

**ANALISIS KESTABILAN FREKUENSI PADA SISTEM SULBAGSEL  
DENGAN LEPASNYA SALURAN TRANSMISI**



*Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan  
Program Strata Satu Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin  
Makassar*

Oleh :

**EMA ROBERTHO NANI**

**D411 16 311**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2021**

## LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

### Analisis Kestabilan Frekuensi pada Sistem Sulbagsel dengan Lepasnya Saluran Transmisi

Disusun dan diajukan oleh

**EMA ROBERTHO NANI**

**D411 16 311**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

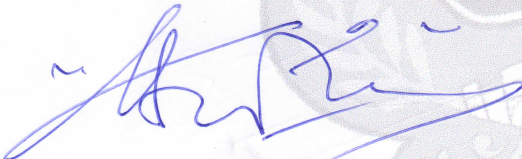
Pada Tanggal 09 Agustus 2021

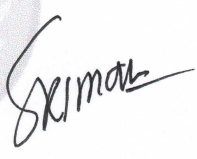
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

  
M. Bachtiar Nappu, ST., MT., M.Phil., Ph.D  
19760406 200312 1 002

  
Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, MT.  
19601106 198601 2 001

Ketua Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin



Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.  
19691026 199412 2 001

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Ema Robertho Nani  
NIM : D41116311  
Program Studi : Teknik Elektro  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

### **Analisis Kestabilan Frekuensi pada Sistem Sulbagsel dengan Lepasnya Saluran Transmisi**

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi/tesis/disertasi 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, 10 Agustus 2021

Yang Menyatakan



Ema Robertho Nani

## **ABSTRAK**

**Emo Robertho Nani, Analisis Kestabilan Frekuensi pada Sistem Sulbagsel dengan Lepasnya Saluran Transmisi (dibimbing oleh M. Bachtiar Nappu dan Sri Mawar Said)**

Seiring dengan berkembangnya zaman, kebutuhan manusia akan energi listrik semakin bertambah. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, diperlukan pembangkitan energi listrik yang sesuai dengan yang dibutuhkan. Untuk mengimbangi kebutuhan energi listrik yang semakin berkembang, maka dibangun berbagai macam pembangkit. Dalam sistem tenaga listrik, energi listrik disalurkan dari pembangkit ke beban melalui saluran transmisi. Sistem tenaga listrik dikatakan andal apabila dapat menyediakan energi listrik secara terus-menerus. Idealnya, energi listrik yang disalurkan memiliki frekuensi yang konstan. Tetapi, dalam kenyataannya tidak mungkin karena terjadi perubahan beban. Oleh karena itu, frekuensinya dijaga agar berada pada batas toleransi. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui kestabilan frekuensi pada sistem Sulbagsel pada saat salah satu saluran transmisi terputus. Simulasi yang dilakukan adalah simulasi pemutusan salah satu saluran transmisi sistem Sulbagsel pada beban puncak siang dan beban puncak malam. Frekuensi sistem Sulbagsel pada beban puncak malam sebesar 49,8 Hz dan frekuensi pada beban puncak siang sebesar 49,9 Hz. Pelepasan saluran transmisi Kendari – Unahaa menyebabkan islanding dan kenaikan pada sistem tersebut hingga 51,7 Hz. Oleh karena itu, dilakukan pelepasan PLTB Nii Tanasa 3. Sehingga, frekuensi sistem turun hingga 50,9 Hz.

Kata kunci : kestabilan frekuensi, sistem Sulbagsel, saluran transmisi

## **ABSTRACT**

### **Emma Robertho Nani, Frequency Stability Analysis in Sulbagsel System with Disconnection of Transmission Lines (supervised by M. Bachtiar Nappu dan Sri Mawar Said)**

Along with the times, the human need for electrical energy is increasing. To meet these needs, it is necessary to generate electrical energy accordance to needed. To keep pace with the growing demand for electrical energy, various kinds of power plants have been built. In an electric power system, electrical energy is transferred from the generator to the load through a transmission line. An electric power system is said to be reliable if it can provide electrical energy continuously. Ideally, the electrical energy supplied has a constant frequency. However, in reality it is not possible because of load changes. Therefore, the frequency is kept within the tolerance limit. The purpose of this study was to determine the frequency stability of the Sulbagsel system when one of the transmission lines was disconnected. The simulation carried out is a simulation of the disconnection of one of the Sulbagsel system transmission lines at peak day and night peak loads. Frequency of Sulbagsel system at night peak load is 49.8 Hz and the frequency at day peak load is 49.9 Hz. Disconnection of Kendari – Unaaha transmission lines caused islanding and increase system frequency up to 51.7 Hz. Therefore, PLTB Nii Tanasa 3 was released. Thus, the system frequency dropped to 50.9 Hz.

Keywords: frequency stability, Sulbagsel system, transmission lines

## KATA PENGANTAR

Puji dan dan Syukur dipanjatkan kepada Tuhan karena hanya oleh rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Kestabilan Frekuensi pada Sistem Sulbagsel dengan Lepasnya Saluran Transmisi”.

Adapun tujuan dari penulisan makalah ini adalah untuk memenuhi salah satu syarat guna menyelesaikan studi bagi mahasiswa program S-1 diprogram Studi Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang membantu penulis dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini. Sehubungan dengan hal tersebut, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Keluarga saya terus memberikan doa, memberikan motivasi, dan memberikan dukungan kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi saya ini.
2. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT, Ketua Departemen Teknik Elektro
3. Bapak M. Bachtiar Nappu, ST., MT., Ph.D dan Ibu Dr.Ir.Hj. Sri Mawar Said, MT selaku dosen pembimbing skripsi saya yang telah memberikan bimbingan dan kritik hingga dapat terselesaikannya skripsi ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Nadjamuddin Harun, M.Si dan Ibu Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph.D selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi.

5. Bapak/Ibu dosen dan staff di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin khususnya program Studi Teknik Elektro yang telah banyak membantu saya selama menjalani masa studi.
6. Seluruh pihak PT. PLN (Persero) UPB Makassar.
7. Kepada teman-teman KMKO Teknik 2016 atas semua doa dan dukungannya.
8. Kepada teman-teman EXCITER16 untuk kebersamaannya.
9. Kepada semua pihak yang terlibat dan tidak dapat saya sebut satu persatu, terima kasih yang tak terhingga atas semua dukungan dan bantuannya.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terdapat dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun bagi penulis sehingga penulisan skripsi ini dapat menjadi lebih baik. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun pembaca.

Makassar, Juli 2021

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR .....</b>	<b>ii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xxiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah .....	4
1.5. Metode Penelitian.....	5
1.6. Sistematika Penulisan.....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>7</b>
2.1. Sistem Pembangkitan .....	10
2.2. Sistem Transmisi.....	10
2.3. Sistem Distribusi.....	11
2.4. Sistem Interkoneksi .....	12
2.5. Mutu Tenaga Listrik.....	13
2.6. Pengendalian Sistem Daya.....	15
2.7. Konsep Dasar dan Defenisi Kestabilan.....	15
2.8. Klasifikasi Kestabilan.....	17
2.9. Kestabilan Frekuensi.....	18
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>22</b>
3.1. Judul Penelitian .....	22
3.2. Waktu dan Lokasi Penelitian.....	22
3.3. Pengambilan Data .....	22



3.4. Alur Penelitian.....	23
3.5. Prosedur Penelitian .....	24
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>25</b>
4.1. Perencanaan Simulasi.....	25
4.2. Data Sistem Sulbagsel.....	25
4.3. Hasil Simulasi.....	27
4.3.1. Beban Puncak Malam.....	29
A. Putusnya Saluran Transmisi 70 kV .....	29
A.1. Putusnya Saluran Transmisi Puuwatu – Nii Tanasa.....	30
A.2. Putusnya Saluran Transmisi Tello – Borongloe .....	35
A.3. Putusnya Saluran Transmisi Sidera – Tallise .....	40
B. Putusnya Saluran Transmisi 150 kV .....	44
B.1. Putusnya Saluran Transmisi Kendari – Moramo .....	44
B.2. Putusnya Saluran Transmisi Kendari – Unaaha.....	49
B.3. Putusnya Saluran Transmisi Tello – Panakukang .....	54
C. Putusnya Saluran Transmisi 275 kV .....	59
C.1. Putusnya Saluran Transmisi Latuppa – Pamona .....	59
C.2. Putusnya Saluran Transmisi Latuppa – Wotu .....	63
C.3. Putusnya Saluran Transmisi Wotu – Pamona .....	68
4.3.2. Beban Puncak Siang .....	72
A. Putusnya Transmisi 70 kV.....	73
A.1. Putusnya Saluran Transmisi Puuwatu – Nii Tanasa.....	74
A.2. Putusnya Saluran Transmisi Tello – Borongloe .....	79
A.3. Putusnya Saluran Transmisi Sidera – Tallise .....	83
B. Putusnya Transmisi 150 kV.....	87
B.1. Putusnya Saluran Transmisi Kendari – Moramo .....	87
B.2. Putusnya Saluran Transmisi Kendari – Unaaha.....	92
B.3. Putusnya Saluran Transmisi Tello – Panakukang .....	97
C. Putusnya Transmisi 275 kV.....	101
C.1. Putusnya Saluran Transmisi Latuppa – Pamona .....	101
C.2. Putusnya Saluran Transmisi Latuppa – Wotu .....	106
C.3. Putusnya Saluran Transmisi Wotu – Pamona .....	110
4.3.3. Penambahan Saluran Transmisi.....	114

A.	Beban Puncak Malam dengan Penambahan Saluran Transmisi.....	116
A.1.	Putusnya Saluran Transmisi Puuwatu – Nii Tanasa.....	117
A.2.	Putusnya Saluran Transmisi Tello – Borongloe .....	120
A.3.	Putusnya Saluran Transmisi Sidera – Tallise .....	124
A.4.	Putusnya Saluran Transmisi Kendari – Moramo .....	128
A.5.	Putusnya Saluran Transmisi Kendari – Unaaha.....	132
A.6.	Putusnya Saluran Transmisi Tello – Panakukang .....	136
B.	Beban Puncak Siang dengan Penambahan Saluran Transmisi .....	140
B.1.	Putusnya Saluran Transmisi Puuwatu – Nii Tanasa.....	141
B.2.	Putusnya Saluran Transmisi Tello – Borongloe .....	145
B.3.	Putusnya Saluran Transmisi Sidera – Tallise .....	149
B.4.	Putusnya Saluran Transmisi Kendari – Moramo .....	153
B.5.	Putusnya Saluran Transmisi Kendari – Unaaha.....	157
B.6.	Putusnya Saluran Transmisi Tello – Panakukang .....	161
4.3.4.	Output PLTB yang Berubah-ubah.....	165
A.	Beban Puncak Siang dengan Output PLTB yang berubah-ubah .....	227
B.	Beban Puncak Malam dengan Output PLTB yang berubah-ubah.....	254
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>169</b>
5.1.	Kesimpulan.....	169
5.2.	Saran.....	171
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>172</b>
<b>LAMPIRAN 1 DATA SULBAGSEL .....</b>		<b>173</b>
<b>LAMPIRAN 2 PERMEN ESDM NO. 20 TAHUN 2020 .....</b>		<b>182</b>
<b>LAMPIRAN 3 HASIL SIMULASI PLTB.....</b>		<b>184</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Diagram satu saluran dari sistem tenaga [1] .....	9
<b>Gambar 3. 1</b> Flowchart .....	23
<b>Gambar 4. 1</b> Single line diagram sistem Sulbagsel .....	26
<b>Gambar 4. 2</b> Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel dengan menggunakan data beban puncak malam.....	29
<b>Gambar 4. 3</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu, Unaha, dan Wotu pada saat saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa terputus.....	30
<b>Gambar 4. 4</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa terputus.....	31
<b>Gambar 4. 5</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa terputus.....	32
<b>Gambar 4. 6</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa serta CB PLTU Nii Tanasa 1 terbuka pada detik 180,4 dan CB PLTU Nii Tanasa 3 terbuka pada detik 180,44. ....	34
<b>Gambar 4. 7</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Tello – Borongloe terputus .....	36
<b>Gambar 4. 8</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Tello – Borongloe terputus.....	37
<b>Gambar 4. 9</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu, Unaha, dan Wotu pada saat saluran transmisi Tello – Borongloe terputus .....	38

<b>Gambar 4. 10</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Sidera - Tallise terputus .....	40
<b>Gambar 4. 11</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Sidera - Tallise terputus .....	41
<b>Gambar 4. 12</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu, Unaha, dan Wotu pada saat saluran transmisi Sidera - Tallise terputus .....	42
<b>Gambar 4. 13</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Kendari - Moramo terputus .....	45
<b>Gambar 4. 14</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Kendari - Moramo terputus.....	46
<b>Gambar 4. 15</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu, Unaaha, dan Wotu pada saat saluran transmisi Kendari - Moramo terputus .....	47
<b>Gambar 4. 16</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Kendari - Unaaha terputus.....	49
<b>Gambar 4. 17</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Kendari - Unaaha terputus .....	50
<b>Gambar 4. 18</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu, Unaaha, dan Wotu pada saat saluran transmisi Kendari - Unaaha terputus .....	51
<b>Gambar 4. 19</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Unaaha pada detik 180 dan CB PLTU Nii Tanasa 3 open pada detik 181,31 .....	53

<b>Gambar 4. 20</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Tello - Panakukang terputus .....	55
<b>Gambar 4. 21</b> Simulasi frekuensi pada bus Bone, Enrekang, Latuppa, Makale, Palopo, Sengkang, Sidrap, Sinjai, Siwa, dan Soppeng pada saat saluran transmisi Tello - Panakukang terputus .....	56
<b>Gambar 4. 22</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu, Unaaha, dan Wotu pada saat saluran transmisi Tello - Panakukang terputus .....	57
<b>Gambar 4. 23</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat saluran transmisi Latuppa - Pamona terputus .....	59
<b>Gambar 4. 24</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Latuppa - Pamona terputus .....	60
<b>Gambar 4. 25</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Latuppa - Pamona terputus .....	61
<b>Gambar 4. 26</b> Simulasi frekuensi pada bus Latuppa 275 kV, Pamona 275 kV, dan Wotu 275 kV pada saat saluran transmisi Latuppa - Pamona terputus.....	62
<b>Gambar 4. 27</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat saluran transmisi Latuppa - Wotu terputus.....	64
<b>Gambar 4. 28</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Latuppa - Wotu terputus .....	65
<b>Gambar 4. 29</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Latuppa - Wotu terputus .....	66
<b>Gambar 4. 30</b> Simulasi frekuensi pada bus Latuppa 275 kV, Pamona 275 kV, dan Wotu 275 kV pada saat saluran transmisi Latuppa - Wotu terputus.....	67

<b>Gambar 4. 31</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat saluran transmisi Wotu - Pamona terputus .....	68
<b>Gambar 4. 32</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Latuppa - Pamona terputus .....	69
<b>Gambar 4. 33</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Latuppa - Pamona terputus .....	70
<b>Gambar 4. 34</b> Simulasi frekuensi pada bus Latuppa 275 kV, Pamona 275 kV, dan Wotu 275 kV pada saat saluran transmisi Wotu - Pamona terputus .....	71
<b>Gambar 4. 35</b> Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel dengan menggunakan data beban puncak siang .....	73
<b>Gambar 4. 36</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa terputus .....	74
<b>Gambar 4. 37</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa terputus .....	75
<b>Gambar 4. 38</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa terputus .....	76
<b>Gambar 4. 39</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa serta pelepasan PLTU Nii Tanasa 1 dan PLTU Nii Tanasa 3.....	78
<b>Gambar 4. 40</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat saluran transmisi Tello – Borongloe terputus .....	80
<b>Gambar 4. 41</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Tello – Borongloe terputus.....	81

<b>Gambar 4. 42</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Tello - Borongloe terputus.....	82
<b>Gambar 4. 43</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat saluran transmisi Sidera – Tallise terputus.....	84
<b>Gambar 4. 44</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Sidera – Tallise terputus.....	85
<b>Gambar 4. 45</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Sidera – Tallise terputus.....	86
<b>Gambar 4. 46</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat saluran transmisi Kendari – Moramo terputus.....	88
<b>Gambar 4. 47</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Kendari - Moramo terputus.....	89
<b>Gambar 4. 48</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Kendari - Moramo terputus.....	90
<b>Gambar 4. 49</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat saluran transmisi Kendari – Unaaha terputus.....	92
<b>Gambar 4. 50</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Kendari - Unaaha terputus.....	94
<b>Gambar 4. 51</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Kendari – Unaaha terputus.....	95
<b>Gambar 4. 52</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat saluran transmisi Tello – Panakukang terputus.....	98

<b>Gambar 4. 53</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Tello - Panakukang terputus.....	99
<b>Gambar 4. 54</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Tello – Panakukang terputus .....	100
<b>Gambar 4. 55</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat saluran transmisi Latuppa - Pamona terputus .....	102
<b>Gambar 4. 56</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Latuppa - Pamona terputus.....	103
<b>Gambar 4. 57</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Latuppa - Pamona terputus .....	104
<b>Gambar 4. 58</b> Simulasi frekuensi pada bus Latuppa 275 kV, Pamona 275 kV, dan Wotu 275 kV pada saat saluran transmisi Latuppa - Pamona terputus.....	105
<b>Gambar 4. 59</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat saluran transmisi Latuppa – Wotu terputus.....	106
<b>Gambar 4. 60</b> Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Latuppa – Wotu terputus .....	107
<b>Gambar 4. 61</b> Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Latuppa – Wotu terputus.....	108
<b>Gambar 4. 62</b> Simulasi frekuensi pada bus Latuppa 275 kV, Pamona 275 kV, dan Wotu 275 kV pada saat saluran transmisi Latuppa – Wotu terputus .....	109
<b>Gambar 4. 63</b> Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat saluran transmisi Wotu - Pamona terputus.....	110



- Gambar 4. 64** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat saluran transmisi Wotu – Pamona terputus ..... 111
- Gambar 4. 65** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat saluran transmisi Wotu – Pamona terputus ..... 112
- Gambar 4. 66** Simulasi frekuensi pada bus Latuppa 275 kV, Pamona 275 kV, dan Wotu 275 kV pada saat saluran transmisi Wotu - Pamona terputus ..... 113
- Gambar 4. 67** Single line diagram sistem Sulbagsel setelah dilakukan penambahan saluran transmisi Panakukang – Sungguminasa, Borongloe – Daya, Moramo – Nii Tanasa, Moramo – Puuwatu, Wotu – Puuwatu, serta Pamona – Parigi..... 115
- Gambar 4. 68** Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel dengan menggunakan data beban puncak malam setelah dilakukan penambahan saluran transmisi ..... 116
- Gambar 4. 69** Simulasi frekuensi bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi.... 117
- Gambar 4. 70** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi.... 118
- Gambar 4. 71** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi .... 119
- Gambar 4. 72** Simulasi frekuensi bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Tello - Borongloe dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi ..... 121
- Gambar 4. 73** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Tello - Borongloe dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi ..... 122

**Gambar 4. 74** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Tello - Borongloe dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi .... 123

**Gambar 4. 75** Simulasi frekuensi bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Sidera – Tallise dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi ..... 125

**Gambar 4. 76** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Sidera – Tallise dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi ..... 126

**Gambar 4. 77** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Sidera – Tallise dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi ..... 127

**Gambar 4. 78** Simulasi frekuensi bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Moramo dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi ..... 129

**Gambar 4. 79** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Moramo dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi ..... 130

**Gambar 4. 80** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Moramo dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi .... 131

**Gambar 4. 81** Simulasi frekuensi bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Unaaha dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi ..... 133

**Gambar 4. 82** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat

dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Unaaha dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi ..... 134

**Gambar 4. 83** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Unaaha dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi .... 135

**Gambar 4. 84** Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Tello - Panakukang dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi .... 137

**Gambar 4. 85** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Tello - Panakukang dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi ..... 138

**Gambar 4. 86** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Tello - Panakukang dengan menggunakan data beban puncak malam dan penambahan saluran transmisi .... 139

**Gambar 4. 87** Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel dengan menggunakan data beban puncak siang setelah dilakukan penambahan saluran transmisi ..... 141

**Gambar 4. 88** Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 142

**Gambar 4. 89** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 143

**Gambar 4. 90** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Puuwatu – Nii Tanasa dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 144

**Gambar 4. 91** Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Tello – Borongloe dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 146

**Gambar 4. 92** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Tello – Borongloe dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 147

**Gambar 4. 93** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Tello – Borongloe dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 148

**Gambar 4. 94** Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Sidera – Tallise dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 150

**Gambar 4. 95** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Sidera – Tallise dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 151

**Gambar 4. 96** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Sidera – Tallise dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 152

**Gambar 4. 97** Simulasi frekuensi bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Moramo dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 154

**Gambar 4. 98** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Moramo dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 155

**Gambar 4. 99** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada

saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Moramo dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 156

**Gambar 4. 100** Simulasi frekuensi pada bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Unaaha dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 158

**Gambar 4. 101** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Unaaha dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 159

**Gambar 4. 102** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Kendari – Unaaha dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 160

**Gambar 4. 103** Simulasi frekuensi bus Kendari, Kolaka, Lasusua, Malili, Moramo, Nii Tanasa, Puuwatu 150 kV, Puuwatu 70 kV, Unaaha, dan Wotu 150 kV pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Tello – Panakukang dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 162

**Gambar 4. 104** Simulasi frekuensi pada bus Majene, Mamuju, Pamona 150 kV, Pasangkayu, PLTU Mamuju, Poso, Sidera 150 kV, Silae, dan Topoyo pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Tello – Panakukang dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 163

**Gambar 4. 105** Simulasi frekuensi pada bus Bontoala 150 kV, Bosowa, Kima, Panakukang, Pangkep, Sungguminasa, Tallo Lama, Tanjung Bunga, dan Tello pada saat dilakukan pemutusan saluran transmisi Tello – Panakukang dengan menggunakan data beban puncak siang dan penambahan saluran transmisi ..... 164

**Gambar 4. 106** Kecepatan angin PLTB Sidrap dan PLTB Tolo pada tanggal 03 Januari 2021 sampai dengan 10 Januari 2021 ..... 1647

**Gambar 4. 107** Output PLTB Sidrap dan PLTB Tolo pada tanggal 03 Januari 2021 sampai dengan 10 Januari 2021 ..... 1647

**Gambar 4. 108** Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel dengan menggunakan data beban puncak siang serta menggunakan output PLTB Sidrap dan PLTB Tolo yang berubah-ubah ..... 1648

**Gambar 4. 109** Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel dengan menggunakan data beban puncak malam serta menggunakan output PLTB Sidrap dan PLTB Tolo yang berubah-ubah ..... 1649

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1. 1</b> Batas Rentang Frekuensi Operasi [6] .....	21
<b>Tabel 4. 1</b> Frekuensi Sistem Sulbagsel dengan Menggunakan Data Beban Puncak Siang serta Menggunakan Kecepatan Rata-rata Harian Angin pada PLTB Sidrap dan PLTB Tolo.....	227
<b>Tabel 4. 2</b> Frekuensi Sistem Sulbagsel dengan Menggunakan Data Beban Puncak Siang serta Menggunakan Kecepatan Minimal Harian Angin pada PLTB Sidrap dan PLTB Tolo.....	236
<b>Tabel 4. 3</b> Frekuensi Sistem Sulbagsel dengan Menggunakan Data Beban Puncak Siang serta Menggunakan Kecepatan Maksimal Harian Angin pada PLTB Sidrap dan PLTB Tolo.....	245
<b>Tabel 4. 4</b> Frekuensi Sistem Sulbagsel dengan Menggunakan Data Beban Puncak Malam serta Menggunakan Kecepatan Rata-rata Harian Angin pada PLTB Sidrap dan PLTB Tolo.....	255
<b>Tabel 4. 5</b> Frekuensi Sistem Sulbagsel dengan Menggunakan Data Beban Puncak Malam serta Menggunakan Kecepatan Minimal Harian Angin pada PLTB Sidrap dan PLTB Tolo.....	264
<b>Tabel 4. 6</b> Frekuensi Sistem Sulbagsel dengan Menggunakan Data Beban Puncak Malam serta Menggunakan Kecepatan Maksimal Harian Angin pada PLTB Sidrap dan PLTB Tolo.....	273
<b>No table of figures entries found.</b>	
<b>Tabel 6. 1</b> Data transmisi sistem Sulbagsel.....	173
<b>Tabel 6. 2</b> Data transmisi sistem Sulbagsel.....	174
<b>Tabel 6. 3</b> Data pembangkit sistem Sulbagsel .....	175
<b>Tabel 6. 4</b> Data trafo distribusi sistem Sulbagsel .....	177
<b>Tabel 6. 5</b> Data trafo IBT sistem Sulbagsel .....	179
<b>Tabel 6. 6</b> Data beban sistem Sulbagsel .....	179
<b>Tabel 6. 7</b> Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel dengan menggunakan data beban puncak siang dan output PLTB Sidrap dan PLTB Tolo yang berubah-ubah ....	1795
<b>Tabel 6. 8</b> Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel dengan menggunakan data beban puncak malam dan output PLTB Sidrap dan PLTB Tolo yang berubah-ubah....	179

# **BAB I**

## **PEDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang Masalah**

Seiring dengan berkembangnya zaman, kebutuhan manusia akan energi listrik juga semakin meningkat. Untuk memenuhi kebutuhan manusia akan energi listrik, maka dibutuhkan pembangkit listrik yang mampu membangkitkan energi listrik sesuai dengan yang dibutuhkan. Oleh karena itu, peningkatan akan kebutuhan energi listrik ini harus diikuti dengan peningkatan pembangkitan energi listrik.

Pembangkit listrik dapat dibedakan menjadi beberapa jenis. Berdasarkan sumbernya, pembangkit listrik dibagi menjadi dua, yaitu pembangkit listrik konvensional dan pembangkit listrik non konvensional. Pembangkit listrik konvensional adalah pembangkit yang menggunakan energi yang tidak dapat diperbaharui sebagai sumber energi. Contoh dari pembangkit listrik konvensional, yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Sedangkan, Pembangkit listrik non konvensional merupakan pembangkit yang menggunakan energi yang dapat diperbaharui sebagai sumber energinya. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

Akhir-akhir ini, banyak peneliti yang tertarik untuk mengembangkan pembangkit listrik non konvensional. Selain itu, pembangunan pembangkit listrik non konvensional juga semakin marak. Hal ini terjadi karena pembangkit



listrik konvensional memiliki beberapa permasalahan seperti dampak lingkungan yang ditimbulkan serta terbatasnya sumber energi yang digunakan sebagai bahan bakar pembangkit tersebut. Salah satu contoh dari pembangunan pembangkit listrik non konvensional yaitu dibangunnya PLTB Sidrap dan PLTB Jeneponto.

PLTB merupakan salah satu jenis pembangkit listrik non konvensional yang menggunakan angin sebagai sumber energi untuk membangkitkan energi listrik. Walaupun PLTB memiliki beberapa keuntungan, tetapi PLTB memiliki beberapa kekurangan. Salah satu contoh kekurangan yang dimiliki PLTB adalah ketidakstabilan kecepatan angin yang menjadi sumber energi dari PLTB itu sendiri. Ketidakstabilan angin ini menyebabkan beberapa masalah pada sistem di PLTB seperti ketidakstabilan frekuensi dari listrik yang dihasilkan dan lain-lain. Apabila PLTB menyuplai energi listrik yang tidak stabil ke sistem, maka akan mengganggu kestabilan pada sistem yang diinterkoneksi dengan pembangkit tersebut.

PLTB Jeneponto dan PLTB Sidrap merupakan pembangkit pertama di Indonesia yang menggunakan angin sebagai sumber energinya dan menghasilkan daya yang cukup besar. PLTB Jeneponto memiliki kapasitas daya sebesar 60 MW dan PLTB Sidrap memiliki kapasitas daya sebesar 75 MW. PLTB Jeneponto dan PLTB Sidrap diinterkoneksi dengan pembangkit-pembangkit lain pada sistem sulbagsel. Tujuan dari interkoneksi ini adalah untuk membackup pembangkit lain apabila terdapat masalah pada pembangkit lain sehingga tidak dapat menyuplai beban. Selain itu, dengan adanya

interkoneksi maka jumlah beban yang ditanggung pembangkit dapat sesuai dengan jumlah daya yang dapat dibangkitkan pembangkit tersebut. Dengan adanya interkoneksi maka pembangkit dapat menyuplai beban dengan energi listrik dengan kualitas yang baik.

Sistem tenaga listrik dapat dikatakan andal apabila dapat menyediakan energi listrik secara terus-menerus. Idealnya, sistem tenaga listrik harus memiliki tegangan dan frekuensi yang konstan. Tetapi, dalam kenyataan tidak mungkin terjadi tetapi tegangan dan frekuensinya tetap dijaga agar tetap berada pada batas toleransi.

Sistem penyaluran (transmisi) sebagai bagian dari sistem tenaga listrik memegang peranan penting dalam penyampaian tenaga listrik dari pusat-pusat pembangkit tenaga listrik ke gardu induk. Banyak faktor yang dapat menyebabkan gangguan pada sistem transmisi seperti putusnya konduktor akibat kondisi konduktor yang sudah keropos, adanya penebangan pohon maupun angin kencang yang menyebabkan pohon menyentuh konduktor, serta gangguan alam seperti petir yang menyebabkan *circuit breaker* pada saluran transmisi terbuka.

Berdasarkan masalah-masalah diatas maka dilakukanlah penelitian dengan judul “Analisis Kestabilan Frekuensi Sistem Sulbagsel dengan Lepasnya Saluran Transmisi”.

## **1.2.Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana kestabilan frekuensi sistem Sulbagsel?
2. Bagaimana kestabilan frekuensi sistem Sulbagsel pada saat terdapat salah satu saluran transmisi lepas?
3. Bagaimana solusi untuk mempertahankan kestabilan frekuensi apabila terjadi ketidakstabilan?

## **1.3.Tujuan Penelitian**

Tujuan dari skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis kestabilan frekuensi sistem.
2. Menganalisis kestabilan frekuensi sistem Sulbagsel pada saat terdapat salah satu saluran transmisi lepas.
3. Mengetahui solusi untuk mempertahankan kestabilan frekuensi apabila terjadi ketidakstabilan.

## **1.4.Batasan Masalah**

Agar masalah yang akan dibahas menjadi jelas dan tidak menyimpang dari topik maka penulis menekankan pada beberapa hal, yaitu:

1. Sistem yang dianalisis adalah sistem Sulbagsel.
2. Perkiraan beban yang digunakan berdasarkan data dari PT. PLN.

3. Gangguan hanya pada saluran transmisi 150 kV atau 275 kV.

### **1.5. Metode Penelitian**

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Studi literatur dengan membaca buku, jurnal, ataupun sumber lain yang dapat menunjang penelitian.
2. Pengambilan data yang dilakukan di tempat penelitian.
3. Pengolahan data yang dilakukan dengan melakukan simulasi berdasarkan data yang telah diperoleh.
4. Analisa data yang diperoleh dari simulasi.
5. Penyusunan laporan Tugas Akhir berdasarkan data yang telah dianalisa.

## **1.6.Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan proposal ini, yaitu:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab pertama membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab kedua, dideskripsikan teori dasar yang diperlukan untuk melakukan penelitian ini.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab tiga membahas tentang waktu dan tempat penelitian, metode pengambilan data, analisa data, dan langkah-langkah penelitian.

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

Bab ini berisi pembahasan yang ada pada rumusan masalah.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi kesimpulan dan saran.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Sebagian energi yang membutuhkan masyarakat sekarang dipenuhi oleh energi listrik, melalui sistem tenaga listrik yang terbagi dalam tiga subsistem sebagai berikut [1]:

1. Sistem Pembangkitan
2. Sistem Transmisi
3. Sistem Distribusi.

Sistem Pembangkitan Tenaga Listrik berfungsi membangkitkan energi listrik melalui berbagai macam pembangkit tenaga listrik. Pada pembangkit tenaga listrik ini sumber-sumber energi alam diubah oleh penggerak mula menjadi energi mekanis yang berupa kecepatan atau putaran yang selanjutnya energi mekanis tersebut diubah menjadi energi listrik oleh generator. Sumber-sumber energi alam ini dapat berupa [1]:

1. Bahan bakar yang berasal dari fosil seperti batubara, minyak bumi dan gas alam.
2. Bahan galian seperti uranium dan thorium.
3. Tenaga air, terutama yang penting adalah tinggi jatuh air dan debitnya.
4. Tenaga angin untuk daerah pantai dan pegunungan.
5. Tenaga matahari.

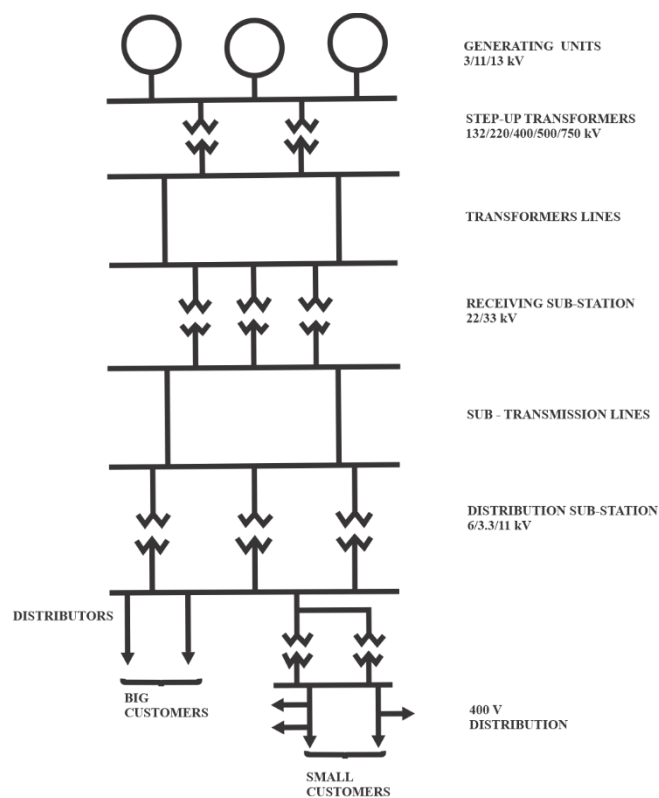
Sistem transmisi berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban melalui saluran transmisi, karena ada kalanya

pembangkit tenaga listrik dibangun di tempat yang jauh dari pusat-pusat bebannya, seperti misalnya pembangkit listrik tenaga air dibangun dekat sumber energi alam misalnya berupa air terjun yang jauh di pedalaman, sedangkan pusat beban atau konsumen tenaga listrik misalnya pabrik, industri, komersial, perumahan dan sebagainya kebanyakan di perkotaan. Saluran transmisi ini akan mengalami rugi-rugi tenaga, maka untuk mengatasi hal tersebut tenaga yang dikirim dari pusat pembangkit ke pusat beban harus ditransmisikan dengan tegangan tinggi maupun tegangan ekstra tinggi [1].

Sistem distribusi berfungsi mendistribusikan tenaga listrik ke konsumen yang berupa pabrik, industri, perumahan dan sebagainya. Transmisi tenaga dengan tegangan tinggi maupun tegangan ekstra tinggi pada saluran transmisi diubah pada gardu induk menjadi tegangan menengah atau tegangan distribusi primer, yang selanjutnya tegangannya dapat diubah lagi menjadi tegangan untuk konsumen. Energi listrik pada sisi konsumen ini dapat diubah lagi menjadi energi mekanis yang terpakai melalui motor listrik untuk menggerakkan mesin-mesin pabrik baik di pabrik maupun di industri, dan peralatan listrik di rumah tangga seperti pompa air, kipas angin, mesin pendingin dan penyejuk ruangan, untuk kompor, setrika, penerangan dan sebagainya [1].

Sistem pembangkit, sistem transmisi dan sistem distribusi ini dapat digambarkan menjadi diagram satu saluran (*one line diagram*) secara sederhana seperti *Gambar 2.1* [1].

Sistem tenaga yang sederhana seperti pada *Gambar 2.1*, tenaga listrik yang dibangkitkan pada pembangkit tenaga listrik dengan tegangan 3/6/13/26 kV oleh transformator tenaga dapat dinaikkan tegangannya menjadi tegangan saluran transmisi 70/150/345/500/700 kV yang selanjutnya disisi penerimaan saluran transmisi yakni di gardu induk tegangannya diturunkan lagi menjadi tegangan menengah atau tegangan distribusi primer 33/20/11/6 kV. Dari tegangan distribusi primer ini kemudian tegangannya diturunkan lagi menjadi tegangan pemakaian untuk konsumen sebesar 400/380/220 volt [1].



**Gambar 2.1** Diagram satu saluran dari sistem tenaga [1]



## **2.1.Sistem Pembangkitan**

Sistem Pembangkitan Tenaga Listrik yang mengubah energi alam menjadi energi mekanik yang selanjutnya menjadi energi listrik dapat dikategorikan berdasarkan energi alam yang ada sebagai berikut [1]:

1. Energi alam yang berasal dari fosil seperti batubara, minyak bumi dan gas alam akan menghasilkan pembangkit thermal berupa Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pusat Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pusat Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTPB)
2. Energi alam yang berupa bahan galian seperti uranium dan thorium akan menghasilkan pembangkit thermal seperti Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).
3. Energi alam yang berasal dari air terjun maupun aliran sungai akan menghasilkan pembangkit listrik hidro berupa Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA).
4. Energi alam berupa tenaga angin, tenaga pasang naik dan pasang surut air laut masih belum dimanfaatkan dengan baik.
5. Energi alam yang berasal dari tenaga matahari masih dikembangkan terus, sehingga belum dipasarkan secara komersial.

## **2.2.Sistem Transmisi**

Sistem transmisi berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari pusat-pusat pembangkit tenaga listrik yang jauh dari pusat-pusat beban, dan juga untuk saluran

interkoneksi antara sistem tenaga listrik yang satu dengan sistem tenaga listrik yang lain, yang pada dasarnya dapat dikategorikan menjadi [1]:

1. Berdasarkan arus terdiri dari saluran transisi arus bolak-balik dan transmisi arus searah.
2. Berdasarkan tegangan terdiri dari saluran tegangan rendah, saluran tegangan menengah, saluran tegangan tinggi dan saluran tegangan ekstra tinggi, yang masing-masing mengikuti standar tertentu.
3. Berdasarkan penempatan terdiri dari saluran udara dan saluran bawah tanah.
4. Berdasarkan jarak terdiri dari saluran transmisi jarak pendek sekitar sampai dengan 50 mil, saluran transmisi jarak menengah antara 50 mil sampai dengan 150 mil dan saluran transmisi jarak jauh lebih dari 150 mil.
5. Berdasarkan karakteristiknya saluran transmisi mempunyai parameter yang terdiri dari resistans, induktans, kapasitans dan konduktans.

### **2.3.Sistem Distribusi**

Sistem distribusi tenaga listrik berfungsi untuk membagi tenaga listrik ke konsumen baik pabrik, industri, komersial dan umum untuk kebutuhan tenaga listrik perumahan yang dapat diklasifikasikan menjadi [1]:

1. Berbagai tipe saluran distribusi yang terdiri dari:
  - a. Menurut arus, searah dan bolak balik
  - b. Menurut besar tegangan yang dipakai

- c. Menurut frekuensi yang dipakai.
  - d. Menurut jenis konstruksi yang dipakai.
  - e. Menurut beban, penerangan, komersial dan industri.
  - f. Menurut bentuk sambungan, 3 fasa 3 kawat, 3 fasa 4 kawat, fasa tunggal.
  - g. Menurut hubungan rangkaian, radial, tertutup (*loop*), dan jaringan jala (*network*).
  - h. Menurut sistem pentanahan titik netralnya.
2. Berdasarkan peralatan terdiri dari tiang penyangga, penghantar, isolator dan trafo distribusi.
  3. Berdasarkan pengaman gangguan sistem distribusi:
    - a. Pengaman terhadap arus lebih dapat mempergunakan pengaman lebur, penutup balik otomatis dan pemutus tenaga untuk distribusi saluran udara; pengaman lebur dan pemutus tenaga untuk saluran distribusi bawah tanah.
    - b. Pengaman terhadap gangguan tegangan lebih, untuk saluran distribusi udara memakai arrester atau penangkal petir.

#### **2.4.Sistem Interkoneksi**

Pusat listrik yang besar, diatas 100 MW, umumnya beroperasi dalam sistem interkoneksi. Pada sistem interkoneksi terdapat banyak pusat listrik dan banyak pusat beban (yang disebut gardu induk, disingkat GI) yang dihubungkan satu sama lain oleh saluran transmisi. Di setiap GI terdapat beban berupa jaringan distribusi

yang melayani para konsumen tenaga listrik. Jaringan distribusi beserta konsumen ini merupakan suatu subsistem distribusi. Subsistem dari setiap GI umumnya tidak mempunyai hubungan listrik satu sama lain [2].

### **2.5.Mutu Tenaga Listrik**

Dengan makin pentingnya peranan tenaga listrik dalam kehidupan sehari-hari, khususnya bagi keperluan industri, maka mutu tenaga listrik juga menjadi tuntutan yang makin besar dari pihak pemakai tenaga listrik [2].

Mutu tenaga listrik ini meliputi [2]:

- a. Kontinuitas penyediaan; apakah tersedia 24 jam sehari sepanjang tahun.
- b. Nilai tegangan; apakah selalu berada dalam batas-batas yang diijinkan.
- c. Nilai frekuensi; apakah selalu berada dalam batas-batas yang diijinkan.
- d. Kedip tegangan; apakah besarnya dan lamanya masih dapat diterima oleh pemakai tenaga listrik.
- e. Kandungan harmonisa; apakah jumlahnya masih dalam batas-batas yang dapat diterima oleh pemakai tenaga listrik

Unsur-unsur (a) sampai dengan (e) tersebut di atas dapat direkam sehingga masalahnya dapat dibahas secara kuantitatif antara pihak penyedia dan pemakai tenaga listrik [2].

Pembangkitan dalam sistem interkoneksi merupakan pembangkitan terpadu dari semua pusat listrik yang ada dalam sistem pembagian beban antara pusat-pusat listrik pada sistem interkoneksi yang menghasilkan aliran daya dalam saluran

transmisi dan juga menghasilkan profil tegangan dalam sistem. Keseluruhan sistem harus dijaga agar tegangan, arus, dan dayanya masih terdapat dalam batas-batas yang diizinkan [2].

Frekuensi sistem diatur dengan mengatur daya aktif (daya nyata) yang dibangkitkan dalam pusat listrik. Karena frekuensi dalam setiap bagian sistem sama, maka daya aktif yang dibangkitkan untuk mengatur frekuensi tidak terikat pada letak pusat listriknya, kecuali jika timbul masalah aliran daya [2].

Sistem yang terisolir adalah sistem yang hanya mempunyai sebuah pusat listrik saja dan tidak ada interkoneksi antar pusat listrik serta tidak ada hubungan dengan jaringan umum (interkoneksi milik PLN). Sistem yang tersolir misalnya terdapat di industri pengolahan kayu yang berada di tengah hutan atau pada pengeboaran minyak lepas pantai yang berada di tengah laut. Pada sistem yang terisolir umumnya digunakan PLTD atau PLTG. Pada sistem yang terisolir, pembagian beban hanya dilakukan di antara unit-unit pembangkit di dalam satu pusat listrik sehingga tidak ada masalah penyaluran daya antar pusat listrik seperti hanya pada distribusi yang terbatas pada satu desa, yaitu pada daerah yang baru mengalami elektrifikasi [2].

Dalam sistem interkoneksi, ada banyak pusat listrik dan GI, satu sama lain dihubungkan dengan saluran transmisi. Setiap kejadian operasi di satu pusat listrik, GI, atau saluran transmisi dalam sistem interkoneksi akan mempengaruhi sistem keseluruhan. Jadi harus ada koordinator operasi, disebut pusat pengatur beban [2].

## **2.6.Pengendalian Sistem Daya**

Sistem tenaga listrik berfungsi untuk mengubah energi listrik dari suatu bentuk energi yang tersedia secara alami ke bentuk energi listrik dan mengirimnya ke titik-titik konsumsi. Energi listrik sangat jarang dikonsumsi secara langsung, melainkan diubah menjadi bentuk energi lain seperti panas, cahaya, dan energi mekanik. Keuntungan dari bentuk energi listrik adalah dapat dikirim dan dikendalikan dengan relative mudah serta dengan tingkat efisiensi dan keandalan yang tinggi. Oleh karena itu, sistem tenaga listrik yang dirancang dan dioperasikan dengan baik harus memenuhi persyaratan sebagai berikut [3]:

1. Sistem harus dapat memenuhi permintaan beban yang terus berubah, baik daya aktif maupun reaktif.
2. Sistem harus memasok energi dengan biaya minimum dan dengan dampak lingkungan yang minimum.
3. Kualitas catu daya harus memenuhi standar minimum tertentu sehubungan dengan faktor- faktor berikut:
  - a. Kestabilan frekuensi;
  - b. Kestabilan tegangan; dan
  - c. Tingkat keandalan.

## **2.7.Konsep Dasar dan Defenisi Kestabilan**

Kestabilan sistem tenaga dapat didefenisikan sebagai sifat dari sistem tenaga yang memungkinkannya untuk tetap dalam kondisi keseimbangan operasi

normal dan dapat mengembalikan kondisinya ke kondisi keseimbangan yang dapat ditoleransi setelah mengalami gangguan [3].

Ketidakstabilan dalam sistem tenaga dapat diartikan dalam banyak cara yang berbeda tergantung pada konfigurasi sistem dan mode operasi. Secara sederhana, masalah kestabilan adalah salah satu dari mempertahankan operasi sinkron. Karena sistem daya bergantung pada mesin sinkron untuk menghasilkan daya listrik, syarat yang diperlukan untuk operasi sistem yang memuaskan adalah bahwa semua mesin sinkron tetap sinkron. Aspek kestabilan ini dipengaruhi oleh dinamika sudut rotor generator dan hubungan sudut daya [3].

Ketidakstabilan juga dapat ditemukan tanpa kehilangan sinkronisasi. Sebagai contoh, suatu sistem yang terdiri dari generator sinkron yang menyuplai motor induksi melalui saluran transmisi dapat menjadi tidak stabil karena jatuh tegangan pada beban. Pemeliharaan sinkronisasi tidak menjadi masalah dalam hal ini; sebaliknya, yang menjadi perhatian adalah kestabilan dan kontrol tegangan. Bentuk ketidakstabilan ini juga dapat terjadi pada beban yang mencakup area luas yang dipasok oleh sistem besar [3].

Dalam evaluasi kestabilan, yang menjadi perhatian adalah perilaku sistem tenaga ketika mengalami gangguan sementara. Baik gangguan kecil maupun gangguan besar. Gangguan kecil dalam bentuk perubahan beban berlangsung secara terus-menerus dan sistem menyesuaikan diri dengan kondisi yang berubah. Sistem harus dapat beroperasi secara memuaskan dalam kondisi ini dan berhasil memasok jumlah beban maksimum. Sistem juga harus mampu bertahan dari

berbagai gangguan yang parah, seperti arus hubung singkat pada saluran transmisi, lepasnya generator dan beban besar, atau putusnya koneksi antara dua subsistem. Respon sistem terhadap gangguan melibatkan banyak peralatan. Misalnya, hubung singkat pada elemen kritis yang diikuti oleh pemisahan oleh relai proteksi akan menyebabkan variasi dalam transfer daya, kecepatan rotor mesin, dan tegangan bus; variasi tegangan akan menggerakkan regulator tegangan generator dan sistem transmisi; variasi kecepatan akan menggerakkan *governor* penggerak utama; perubahan tegangan dan frekuensi akan mempengaruhi beban pada sistem dalam tingkat yang bervariasi tergantung pada karakteristik masing-masing. Selain itu, perangkat yang digunakan untuk melindungi peralatan individu dapat merespon variasi dalam variabel sistem sehingga dapat mempengaruhi kinerja sistem [3].

## **2.8. Klasifikasi Kestabilan**

Ketidakstabilan sistem tenaga dapat dalam bentuk yang berbeda dan dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor. Analisis masalah kestabilan, identifikasi faktor-faktor penting yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan, dan pembentukan metode untuk meningkatkan operasi yang stabil sangat difasilitasi oleh klasifikasi kestabilan ke dalam kategori yang sesuai. Ini didasarkan pada pertimbangan berikut [3]:

1. Sifat fisik dari ketidakstabilan yang dihasilkan;
2. Ukuran gangguan dipertimbangkan;



3. Perangkat, proses, dan rentang waktu yang harus dipertimbangkan untuk menentukan kestabilan; dan
4. Metode perhitungan dan prediksi kestabilan yang paling tepat.

Sistem tenaga dapat mengalami berbagai macam gangguan, baik kecil dan besar. Pada gangguan kecil dalam bentuk perubahan beban terjadi terus menerus; sistem harus dapat menyesuaikan dengan kondisi yang berubah dan beroperasi dengan memuaskan. Sistem juga harus mampu bertahan dari berbagai gangguan yang parah, seperti korsleting pada saluran transmisi atau lepasnya generator besar. Gangguan besar dapat menyebabkan perubahan struktural karena isolasi elemen yang rusak [4].

## **2.9.Kestabilan Frekuensi**

Kestabilan frekuensi mengacu pada kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan frekuensi ke kondisi yang dianggap stabil setelah terjadi gangguan pada sistem yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkit dan beban. Hal ini tergantung pada kemampuan sistem untuk mempertahankan atau mengembalikan keseimbangan antara pembangkitan dan beban. Ketidakstabilan yang mungkin terjadi mengakibatkan terbentuknya ayunan frekuensi yang dapat menyebabkan lepasnya pembangkit dan atau beban [4].

Gangguan sistem yang parah umumnya menyebabkan gangguan besar pada frekuensi, aliran daya, tegangan, dan variabel sistem lainnya, sehingga memicu proses tindakan, kontrol, dan proteksi yang tidak dimodelkan dalam studi kestabilan

transien konvensional atau kestabilan tegangan. Proses-proses ini mungkin sangat lambat, seperti dinamika boiler, hanya dipicu untuk kondisi sistem yang ekstrem. Dalam sistem tenaga besar yang saling berhubungan, jenis situasi ini paling sering dikaitkan dengan kondisi setelah pemisahan sistem menjadi beberapa daerah. Masing-masing daerah yang beroperasi akan mencapai kondisi keseimbangan dengan kehilangan beban minimal yang tidak disengaja ditentukan oleh respon keseluruhan daerah yang dibuktikan dengan frekuensi rata-rata, bukan Gerakan relative mesin. Secara umum, masalah kestabilan frekuensi dikaitkan dengan kurang responnya peralatan, koordinasi kontrol dan peralatan proteksi yang buruk, atau cadangan pembangkit yang tidak mencukupi [4].

Selama gangguan frekuensi, karakteristik waktu proses dan perangkat yang diaktifkan akan berkisar dari sepersekian detik, sesuai dengan respons perangkat seperti pelepasan beban dan kontrol generator dan frekuensi generator yang kurang, hingga beberapa menit, sesuai dengan respons perangkat seperti sebagai sistem pasokan energi penggerak utama dan regulator tegangan beban. Oleh karena itu, kestabilan frekuensi dapat menjadi fenomena jangka pendek atau fenomena jangka panjang. Contoh dari ketidakstabilan frekuensi jangka pendek adalah pembentukan daerah yang mengalami pembenahan dengan pelepasan beban kurang frekuensi yang kurang sehingga frekuensi meluruh dengan cepat menyebabkan pemadaman daerah dalam beberapa detik. Di sisi lain, situasi yang lebih kompleks di mana ketidakstabilan frekuensi disebabkan oleh kontrol kecepatan berlebih turbin uap atau proteksi dan kontrol boiler / reaktor adalah fenomena jangka panjang dengan jangka waktu mulai dari puluhan detik hingga beberapa menit. [4]

Selama ketidakstabilan frekuensi, besaran tegangan dapat berubah secara signifikan, terutama untuk kondisi kelompok dengan pelepasan beban yang kurang frekuensi yang menurunkan sistem. Perubahan besaran tegangan, yang mungkin lebih tinggi dalam persentase daripada perubahan frekuensi, mempengaruhi ketidakseimbangan penyuplai beban [4].

Kestabilan frekuensi berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan frekuensi agar tetap dalam rentang nominal setelah gangguan sistem yang parah yang mengakibatkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkit dan beban. Itu tergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara sistem pembangkitan dan beban, dengan kehilangan beban minimum [5].

Selama ketidakstabilan frekuensi, waktu karakteristik proses dan perbaikan yang diaktifkan oleh pergeseran besar frekuensi dan variabel sistem lainnya akan berkisar dari hitungan detik, sesuai dengan respons perangkat seperti kontrol dan proteksi generator [5].

Frekuensi nominal di jaringan yaitu 50,00 (lima puluh koma nol nol) Hz. Frekuensi sistem dapat naik sampai dengan 52,00 (lima puluh dua koma nol nol) Hz dan turun sampai dengan 47,00 (empat puluh tujuh koma nol nol) Hz pada keadaan luar biasa. Desain unit pembangkit dan peralatan harus dapat beroperasi sesuai batas rentang frekuensi operasi berikut ini. [6]

**Tabel 1. 1** Batas Rentang Frekuensi Operasi [6]

<b>Rentang Frekuensi</b>	<b>Rentang Waktu Operasi</b>
$51,50 \text{ Hz} < f \leq 52,00 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 15 menit
$51,00 \text{ Hz} < f \leq 51,50 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
$49,00 \text{ Hz} \leq f \leq 51,00 \text{ Hz}$	Beroperasi secara terus-menerus
$47,50 \text{ Hz} < f < 49,00 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
$47,00 \text{ Hz} < f \leq 47,50 \text{ Hz}$	Beroperasi paling singkat 6 detik

Penanganan ketika terjadi keadaan dimana frekuensi lebih kecil dari 50 Hz dapat dilakukan dengan cara [7]:

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