bakaru terdiri dari:

1. Waduk
Waduk PLTA Bakaru merupakan tempat penampungan air dari sungai Mamasa yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik.
2. DAM (Bendungan)
DAM berfungsi untuk membendung aliran sungai Mamasa sehingga membentuk sebuah penampungan air (*reservoir*).
3. *Headrace Tunnel* (Terowongan Pacu Hulu)
Headrace tunnel merupakan saluran air dengan diameter 4.5 meter dan panjang 6057 meter yang menuju *surge tank* dan *penstock*.
4. *Surge Tank* (Tangki Pendatar)

Surge Tank berfungsi meredam atau mengurangi kejutan balik (*water hammer*) dengan maksud menghindari kerusakan pada peralatan seperti *headrace tunnel*, *penstock*, atau *main valve* yang diakibatkan tekanan air yang besar. Kejutan balik pada *penstock* disebabkan karena dilakukannya penutupan katup utama (*inlet valve*) secara tiba-tiba (pemberhentian turbin secara tiba-tiba).

5. *Penstock* (Pipa Pesat)

Penstock berfungsi mengubah energi potensial air menjadi energi kinetik. Tipe *penstock* yang digunakan adalah *steel pipeline open laid bifurcated at lower portion* dengan panjang 1698 meter, diameter dalam *penstock* dari 4.5 meter, 3.4 meter menjadi 1.6 meter dan ketebalan bertambah dari 13 mm menjadi 46 mm, perbedaan ukuran ini dimaksudkan agar energi kinetik yang dihasilkan semakin besar karena penambahan kecepatan dan tekanan.

6. Turbin

Turbin merupakan pesawat angkat yang prinsip kerjanya adalah mengubah energi kinetik dari air menjadi energi mekanik.

7. Pusat Pembangkit (*Power House*)

Pusat pembangkit (*power house*) merupakan bangunan tempat peralatan pembangkit listrik yaitu turbin dan generator.

8. Generator

Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanik berupa putaran dari penggerak utama menjadi energi listrik. Konstruksi generator terkopling dengan turbin, kopling ini untuk menyambungkan antara ujung poros turbin dengan poros generator, yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik. Generator pada PLTA Bakaru I diperlihatkan pada Gambar 2.8. Gambar 2.8 merupakan generator PLTA Bakaru yang dilengkapi *bearing* sebagai poros generator.



Gambar 2.8 Generator PLTA Bakaru I (Bakaru HPP, 1990)

9. Transformator

Transformator adalah alat listrik yang berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan tegangan. Trafo utama PLTA Bakaru berfungsi untuk menaikkan tegangan keluaran generator dari 11 kV menjadi 150 kV. Transformator PLTA Bakaru I ditampilkan pada Gambar 2.9. Gambar 2.9 merupakan transformator 3 fasa yang berfungsi menaikkan (*step up*) tegangan output generator sebesar 11 kV menjadi 150 kV untuk ditransmisikan ke sistem interkoneksi (Bakaru HPP, 1990).



Gambar 2.9 Transformator PLTA Bakaru I (Bakaru HPP, 1990)

2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Pada dasarnya, tenaga angin adalah bentuk tenaga surya yang telah dikonversi. Tenaga surya berupa radiasi matahari memanaskan di berbagai tempat di bumi dengan kecepatan yang berbeda pada siang dan malam hari. Hal ini menyebabkan berbagai bagian atmosfer di bumi memanaskan dalam waktu yang berbeda. Udara panas akan naik, dan udara yang lebih sejuk tertarik untuk menggantikannya. Inilah yang menyebabkan terjadinya angin. Jadi, angin disebabkan oleh gerakan molekul udara di atmosfer yang berasal dari energi matahari. Semua benda statis termasuk molekul udara menyimpan energi laten yang disebut dengan energi potensial. Pada saat molekul udara mulai bergerak, maka energi potensialnya dikonversi menjadi energi kinetik (energi gerakan) sebagai akibat dari kecepatan molekul udara. Mesin energi angin, yang dinamakan turbin angin akan menggunakan energi kinetik angin dan mengkonversinya menjadi energi mekanis atau listrik yang bisa dimanfaatkan untuk berbagai tujuan praktis.

Secara umum kincir angin dapat dibagi menjadi dua, yaitu kincir angin yang berputar dengan sumbu horizontal, dan yang berputar dengan sumbu vertikal. Sedangkan menurut karakteristiknya kincir angin terdiri dari tipe *multi-blade* dan *Savonius* yang cocok digunakan untuk aplikasi PLTB kecepatan rendah, dan tipe *Propeller* yang merupakan tipe paling umum digunakan karena dapat bekerja dengan lingkup kecepatan angin yang luas (Kementrian ESDM, 2021).

2.6.1 Komponen pada PLTB

Umumnya suatu pembangkit listrik tenaga angin/bayu (PLTB) terdiri dari beberapa komponen utama yaitu rotor (sudu dan *hub/naf*), roda gigi/*gear box* (jika menggunakan), *drive train* yang terdiri atas *shaft*, kopling, unit pengereman, nasel (rumah turbin), sistem pengarah, generator, dan menara/*tower*.

1. Komponen Mekanikal

a. Rotor

Rotor berfungsi untuk mengubah energi angin menjadi energi putaran rotor yang selanjutnya digunakan untuk memutar generator baik melalui unit transmisi maupun sambungan langsung. Rotor terdiri dari sudu dengan bentuk tertentu dengan permukaan aerodinamis. Bahan rotor umumnya adalah *Glass Fibre Reinforced (GFR)* atau *epoxy*. Diameter rotor menentukan besarnya daya yang dihasilkan oleh sistem. Jumlah sudu, umumnya 3 sudu karena pertimbangan stabilitas dan biaya dibandingkan dengan 2 atau 4 sudu.

b. Nasel

Nasel merupakan bagian dari turbin angin yang berfungsi untuk penempatan/*housing* beberapa komponen turbin angin antara lain unit transmisi, poros, generator, kopling mekanik, rem mekanik, agar terlindung dari pengaruh lingkungan yang membahayakan. Pada umumnya bahan nasel terbuat dari bahan aluminium, besi cor, atau komposit.

c. *Drive Train*

Drive train berfungsi untuk menyalurkan energi mekanis yang dihasilkan oleh rotor melalui poros ke generator untuk menghasilkan energi listrik. Secara umum *drive train* terdiri dari komponen yang berputar seperti rotor, poros utama, kopling, *gearbox*, rem, dan generator.

d. Unit transmisi mekanik (roda gigi atau sabuk)

Unit transmisi berfungsi untuk menyalurkan daya putar dari rotor ke generator dan mengubah kecepatan putaran dari lambat dan torsi yang besar menjadi putaran cepat dan torsi yang rendah.

e. Poros utama

Poros utama berfungsi untuk menyalurkan daya dari rotor ke generator dapat langsung atau melalui *gearbox*. Poros utama menyalurkan daya dengan torsi tinggi pada kecepatan putar yang rendah yang dihasilkan oleh rotor. Besarnya dimensi poros tergantung besarnya daya/torsi yang disalurkan dan kekuatan bahan.

f. Rem dan Kopling

Pada turbin angin skala kecil, umumnya tidak dilengkapi dengan rem dan kopling mekanik. Namun untuk keamanan dan perawatan, turbin angin kecil menggunakan rem elektrik, yaitu dengan menghubungkan kabel *output* generator secara berulang, sampai rotor berhenti berputar.

g. Sistem geleng

Sistem geleng (*yawing system*) merupakan salah satu komponen penting turbin angin baik skala kecil maupun skala besar yang berfungsi sebagai pengarah turbin angin agar sesuai dengan arah angin aktual (Kementerian ESDM, 2021).

2. Komponen Elektrikal

a. Generator listrik

Generator listrik merupakan perangkat yang mengubah energi gerak menjadi energi listrik bolak balik dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Proses ini dikenal sebagai pembangkit listrik. Umumnya turbin angin skala kecil menggunakan generator magnet permanen atau generator sinkron yang menghasilkan arus bolak balik dengan frekuensi yang berubah-ubah. Oleh konverter, arus bolak balik tersebut diserahkan dan di atau diubah kembali menjadi arus bolak balik oleh Inverter dengan frekuensi 50Hz yang siap dikonsumsi oleh beban. Generator yang umum digunakan pada PLTB adalah:

- *Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)*

Squirrel Cage Induction Generator (Generator Induksi Sangkar Tupai) merupakan generator asinkron yang menggunakan konsep kecepatan tetap dalam turbin angin jenis ini. Dalam konfigurasi ini motor induksi sangkar tupai (*Squirrel cage induction motor*) terhubung langsung dengan angin melalui transformator. Sebuah kapasitor bank didalamnya untuk kompensasi daya reaktif dan *soft starter* (*starting* lembut) digunakan untuk koneksi jaringan yang mulus. Hal ini tidak mendukung pengontrolan kecepatan apapun yang menjadi kelemahan utama (Babu, 2017).

- *Wound Rotor Induction Generator (WRIG)*

Generator Induksi Rotor Belitan merupakan generator asinkron yang menggunakan konsep *variable speed*. Pada tipe jenis turbin ini Generator Induksi Rotor Belitan (*Wound Rotor Induction Generator*) langsung dihubungkan ke *grid*/jaringan. *Variable rotor resistance* untuk mengendalikan slip dan keluaran daya generator. Starting lembut (*soft starter*) digunakan untuk mereduksi arus masuk (*inrush current*) dan kompensator daya reaktif digunakan untuk menghilangkan permintaan daya reaktif. Rentang kecepatan terbatas, kontrol daya aktif dan reaktif yang buruk, daya slip hilang pada tahanan geser (*variable resistance*) karena rugi adalah kerugian konfigurasi ini (Babu, 2017).

- *Permanent Magnet Generator (PMSG)*

Generator magnet permanen merupakan generator sinkron yang terhubung ke jaringan melalui konverter frekuensi skala penuh. Konverter frekuensi membantu untuk mengontrol daya aktif dan reaktif yang disalurkan oleh generator ke jaringan. Dibandingkan dengan generator turbin angin lainnya generator PMSG memiliki harga yang relatif mahal dibandingkan dengan tipe lainnya (Babu, 2017).

b. Sistem Penyimpanan

Pada sistem *stand alone*, dibutuhkan baterai untuk menyimpan energi listrik berlebih yang dihasilkan turbin angin. Contoh sederhana alat penyimpan energi listrik adalah aki mobil.

c. *Charge Controller*

Charge controller berfungsi mengoptimalkan arus pengisian ke baterai dan mengatur/membatasi arus pemakaian beban serta membuang arus keluaran turbin angin ke *dump load* saat baterai dalam kondisi penuh.

2.6.2 Jenis Generator Berdasarkan Sumber Eksitasinya

Dalam aplikasinya generator induksi dibagi menjadi dua jenis yaitu generator induksi masukan ganda (*Doubly Fed Induction Generator* atau DFIG) dan generator induksi berpenguat sendiri (*Self Excited Induction Generator* atau SEIG). Pembagian jenis generator ini berdasarkan pada sumber eksitasi generator

berasal. Eksitasi pada generator induksi dibutuhkan untuk menghasilkan medan magnet pada rotor generator untuk selanjutnya menghasilkan induksi elektromagnetik pada stator yang akan menghasilkan energi listrik. Selain itu eksitasi juga dibutuhkan untuk mengkompensasi daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator dalam membangkitkan listrik (Yahya, 2018).

a. Generator Induksi Masukan Ganda (*Doubly Fed Induction Generator/DFIG*)

Pada generator induksi masukan ganda, eksitasi diperoleh dari jaringan listrik yang telah terpasang. Generator induksi jenis ini menyerap daya reaktif dari jaringan listrik untuk membangkitkan medan magnet yang dibutuhkan. Pada generator jenis ini, terminal keluaran generator dihubungkan dengan inverter yang kemudian dihubungkan dengan bagian generator. Generator induksi masukan ganda saat ini banyak digunakan sebagai generator pada pembangkit listrik tenaga baru. Pada generator induksi masukan ganda terdapat dua buah inverter yang menghubungkan antara keluaran generator dengan rotor. Kedua inverter tersebut dihubungkan dengan penghubung inverter yang terhubung dengan jaringan bekerja pada frekuensi yang sama dengan frekuensi jaringan. Inverter ini juga mengatur besar faktor daya yang masuk agar sesuai dengan besar daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator. Inverter yang terhubung dengan rotor bekerja pada frekuensi yang sesuai dengan frekuensi putaran generator. Dengan menggunakan konfigurasi seperti ini, besar arus yang mengalir pada rotor dapat diatur sesuai dengan daya yang akan dibangkitkan. Keuntungan dari generator induksi masukan ganda diantaranya adalah tegangan dan frekuensi yang dihasilkan dapat tetap besarnya walaupun kecepatan putarnya berubah-ubah. Namun generator jenis ini membutuhkan inverter sebagai pengatur tegangan pada rotor dan juga rotor jenis kumparan karena generator ini membutuhkan sumber pada rotornya. Dengan demikian tidak semua jenis mesin induksi dapat digunakan sebagai generator induksi jenis ini. Selain itu generator ini juga membutuhkan jaringan listrik untuk dapat beroperasi, karena sumber daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator berasal dari jaringan. Apabila tidak ada jaringan listrik atau generator lain yang memberikan daya reaktif maka generator jenis ini tidak dapat beroperasi. Selain itu jika

terjadi gangguan pada jaringan atau *blackout* jaringan generator ini juga tidak dapat beroperasi (Yahya, 2018).

b. Generator Induksi Penguat Sendiri (*Self Excited Induction Generator/SEIG*)

Pada generator induksi berpenguat sendiri, eksitasi diperoleh dari kapasitor yang dipasang parallel pada terminal keluaran generator. Generator induksi jenis ini bekerja seperti mesin induksi pada daerah saturasinya hanya saja terdapat *bank* kapasitor yang dipasang pada terminal statornya. Karena sumber eksitasi generator ini berasal dari kapasitor yang dipasang pada terminalnya maka mesin induksi dengan rotor kumparan maupun sangkar tupai dapat digunakan sebagai generator induksi berpenguat sendiri. Generator induksi jenis ini memiliki beberapa keuntungan yaitu tidak membutuhkan pengaturan tegangan pada rotornya, tidak memerlukan inverter, desain peralatan yang tidak rumit, harga pembuatan lebih murah, perawatan yang diperlukan murah dan tidak sulit, dan tidak memerlukan jaringan listrik untuk dapat beroperasi.

Generator induksi berpenguat sendiri juga dapat beroperasi dalam suatu jaringan listrik dan tetap dapat beroperasi walaupun terdapat gangguan pada jaringan. Oleh karena itu, generator induksi berpenguat sendiri lebih fleksibel dalam pengoperasiannya. Generator induksi berpenguat sendiri merupakan pilihan yang tepat untuk memenuhi kebutuhan energi di tempat yang terisolasi dimana daya reaktif dari jaringan listrik tidak atau belum ada. Sumber energi yang digunakan untuk mensuplai generator dapat berasal dari sumber energi yang tidak terlalu besar jumlahnya, seperti kincir angin ataupun kincir air di sungai (yang biasa dikenal dengan pembangkit listrik tenaga mikrohidro). Dengan melihat kondisi di Indonesia dimana terdapat beberapa daerah yang belum terjangkau listrik, generator induksi berpenguat sendiri merupakan salah satu solusi yang tepat. Hal ini karena generator induksi berpenguat sendiri dapat beroperasi sendiri tanpa adanya jaringan listrik (Yahya, 2018).

2.6.3 Jenis PLTB Berdasarkan Konfigurasi Turbin Angin

Berdasarkan konfigurasi turbin angin terbagi menjadi dua jenis (ESDM, 2021) yaitu:

1. *Off-grid*

a. PLTB *Standalone*

Pada sistem *standalone*, turbin angin dipasangkan dengan baterai, *charge controller*, *dump load* serta inverter sebelum dihubungkan ke beban. Baterai digunakan sebagai penyimpan sekaligus sebagai *buffer* agar keluaran inverter bias dipertahankan stabil.

b. *Hybrid* (Hibrida)

Guna meningkatkan kehandalan pasokan energi, turbin angin dipasangkan dengan satu pembangkit lain atau lebih, baik itu pembangkit terbarukan maupun pembangkit konvensional (diesel). Kerjasama tersebut bisa dilakukan pada level keluaran DC maupun keluaran AC atau di keduanya.

- Hibrida dengan bus DC

Pada sistem hibrida dengan bus DC, semua keluaran pembangkit disinkronisasi pada level tegangan DC. Keluaran arus bolak-balik dari pembangkit diesel diubah menjadi arus searah dan disimpan kedalam baterai, begitu juga halnya dengan keluaran searah PLTB. Selanjutnya oleh inverter, arus searah yang tersimpan didalam baterai tersebut diubah kembali menjadi arus bolak-balik oleh inverter untuk melistriki beban.

- Hibrida dengan bus AC

Pada sistem hibrida dengan bus AC, semua keluaran pembangkit disinkronisasi pada level tegangan AC. Keluaran arus searah PLTB diubah oleh inverter selanjutnya bersama dengan genset digunakan untuk melistriki beban bolak-balik. Jika terdapat kelebihan energi, maka sisanya disimpan kedalam baterai setelah sebelumnya diubah terlebih dahulu oleh *bidirectional* rectifier/inverter (bisa berfungsi sebagai

rectifier dan inverter). Seluruh inverter yang digunakan memiliki fitur kemampuan bersinkronisasi dengan jaringan listrik.

- Hibrida dengan bus DC/AC

Sistem hibrida dengan bus DC/AC merupakan perpaduan kedua sistem sebelumnya. Keluaran kedua pembangkit dapat disimpan langsung ke baterai atau digunakan langsung melistriki beban bolak-balik.

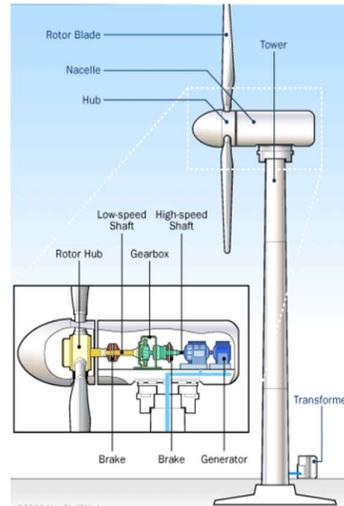
2. *On-Grid*

Sistem *On-grid* adalah turbin angin yang tersambung langsung dengan jaringan listrik tanpa menyimpan baterai.

2.6.4 PLTB Sidrap

PLTB Sidrap adalah pembangkit listrik tenaga angin skala besar yg pertama beroperasi di Indonesia dengan kapasitas 75MW dengan masing masing turbin angina memiliki kapasitas 30 x 2,5 MW. PLTB Sidrap selesai dibangun pada tanggal 5 April 2018 dan diresmikan oleh Presiden Indonesia, Bapak Joko Widodo pada tanggal 5 Juli 2018, terletak di Kabupaten Sidenreng Rappang dengan 30 kincir angin, tinggi menara 80 meter dan panjang baling-baling 57 meter. PLTB Sidrap dioperasikan oleh IPP PT.UPC Sidrap Bayu Energi yang merupakan konsorsium yang terdiri dari UPC Renewables Asia I, UPC Renewables Asia III, Sunedison dan Binatek Energi Terbarukan. PLTB Sidrap dapat mengaliri lebih dari 70.000 pelanggan listrik dengan daya 900 Volt Ampere (VA).

Dalam satu turbin, terdapat beberapa komponen diantaranya: *blade*, *hub*, rotor, *tower*, turbin dan generator seperti pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Komponen-Komponen pada PLTB

Umumnya turbin angin saat ini menggunakan horizontal *axis* dengan *propeller tipe blade*. Rotor merupakan bagian turbin yang menyediakan energi angin sebagai sumber penggerak turbin, terdiri dari *hub* dan beberapa *blade* yang terpasang pada *hub*. Tower merupakan struktur pendukung turbin angin. Peralatan pengarah putaran, sistem kontrol dan mekanisme putaran serta generator ditempatkan dalam *nacelle*. Bagian-bagian komponen PLTB pada Gambar dapat dijelaskan sebagai berikut.

- a. Anemometer: Alat ukur kecepatan angin yg terpasang pada tower dan terhubung ke pusat pengontrol PLTB.
- b. *Blades*/Bilah Sudu: Komponen utama dalam proses konversi energi, menerima hembusan angin dan meneruskan energi kinetik yang menyebabkan terjadinya pergerakan. Biasanya turbin angin memiliki dua atau tiga buah bilah sudu.
- c. *Hub*: Fungsi *hub* pada turbin angin adalah menghubungkan bilah sudu (*Blades*) ke poros utama dan akhirnya ke seluruh rangkaian penggerak. *Hub* mentransmisikan dan menahan semua beban yang dihasilkan oleh *Blades*. *Hub* umumnya terbuat dari baja, baik yang dilas maupun dituang. *Blades* dan *Hub* biasa juga disebut sebagai Rotor.

- d. *Brake/ Pengerem*: Digunakan untuk mengurangi kecepatan untuk menjaga putaran poros bekerja pada titik aman saat kecepatan angin meningkat.
- e. *Gear Box/ Roda Gigi*: Rangkaian roda gigi yang membungkan poros kecepatan tinggi dan poros kecepatan rendah hingga dapat meningkatkan kecepatan putaran generator.
- f. *Generator*: Peralatan yg digunakan untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik dengan komponen utama rotor pada bagian yg berputar dan stator pada bagian yg diam dan menghasilkan arus bolak balik.
- g. *Nacelle*: Adalah bagian dari turbin angin yang menampung komponen yang mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik untuk menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Kebanyakan *nacelle* memiliki komponen yang sama, seperti *hub*, rotor, *gearbox*, generator, inverter, dan *bearing*. Lebih dari 1.500 komponen kecil dan besar ditempatkan di *nacelle*.
- h. *Tower/menara*: Terbuat dari baja tubular, beton, atau kisi baja. Berfungsi menyangga struktur turbin dan rumah *nacelle*. Karena kecepatan angin meningkat seiring dengan ketinggian, menara yang lebih tinggi memungkinkan turbin menangkap lebih banyak energi dan menghasilkan lebih banyak listrik.
- i. *Yaw Drive*: Peralatan yang berfungsi untuk mengorientasikan turbin melawan arah angin sehingga tetap menghadap angin saat terjadi perubahan arah angin. *Yaw Drive* biasanya digerakkan oleh motor. Turbin tipe *down-wind* tidak memerlukan *yaw drive* karena angin secara manual meniup rotor menjauh darinya.
- j. *Wind Vane*: Peralatan yang berfungsi membaca dan mengukur arah angin dan berkomunikasi dengan *yaw drive* untuk mengarahkan turbin dengan benar sesuai dengan angin.
- k. *Wind Direction*: Dalam menentukan desain turbin angin terdapat pilihan *Up Wind Turbine* dan *Down-Wind Turbine*. *Up-Wind Turbine* berarti bilah blades turbin melawan arah angin sementara *Down-Wind Turbine* didesain untuk mengikuti hembusan angin.

1. *Controller/* Pengendali: Sistem kendali pada turbin angin dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi operasi tertinggi yang memaksimalkan koefisien daya dan memastikan pengoperasian yang aman dalam semua kondisi angin.

2.6.5 Dampak PLTB Terhadap Frekuensi Sistem

Frekuensi adalah besaran yang dipergunakan untuk menunjukkan kualitas tenaga listrik. Frekuensi dalam pembangkitan tenaga listrik, menunjukkan jumlah putaran elektrik mesin pembangkit. Satu gelombang sinusoidal menunjukkan satu putaran elektrik. Sistem kelistrikan di Indonesia yang di kelola PLN menggunakan frekuensi 50 Hz. Nilai ini setara dengan 50 putaran per detik atau 3.000 putaran per menit. Perbandingan keseimbangan sesaat antara daya yang dipergunakan oleh konsumen (beban) dengan daya yang disuplai oleh pembangkit tenaga listrik juga dapat dilihat dari frekuensinya. Pada saat keduanya seimbang, maka frekuensi adalah 50 Hz. Penyimpangan frekuensi terjadi apabila nilai sesaat antara suplai daya dan beban tidak sama. Apabila frekuensi kurang dari 50 Hz maka hal tersebut menunjukkan suplai daya nyata dari pembangkit kurang dari daya beban. Di sisi lain apabila suplai daya dari pembangkit berlebih, mengakibatkan nilai frekuensi menjadi lebih besar dari 50 Hz. Ini menunjukkan bahwa suplai daya dan daya beban yang bersifat acak dapat membuat nilai frekuensi sistem kelistrikan berubah-ubah sehingga hal tersebut menyebabkan hampir tidak ada kemungkinan pasokan daya nyata unit pembangkit dapat terus-menerus tepat sama dengan beban sistem.

PLTB merupakan pembangkit dengan sumber energi *intermittent*, yang menghasilkan energi listrik dalam jumlah yang fluktuatif. Hal tersebut karena Pembangkit Listrik Tenaga Bayu adalah salah satu pembangkit energi terbarukan yang sangat bergantung dengan kondisi angin. Inilah yang menyebabkan daya yang dibangkitkan menjadi tidak stabil dan memberi efek *intermittent* yang signifikan pada kestabilan sistem. Nilai selang-seling (*intermittent*) pembangkit dalam suatu sistem akan mempengaruhi kestabilan pada sistem tersebut. Dimana semakin besar komposisi *intermittent* dalam sistem, maka kestabilan sistem akan semakin rentan,

karena *ramping rate* (ukuran seberapa cepat suatu pembangkit dapat mengubah daya selama beroperasi dalam mengejar perubahan daya beban) pembangkit *intermitent* mengganggu kestabilan frekuensi sistem (Riasa, 2019).

2.7 Penggunaan Software *DigSilent*

Program perhitungan *DigSilent* adalah program yang digunakan untuk analisis transmisi, distribusi, dan sistem tenaga listrik industri. *DigSilent* dirancang untuk sistem tenaga listrik dan analisis kontrol agar mencapai tujuan utama dari perencanaan dan optimasi operasi.

Digsilent merupakan kependekan dari “*Digital Simulation of Electrical NeTworks*”. *DigSilent* versi 7 adalah *software* analisis sistem tenaga pertama dengan gambar *single line* yang terintegrasikan.

DigSilent dirancang dan dikembangkan oleh *engineer* dan *programmer* yang berpengalaman di bidang elektrikal analisis sistem tenaga dan pemrograman. Keakuratan dan keabsahan hasil yang diperoleh dengan *DigSilent* telah digunakan dalam jumlah besar oleh organisasi meliputi perencanaan dan operasi sistem tenaga di seluruh dunia.

Untuk mengatasi persyaratan analisis sistem tenaga, *DigSilent* dirancang sebagai peralatan *engineering* untuk menyediakan analisis fungsi sistem tenaga dengan *program single executable*. Fitur-fitur meliputi:

1. Fungsi inti merupakan definisi, modifikasi, dan kasus-kasus; *numerical routine* inti dan fungsi dokumentasi.
2. *Single line graphic* interaktif yang terintegrasikan.
3. Elemen sistem tenaga dan *database* kasus.
4. Fungsi kalkulasi yang terintegrasikan.
5. Konfigurasi jaring sistem tenaga interaktif dan akses dengan *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA).
6. *Interface* umum untuk komputer berbasis sistem *mapping* (Samodra, 2018).