

**ANALISIS KINERJA SISTEM ZERO DOWN TIME (ZDT) DENGAN  
REKONFIGURASI JARINGAN SECARA REAL TIME  
KASUS: SISTEM PASOKAN DAYA PT PACRIM**

**(TESIS)**

**Oleh:**

**ALI AHMAD**

**(2225031011)**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG**

**2026**

**ANALISIS KINERJA SISTEM ZERO DOWN TIME (ZDT) DENGAN  
REKONFIGURASI JARINGAN SECARA REAL TIME  
KASUS: SISTEM PASOKAN DAYA PT PACRIM**

Oleh  
**ALI AHMAD**

**TESIS**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
MAGISTER TEKNIK ELEKTRO**

**Pada**

**Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG**

**2026**

## ABSTRAK

### ANALISIS KINERJA SISTEM ZERO DOWN TIME (ZDT) DENGAN REKONFIGURASI JARINGAN SECARA REAL TIME KASUS: SISTEM PASOKAN DAYA PT PACRIM

Oleh

ALI AHMAD

Keandalan dan kontinuitas pasokan tenaga listrik sangatlah penting bagi para pelaku industri, dimana energi listrik dari PLN menjadi senjata utama dalam proses produksi. Pada beberapa kasus produksi dari sebuah perusahaan sangat membutuhkan keandalan dan kestabilan tegangan listrik yang dikirimkan karena sangat mempengaruhi proses produksi dan kualitas produk yang dihasilkan, untuk memenuhi point keandalan dan kestabilan ini dirancanglah sistem pasokan *Zero Down Time (ZDT)* dimana sistem pasokan ZDT ini memiliki backup berlapis untuk mengantisipasi kegagalan dari setiap skema pasokan yang disiapkan sehingga kecil kemungkinan pelanggan mengalami pemadaman dalam waktu yang lama.

ZDT ini merupakan implementasi dari konfigurasi *spindel* digabungkan dengan konfigurasi *spot load* dengan total 4 *feeder* 20 kV dari 2 Gardu Induk 150/20 kV dan 3 Trafo Tenaga 150/20 kV berbeda sehingga keandalan pasokan terjaga di sisi pelanggan. Pada skema utama pelanggan tidak akan merasakan padam sama sekali sementara pada skema *backup* utama dan *backup* kedua pelanggan hanya merasakan kedip tegangan pada saat perpindahan sumber pasokan terjadi.

Kata Kunci: *Zero Downtime (ZDT)*, keandalan, sistem distribusi tenaga listrik, konfigurasi jaringan, pasokan listrik industri.

**ABSTRACT****PERFORMANCE ANALYSIS OF A ZERO DOWNTIME (ZDT) SYSTEM  
USING REAL-TIME NETWORK RECONFIGURATION  
CASE STUDY: PT PACRIM POWER SUPPLY SYSTEM****By****ALI AHMAD**

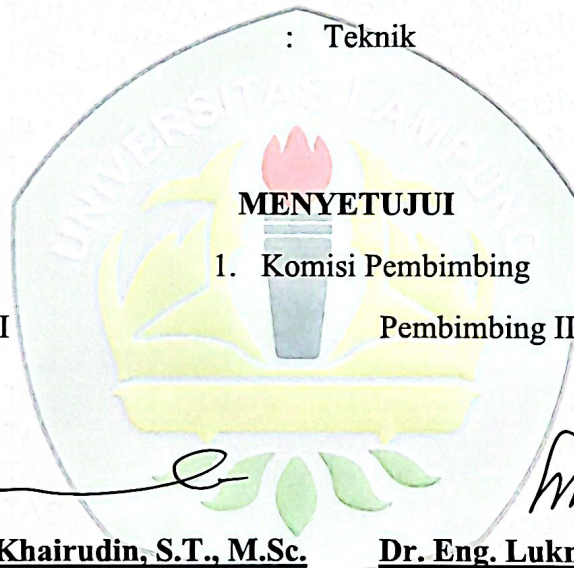
*Reliability and continuity of electric power supply are critical requirements for industrial customers, as electrical energy supplied by PLN constitutes the primary source of energy for production processes. In many industrial applications, a high level of supply reliability and voltage stability is required, since disturbances in the power supply can significantly affect production continuity and product quality. To satisfy these requirements, a Zero-Downtime (ZDT) power supply system is implemented. The ZDT system is designed with multiple layers of redundancy to mitigate potential failures in each supply scheme, thereby minimizing the probability of sustained power interruptions at the customer side.*

*The proposed ZDT system represents an implementation of a spindle configuration combined with a spot-load configuration. It is supplied by four 20 kV feeders originating from two 150/20 kV substations and three independent 150/20 kV power transformers. This configuration ensures a high level of supply reliability at the point of common coupling. Under normal operating conditions, customers experience uninterrupted power supply. In the event of transfer to the primary or secondary backup schemes, only a momentary voltage dip is observed during the source transition, without leading to a sustained outage.*

*Keywords: Zero Downtime (ZDT), reliability, power distribution system, network configuration, industrial power supply*

Judul Tesis : **ANALISIS KINERJA SISTEM ZERO  
DOWN TIME (ZDT) DENGAN  
REKONFIGURASI JARINGAN  
SECARA REAL TIME  
KASUS: SISTEM PASOKAN DAYA  
PT PACRIM**

Nama Mahasiswa : *Ali Ahmad*  
Nomor Pokok Mahasiswa : 2225031011  
Program Studi : Magister Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik



Pembimbing I

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing II

**Dr. Eng. Ir. Khairudin, S.T., M.Sc.**  
NIP. 197007192000121001

**Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.**  
NIP. 197209232000121002

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro

**Prof. Dr. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.**  
NIP. 19651021 199512 2 001

MENGESAHKAN

1. Komisi Penguji I

Ketua Komisi Penguji

(Pembimbing I) : Dr. Eng. Ir. Khairudin, S.T., M.Sc.

*Khairudin*  
.....

Sekretaris Komisi Penguji

(Pembimbing II) : Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.

*Lukmanul Hakim*  
.....

Anggota Komisi Penguji

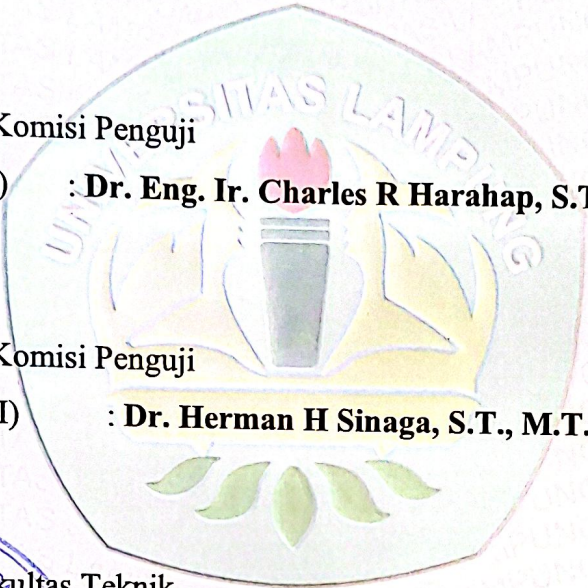
(Penguji I) : Dr. Eng. Ir. Charles R Harahap, S.T., M.T.

*Charles R Harahap*  
.....

Anggota Komisi Penguji

(Penguji II) : Dr. Herman H Sinaga, S.T., M.T.

*Herman H Sinaga*  
.....



1. Dekan Fakultas Teknik

~~*ms* *Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.*  
NIP 19691030 200003 1001~~

2. Direktur Program Pascasarjana

*ms*  
Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.  
NIP 19640326 198902 1 001

Tanggal Lulus Ujian Tesis: 2 Juni 2026

## SURAT PERNYATAAN

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis yang saya susun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik dan Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro seluruhnya merupakan hasil karya sendiri.

Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan Tesis yang saya kutip dari hasil karya hasil orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan ilmiah.

Tesis dengan judul “Analisis Kinerja Sistem *Zero Down Time* (ZDT) Dengan Rekonfigurasi Jaringan Secara Real Time Kasus: Sistem Pasokan Daya PT Pacrim” dapat diselesaikan berkat bimbingan dan motivasi dari pembimbing saya, yaitu:

1. Dr. Eng. Ir. Khairudin, S.T., M.Sc.
2. Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.

Saya ucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada semua pihak, khususnya kedua dosen pembimbing dan Bapak/Ibu Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung yang banyak memberikan ilmu pengetahuan, bimbingan dan motivasi.

Apabila dikemudian hari ditemukan seluruh atau Sebagian tesis ini bukan hasil karya sendiri atau adanya plagiat dalam bagian bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya sandang dan sanksi-sanksi lainnya yang sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Bandar Lampung, 02 Juni 2026



**ALI AHMAD**  
2225031011

## RIWAYAT HIDUP



**Ali Ahmad**, lahir di Bandung, 30 Januari 1989. Penulis menyelesaikan pendidikan di Sekolah Dasar di SD Negeri Cibogo VI di Kecamatan Lembang Kabupaten Bandung Barat pada tahun 2002. Melanjutkan Pendidikan di SMP Swasta Mutiara 5 Kecamatan Lembang dan tamat pada tahun 2005 kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Lembang selesai pada tahun 2008. Pada tahun 2008 penulis melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi negeri, tepatnya di Politeknik Negeri Bandung (POLBAN) Jurusan Teknik Elektro pada Program Studi Teknik Listrik. Penulis menyelesaikan kuliah Diploma III (D3) pada tahun 2011. Pada tahun 2013 penulis melanjutkan Pendidikan Strata Satu (S1) di Universitas Muhammadiyah Lampung (UML) pada Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro dan lulus pada tahun 2017.

Pada tahun 2022 penulis melanjutkan pendidikan Strata Dua (S2) di Universitas Lampung (UNILA) pada Fakultas Teknik, Program Pascasarjana, Program Studi Magister Teknik Elektro.

Akhir kata penulis mengucapkan rasa syukur yang sebesar besarnya atas terselesaikannya skripsi dengan judul “Analisis Kinerja Sistem *Zero Down Time* (ZDT) Dengan Rekonfigurasi Jaringan Secara Real Time Kasus: Sistem Pasokan Daya PT Pacrim” semoga penelitian ini bisa memberikan manfaat yang baik.

Bandar Lampung, Juni 2026

Penulis

## **PERSEMBAHAN**

Puji dan syukur kepada Allah SWT atas karunia dan kasih sayang-Nya yang telah memberikan kekuatan dan membekaliku dengan ilmu.

Atas izin dan kemudahan yang Engkau berikan akhirnya tesis yang sederhana ini dapat terselesaikan. Sholawat dan salam selalu terlimpahkan keharibaan Rasullullah Muhammad SAW.

Kupersembahkan karya sederhana ini untuk:

### **Ibunda dan Ayahanda Tercinta**

Yang telah memberikan kasih sayang, segala dukungan dan cinta kasih yang tiada terhingga dan tak mungkin bisa dibalas walaupun dilakukan seumur hidupku.

### **Istriku Tercinta Hani Chan (Ibus Akiras)**

Yang dengan penuh kasih sayang memberikan semangat, dukungan dan motivasi terbaik.

### **Anakku kebanggaanku Akira A.A**

## **ALMAMATERKU UNIVERSITAS LAMPUNG**

Serta untuk semua yang tidak bisa disebutka satu persatu yang telah memberikan bantuan dalam penyelesaian Tesis ini.

**“TERIMA KASIH ANDA SEMUA LUAR BIASA”**

**MOTTO**

*“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Maka apabila engkau telah selesai (dari sesuatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain). Dan hanya kepada Tuhanmulah engkau berharap.”*

**-(QS. Al-Insyirah, 6-8)-**

*"Apabila Anda berbuat kebaikan kepada orang lain, maka Anda telah berbuat baik terhadap diri sendiri."*

**-(Benyamin Franklin)-**

*“Learn from yesterday, Live for today, And hope for tomorrow”*

**-(Albert Einstein)-**

*“Kishi Kaisei Just One Life”*

**-(SPYAIR)-**

## SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas segala rahmat dan karunia Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini. Penelitian ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Strata II Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Penyusun membuat penelitian dengan judul “Analisis Kinerja Sistem *Zero Down Time* (ZDT) Dengan Rekonfigurasi Jaringan Secara Real Time Kasus: Sistem Pasokan Daya PT Pacrim”. Penelitian ini secara garis besar membahas tentang bagaimana respon dari tegangan sesaat ketika pola operasi dieksekusi sesuai dengan kondisi yang direncanakan. Tujuannya yaitu sebagai bahan pertimbangan untuk perbaikan sistem pasokan ZDT kedepannya.

Tugas akhir Tesis ini dapat diselesaikan atas Batuan, Bimbingan dan Petunjuk dari semua pihak, mulai dari awal perkuliahan dan bimbingan sampai dengan penyusunan laporan. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung;
2. Dr. Hi. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung;
3. Prof. Dr. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung;
4. Dr. Eng. Ir. Khairudin, S.T., M.Sc. selaku pembimbing utama dan Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan, saran, dan arahan dalam tahapan penyelesaian penelitian yang penulis susun.
5. Dr. Eng. Ir. Charles R Harahap, S.T., M.T. selaku penguji utama dan Dr. Herman H Sinaga, S.T., M.T. selaku penguji pendamping. Terima kasih atas saran dan masukan untuk perbaikan tugas akhir Tesis yang penulis susun.

6. Dr. Eng. Diah Permata, S.T.,M.T. selaku pembimbing akademik, terima kasih atas bimbingan dan arahan pada masa perkuliahan.
7. Bapak dan Ibu dosen pengajar pada Program Studi Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membekali penulis dengan ilmu, bimbingan, arahan, dan motivasi selama mengikuti perkuliahan.
8. Ibunda Tercinta Ny. Ebod, Istri tercinta Hani Chan dan Anakku kebanggaanku Akira AA yang selalu memberikan dukungan dan semangat beserta do'a kepada penulis.
9. Rekan-rekan seperjuangan Mahasiswa MTE Angkatan 2022 terima kasih atas kebersamaan dalam susah senang selama menjalani masa perkuliahan di Universitas Lampung.
10. Serta untuk seluruh pihak yang belum bisa disebutkan.

Penulis berharap dengan diselesaikannya tesis ini, hasilnya dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi setiap orang pada umumnya. Penulis sadar bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan. Akhir kata semoga laporan ini bermanfaat.

Bandar Lampung, Juni 2026

Penulis

Ali Ahmad'

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>Abstrak</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ii</b>
<b>Lembar Persetujuan</b> .....	<b>iii</b>
<b>Lembar Pengesahan</b> .....	<b>iv</b>
<b>Surat Pernyataan</b> .....	<b>v</b>
<b>Riwayat Hidup</b> .....	<b>vi</b>
<b>Lembar Persembahan</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lembar Moto</b> .....	<b>viii</b>
<b>Lembar Sanwacana</b> .....	<b>ix</b>
<b>Daftar Isi</b> .....	<b>xi</b>
<b>Daftar Gambar</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Daftar Tabel</b> .....	<b>xv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Pembatasan Masalah .....	4
1.5 Metodologi Penelitian .....	5
1.6 Hipotesis.....	6
1.7 Sistematika Penulisan.....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>7</b>
2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik.....	7
2.2 Konfigurasi Jaringan Tegangan Menengah .....	8

2.3 Konsep <i>Zero Down Time</i> (ZDT).....	12
2.4 Analisa Aliran Daya ( <i>Load Flow</i> ).....	14
2.5 Kestabilan Sistem Tenaga ( <i>Transient Stability</i> ).....	15
2.6 Kualitas Tegangan dan Gangguan Tegangan.....	16
2.7 Tingkat Mutu Pelayanan (TMP) PLN.....	19
2.8 Aplikasi ETAP dalam Analisa Sistem Tenaga .....	20
2.9 Penelitian Terdahulu .....	22
2.10 Kabel Tanah NA2XSEYBY .....	23
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>26</b>
3.1 Metode Penelitian.....	26
3.2 Lokasi dan Objek Penelitian .....	26
3.3 Data Penelitian .....	27
3.4 Pemodelan Sistem .....	29
3.5 Skenario Simulasi.....	31
3.6 Metode Analisa .....	32
3.7 Parameter Evaluasi.....	33
3.8 Batasan Analisa.....	34
3.9 Diagram Alir Penelitian .....	34
3.10 Waktu dan Tempat Penelitian .....	35
<b>BAB IV PEMBAHASAN DAN HASIL.....</b>	<b>36</b>
4.1 Analisa <i>Load Flow</i> .....	36
4.2 Analisa <i>Transient Stability</i> .....	41
4.3 Evaluasi Hasil Penelitian.....	51
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>54</b>
5.1 Kesimpulan .....	54
5.2 Saran.....	55
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>56</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>58</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik.....	7
Gambar 2.2 Konfigurasi Jaringan Radial.....	8
Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan Loop.....	9
Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan <i>Spindel</i> .....	10
Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan <i>SpotLoad</i> .....	10
Gambar 2.6 Skema konfigurasi jaringan <i>IEEE case 33-Bus System</i> .....	11
Gambar 2.7 Definisi <i>Voltage Magnitude Event</i> berdasarkan Standar IEEE 1159-195.....	17
Gambar 2.8 <i>Voltage Sag</i> .....	18
Gambar 2.9 Durasi <i>Sag Voltage</i> Peralatan SEMI F47-0706.....	18
Gambar 2.10 <i>Voltage Swell</i> .....	19
Gambar 2.11 ETAP versi 19 .....	20
Gambar 2.12 kabel NA2XSEYBY .....	24
Gambar 3.1 Peta Geografis Sistem ZDT Pacrim .....	28
Gambar 3.2 Konfigurasi Sistem ZDT PT Pacrim .....	30
Gambar 3.3 Pemodelan Sistem ZDT PT Pacrim .....	31
Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian .....	35
Gambar 4.1 Single Line Diagram Sistem ZDT PT Pacrim.....	36
Gambar 4.2 <i>Load Flow</i> Konfigurasi Normal .....	37
Gambar 4.3 <i>Load Flow</i> Konfigurasi ZDT.....	38
Gambar 4.4 <i>Load Flow</i> Konfigurasi Backup 1 .....	39
Gambar 4.5 <i>Load Flow</i> Konfigurasi Backup 2 .....	40
Gambar 4.6 Tegangan Transient Konfigurasi ZDT Gangguan L-G .....	42
Gambar 4.7 Tegangan Transient Konfigurasi <i>Backup1</i> L-G .....	43

Gambar 4.8 Kondisi Tegangan Transient Konfigurasi <i>Backup2</i> Gangguan Fasa – Tanah.....	43
Gambar 4.9 Kondisi Tegangan Transient Konfigurasi ZDT Gangguan Fasa – Fasa .....	44
Gambar 4.10 Kondisi Tegangan Transient Konfigurasi Backup1 Gangguan Fasa – Fasa .....	45
Gambar 4.11 Kondisi Tegangan Transient Konfigurasi Backup2 Gangguan Fasa – Fasa .....	45
Gambar 4.12 Kondisi Tegangan Transient Konfigurasi ZDT Gangguan Dua Fasa – Tanah.....	46
Gambar 4.13 Kondisi Tegangan Transient Konfigurasi Backup1 Gangguan Dua Fasa – Tanah .....	47
Gambar 4.14 Kondisi Tegangan Transient Konfigurasi Backup2 Gangguan Dua Fasa – Tanah .....	47
Gambar 4.15 Kondisi Tegangan Transient Konfigurasi ZDT Gangguan Tiga Fasa .....	48
Gambar 4.16 Kondisi Tegangan Transient Konfigurasi Backup1 Gangguan Tiga Fasa .....	49
Gambar 4.17 Kondisi Tegangan Transient Konfigurasi Backup2 Gangguan Tiga Fasa .....	49

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Nilai KHA kabel NA2XSEYBY .....	24
Tabel 3.1 Data Gardu Induk.....	28
Tabel 3.2 Data Trafo Tenaga 150/20 kV .....	28
Tabel 3.3 Data Penyulang 20 kV Pasokan ZDT .....	28
Tabel 3.4 Data Parameter Evaluasi .....	33
Table 3.5 Time Line Penelitian.....	35
Tabel 4.1 Nilai KHA kabel NA2XSEYBY dan Kabel AAAC .....	37
Tabel 4.2 Beban Per Konfigurasi .....	41
Tabel 4.3 Susut Teknis Jaringan Per Konfigurasi .....	41
Tabel 4.4 Tegangan Per Konfigurasi .....	41
Tabel 4.4 Hasil Simulasi pada Sistem ZDT dilaksanakan .....	50
Tabel 4.5 Hasil Simulasi pada Sistem Konfigurasi Backup 1 dilaksanakan....	50
Tabel 4.6 Hasil Simulasi pada Sistem Konfigurasi Backup 2 dilaksanakan....	51
Tabel 4.7 Parameter Tegangan Hasil Simulasi .....	51
Tabel 4.8 Parameter Pembebanan Penghantar .....	52
Tabel 4.9 Parameter Susut Jaringan .....	52
Tabel 4.10 Parameter Tegangan Transient konfigurasi ZDT.....	52
Tabel 4.11 Parameter Tegangan Transient Konfigurasi Backup 1 .....	53
Tabel 4.12 Parameter Tegangan Transient Konfigurasi Backup 2 .....	53

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Keandalan dan kestabilan pasokan tenaga listrik merupakan faktor fundamental dalam menjamin keberlangsungan proses produksi pada sektor industri modern. Energi listrik tidak hanya berperan sebagai sumber daya pendukung, tetapi menjadi komponen utama dalam sistem produksi yang bersifat kontinu dan terintegrasi. Pada industri seperti pengolahan minyak nabati, peleburan baja, tekstil, maupun manufaktur berbasis proses berkelanjutan, terhentinya pasokan listrik meskipun dalam durasi singkat dapat mengakibatkan gangguan proses, kerusakan material, penurunan kualitas produk, hingga kerugian ekonomi yang signifikan. Selain aspek kontinuitas, kestabilan tegangan juga menjadi parameter krusial karena fluktuasi tegangan dapat memengaruhi performa peralatan sensitif serta mengganggu stabilitas proses produksi.

Sistem distribusi tenaga listrik konvensional umumnya dirancang menggunakan konfigurasi *radial*, yaitu hanya memiliki satu jalur utama penyaluran daya dari sumber menuju pelanggan. Konfigurasi ini banyak digunakan karena memiliki struktur yang sederhana, biaya investasi yang relatif rendah, serta kemudahan dalam pengoperasian dan pemeliharaan. Namun demikian, sistem radial memiliki kelemahan mendasar dari sisi keandalan, yaitu ketergantungan terhadap satu sumber dan satu jalur penyaluran. Apabila terjadi gangguan pada penyulang, transformator, maupun sumber pasokan, maka seluruh beban yang berada pada jalur tersebut berpotensi mengalami pemadaman hingga proses perbaikan atau manuver jaringan selesai dilakukan, dimana kisaran waktu manuver beban ke sumber lainnya apabila menggunakan sistem semi otomatis yaitu dengan menggunakan peralatan LBS *Motorized* yang dikendalikan oleh SCADA maka estimasi waktu manuver adalah antara 30 detik sampai dengan 5 menit dan akan lebih lama lagi apabila proses manuver dilakukan dengan cara manual yaitu dengan pengoperasian LBS manual oleh petugas di lapangan waktu manuver bisa terjadi antara 15 menit

sampai dengan 30 menit bahkan lebih tergantung dengan jarak dan kondisi di lapangan . Kondisi ini masih dapat ditoleransi pada pelanggan umum, namun menjadi permasalahan serius bagi pelanggan industri yang membutuhkan kontinuitas pasokan listrik yang tinggi.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, diperlukan sistem distribusi dengan tingkat keandalan yang lebih tinggi melalui penerapan redundansi sumber dan jalur penyaluran. Salah satu solusi yang dikembangkan oleh PT PLN (Persero) adalah sistem *Zero Down Time* (ZDT), yaitu sistem penyaluran tenaga listrik yang dirancang untuk meminimalkan bahkan menghilangkan interupsi pasokan pada sisi pelanggan. Sistem ini memanfaatkan lebih dari satu sumber pasokan, beberapa penyulang cadangan, serta mekanisme pengalihan suplai secara cepat melalui modifikasi konfigurasi jaringan sehingga kontinuitas pelayanan tetap dapat dipertahankan ketika terjadi gangguan maupun pemeliharaan sistem. Dengan diterapkannya sistem ZDT estimasi waktu manuver jaringan terjadi pada waktu 0,2 detik sampai dengan 1 menit.

Sebagai salah satu implementasi, direncanakan sistem ZDT untuk melayani kebutuhan daya sebesar 5.540 kVA pada pelanggan industri PT Pacrim Nusantara Lestari Foods, yang merupakan bagian dari grup multinasional Cargill. Konfigurasi sistem dirancang menggunakan empat penyulang khusus yang bersumber dari dua gardu induk berbeda dengan tiga transformator tenaga terpisah. Secara konseptual, konfigurasi ini memenuhi prinsip redundansi dan pembebanan N+1 sehingga diharapkan mampu menjaga kontinuitas suplai mendekati kondisi *zero interruption*.

Meskipun secara konseptual sistem dengan multi-sumber dan multi-penyulang meningkatkan tingkat keandalan, kompleksitas konfigurasi tersebut berpotensi menimbulkan dinamika sistem yang lebih kompleks dibandingkan sistem radial konvensional. Pada kondisi *steady-state*, proses modifikasi konfigurasi jaringan akibat gangguan dapat menyebabkan perubahan pola aliran daya, peningkatan pembebanan penghantar, perubahan profil tegangan pada bus tertentu, serta kenaikan rugi-rugi daya sistem. Evaluasi terhadap parameter-parameter tersebut

diperlukan untuk memastikan bahwa sistem tetap berada dalam batas mutu tegangan dan kemampuan termal peralatan pada seluruh skenario operasi.

Selain analisis kondisi *steady-state*, penerapan sistem ZDT yang melibatkan pengalihan beban secara real time juga berpotensi memengaruhi respons dinamis sistem tenaga. Gangguan pada salah satu sumber atau penyulang yang diikuti dengan proses switching dapat menimbulkan fluktuasi tegangan dan frekuensi sesaat, serta memengaruhi kestabilan sudut rotor pada sumber pembangkit yang terhubung ke sistem. Oleh karena itu, diperlukan analisis kestabilan transien untuk memastikan bahwa sistem tetap stabil setelah terjadi gangguan dan modifikasi konfigurasi jaringan.

Berdasarkan kajian tersebut, meskipun sistem ZDT secara konseptual dirancang untuk meningkatkan keandalan dan kontinuitas suplai, belum terdapat kajian komprehensif yang mengevaluasi kinerja sistem secara kuantitatif dari sisi kondisi *steady-state* maupun kestabilan transien pada skenario modifikasi konfigurasi jaringan secara real time. Evaluasi berbasis simulasi teknis diperlukan untuk menganalisis profil tegangan, pembebanan penyulang, rugi daya sistem, serta respons dinamis sistem terhadap gangguan dan proses pengalihan beban.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kinerja sistem *Zero Down Time* melalui pendekatan simulasi aliran daya (*load flow*) dan kestabilan transien (*transient stability*) pada berbagai skenario operasi, sehingga dapat diperoleh gambaran menyeluruh mengenai efektivitas konfigurasi jaringan dalam mempertahankan kontinuitas pasokan dan kestabilan sistem tenaga listrik.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana profil tegangan dan aliran daya sistem pada konfigurasi *Zero Down Time* (ZDT) dalam kondisi operasi normal dan saat terjadi gangguan?
2. Apakah sistem telah memenuhi batas mutu tegangan dan batas kemampuan termal penghantar pada setiap skenario operasi?

3. Bagaimana respons dan kestabilan sistem tenaga listrik terhadap gangguan dan proses rekonfigurasi jaringan pada konfigurasi ZDT?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis profil tegangan dan aliran daya sistem pada konfigurasi *Zero Down Time* (ZDT) dalam kondisi operasi normal dan saat terjadi gangguan menggunakan metode *load flow*.
2. Mengevaluasi kesesuaian kondisi operasi sistem terhadap batas mutu tegangan dan batas kemampuan termal penghantar pada setiap skenario operasi
3. Menganalisis respons dan kestabilan sistem tenaga listrik terhadap gangguan dan proses rekonfigurasi jaringan menggunakan metode *transient stability*.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi kinerja sistem *Zero Down Time* (ZDT) berdasarkan parameter *steady-state* dan dinamis melalui pendekatan simulasi *load flow* dan *transient stability* pada berbagai skenario operasi.

### 1.4 Pembatasan Masalah

Agar penelitian ini terarah dan tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem yang dianalisis merupakan sistem distribusi tenaga listrik tegangan menengah pada konfigurasi *Zero Down Time* (ZDT) yang melayani pelanggan industri tertentu.
2. Analisis yang dilakukan meliputi kondisi *steady-state* menggunakan metode *load flow* dan kondisi dinamis menggunakan metode *transient stability*.

3. Studi dilakukan berdasarkan model sistem yang disimulasikan menggunakan perangkat lunak ETAP sesuai dengan data teknis yang tersedia.
4. Parameter yang dianalisis meliputi profil tegangan, aliran daya, pembebanan penghantar, rugi daya, serta respons dan kestabilan sistem terhadap gangguan.
5. Batas mutu tegangan yang digunakan mengacu pada standar yang berlaku pada sistem distribusi tenaga listrik.
6. Evaluasi kemampuan termal penghantar didasarkan pada nilai Kuat Hantar Arus (KHA) dengan batas pembebanan aman sebesar 80% dari kapasitas maksimum.
7. Skenario analisis dibatasi pada kondisi operasi normal, kondisi gangguan pada salah satu sumber atau penyulang, serta proses modifikasi konfigurasi jaringan secara real time.
8. Analisis tidak mencakup perhitungan ekonomi, proteksi sistem secara detail, maupun aspek keandalan berbasis indeks seperti SAIDI dan SAIFI.

### **1.5 Metodologi Penelitian**

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode berbasis model (*model-based analysis*), di mana sistem tenaga listrik dimodelkan ke dalam perangkat lunak ETAP sesuai dengan data teknis yang tersedia. Model sistem tersebut kemudian digunakan untuk melakukan simulasi pada berbagai skenario operasi, meliputi kondisi normal, kondisi gangguan, serta proses modifikasi konfigurasi jaringan secara real time. Analisis dilakukan menggunakan metode load flow untuk mengevaluasi parameter *steady-state* seperti profil tegangan, aliran daya, pembebanan penghantar, dan rugi daya, serta metode *transient stability* untuk menganalisis respons dan kestabilan sistem terhadap gangguan.

## 1.6 Hipotesis

Konfigurasi sistem Zero Down Time (ZDT) dengan modifikasi jaringan secara real time mampu menjaga profil tegangan sistem, di mana gangguan tegangan berupa *voltage sag* dan *voltage swell* tetap berada dalam batas mutu tegangan yang diizinkan pada setiap skenario operasi.

## 1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada penelitian ini terdiri dari beberapa Bab sebagai berikut:

### **Bab I Pendahuluan**

Pada Bab ini berisikan tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian dan manfaat penelitian.

### **Bab II Tinjauan Pustaka**

Pada Bab II ini berisikan tinjauan teori dan konsep yang relevan serta hasil penelitian sebelumnya yang terkait dengan penelitian saat ini.

### **Bab III Metode Penelitian**

Pada Bab III ini membahas tentang seperti apa desain penelitian yang akan dilaksanakan, bagaimana pengumpulan data dilakukan serta seperti apa metode Analisa data yang dilakukan pada penelitian ini.

### **BAB IV Hasil Penelitian dan Pembahasan**

Pada Bab IV membahas tentang hasil dari penelitian yang sudah dilakukan serta berisikan mengenai pembahasan hasil dari penelitian yang sudah dilakukan.

### **Bab VI Kesimpulan dan Saran**

Bab ini berisikan mengenai Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian serta saran untuk penelitian selanjutnya.

### **Daftar Pustaka**

Berisikan daftar referensi yang dipakai dalam penelitian.

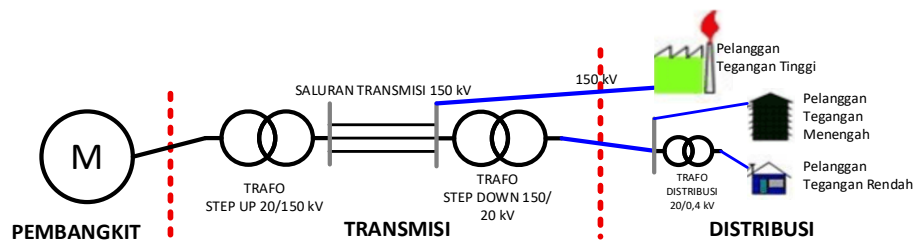
### **Lampiran**

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik Adalah sebuah sistem yang memiliki beberapa sistem lain diantaranya sistem pembangkitan, sistem transmisi, sistem distribusi dan beban yang saling terhubung untuk menyuplai energi listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Sistem ini merupakan tahap akhir dalam proses penyaluran energi listrik setelah pembangkitan dan transmisi, yang mencakup jaringan tegangan menengah, transformator distribusi, serta jaringan tegangan rendah. Dengan kata lain sistem distribusi merupakan tahap akhir dalam sistem tenaga listrik yang menghubungkan sistem transmisi dengan pelanggan, baik pelanggan industri, komersial, maupun rumah tangga.



Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Di Indonesia, tegangan distribusi primer yang umum digunakan adalah 20 kV karena memiliki keseimbangan antara efisiensi penyaluran daya dan biaya investasi jaringan. Sistem ini memiliki karakteristik berupa jangkauan penyaluran yang relatif luas, tingkat rugi daya yang lebih rendah dibandingkan tegangan rendah, serta kemampuan untuk melayani beban dalam kapasitas menengah hingga besar.

## 2.2 Konfigurasi Jaringan Tegangan Menengah

### 2.2.1 Pengertian Konfigurasi Jaringan Distribusi

Konfigurasi jaringan distribusi merupakan susunan atau bentuk topologi jaringan tenaga listrik yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik dari sumber (gardu induk) ke konsumen melalui penyulang distribusi. Konfigurasi ini menentukan bagaimana komponen sistem seperti penghantar, transformator, dan peralatan *switching* dihubungkan serta bagaimana aliran daya didistribusikan dalam sistem.

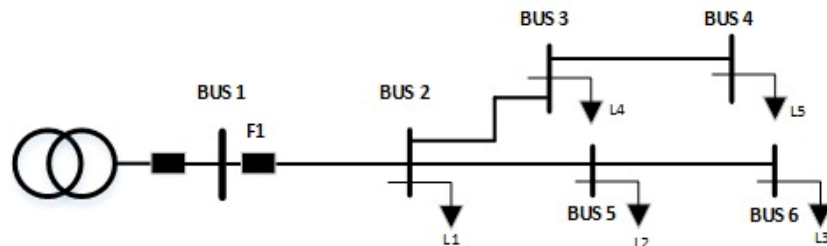
Pemilihan konfigurasi jaringan distribusi sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem, terutama dalam hal keandalan, fleksibilitas operasi, kemudahan pemeliharaan, serta kualitas tegangan yang diterima oleh pelanggan. Setiap jenis konfigurasi memiliki karakteristik yang berbeda, baik dari segi biaya investasi maupun tingkat kontinuitas suplai yang dapat diberikan.

### 2.2.2 Jenis-Jenis Konfigurasi Jaringan Distribusi

Secara umum, konfigurasi jaringan distribusi dibagi menjadi beberapa jenis utama, yaitu jaringan *radial*, *loop* (ring), dan *network* (interkoneksi), yang masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik.

#### a. Konfigurasi Jaringan *Radial*

Jaringan distribusi *radial* adalah jenis sistem distribusi tenaga listrik yang paling sederhana, di mana energi listrik disalurkan dari satu sumber (gardu induk) ke beban melalui satu jalur yang bercabang-cabang secara *radial* (memancar seperti jari-jari roda).

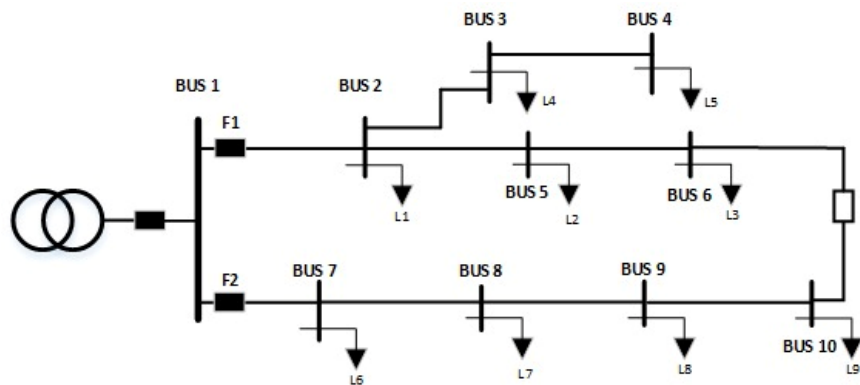


Gambar 2.2 Konfigurasi Jaringan *Radial*

Dalam jaringan ini, daya mengalir dari satu sumber utama (misalnya gardu induk) menuju ke berbagai pelanggan melalui jalur distribusi yang bercabang seperti pohon, tanpa adanya jalur alternatif.

b. Konfigurasi Jaringan *Loop*

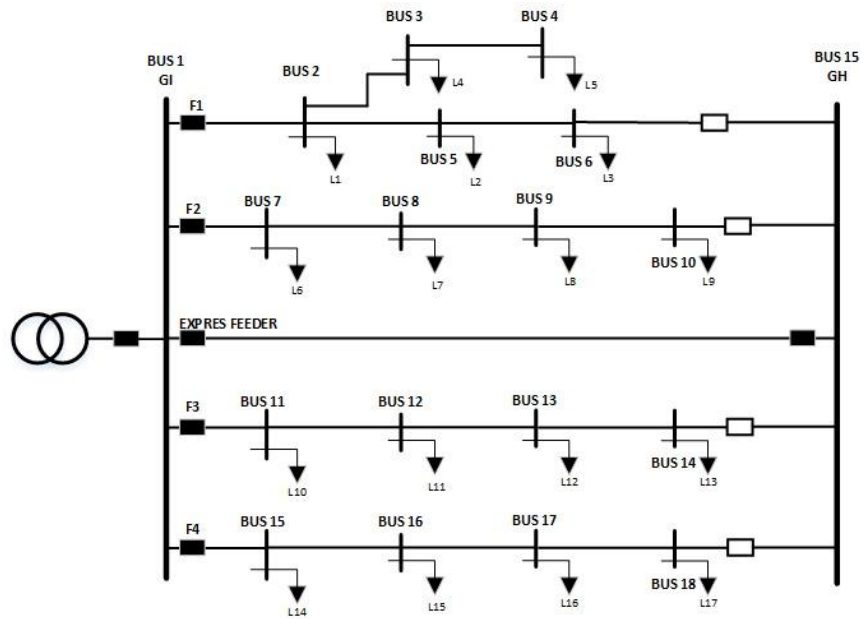
Jaringan distribusi *loop* (juga dikenal sebagai jaringan cincin) adalah konfigurasi jaringan distribusi di mana saluran-saluran terhubung membentuk lingkaran atau cincin. Dalam jaringan ini, terdapat dua atau lebih jalur yang memasok daya ke titik beban, meningkatkan keandalan karena jika satu jalur terganggu, jalur lain dapat mengambil alih.



Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan *Loop*

c. Konfigurasi Jaringan *Spindel*

Jaringan distribusi *spindle* adalah suatu konfigurasi jaringan distribusi tenaga listrik yang menggabungkan elemen-elemen dari sistem *radial* dan *loop*, dengan tambahan sebuah saluran cadangan (*express feeder*) yang terhubung melalui gardu hubung. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan keandalan pasokan listrik dengan menyediakan jalur alternatif jika terjadi gangguan pada saluran utama.

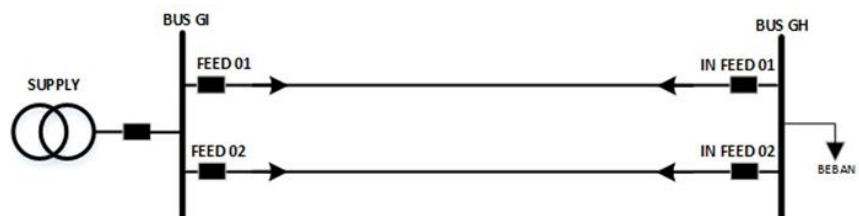


Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan *Spindel*

d. Konfigurasi Jaringan *SpotLoad*

Konfigurasi jaringan *spotload* adalah konfigurasi khusus untuk pelanggan dengan daya besar (di atas 8MVA) yang membutuhkan keandalan tinggi, dengan menggunakan beberapa penyulang yang beroperasi paralel dari gardu induk dan terhubung ke gardu distribusi melalui *directional relay*.

Konfigurasi ini memungkinkan satu penyulang cadangan untuk menjamin kesinambungan pasokan daya jika salah satu penyulang utama mengalami gangguan.



Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan *SpotLoad*



memungkinkan pengalihan jaringan dilakukan secara cepat dan real time. Hal ini menjadi sangat penting dalam sistem dengan tingkat keandalan tinggi, seperti pada konsep *Zero Down Time (ZDT)*, di mana kontinuitas pasokan listrik harus tetap terjaga tanpa adanya pemadaman. Rekonfigurasi jaringan merupakan salah satu prinsip utama dalam penerapan sistem ZDT, di mana pengalihan suplai dilakukan secara cepat untuk menjaga kontinuitas pelayanan kepada pelanggan.

Namun demikian, proses rekonfigurasi juga dapat menyebabkan perubahan kondisi operasi sistem, seperti redistribusi aliran daya, peningkatan pembebanan pada penyulang tertentu, serta perubahan profil tegangan pada bus-bus dalam jaringan. Oleh karena itu, diperlukan analisis teknis, seperti analisis aliran daya (*load flow*) dan kestabilan sistem (*transient stability*), untuk memastikan bahwa sistem tetap berada dalam batas operasi yang aman setelah dilakukan perubahan konfigurasi.

### 2.3 Konsep *Zero Down Time (ZDT)*

Konsep *Zero Down Time (ZDT)* merupakan suatu pendekatan dalam sistem distribusi tenaga listrik yang bertujuan untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik tanpa terjadinya pemadaman pada sisi pelanggan. Sistem ini dirancang agar tetap mampu menyuplai energi listrik secara berkelanjutan meskipun terjadi gangguan pada salah satu komponen jaringan maupun saat dilakukan pemeliharaan terencana.

Sistem ZDT dirancang agar beban kritis tidak mengalami interupsi suplai listrik selama proses perpindahan sumber maupun saat terjadi gangguan pada sumber utama. Oleh karena itu, waktu padam yang ditoleransi pada sistem ZDT secara ideal adalah 0 ms namun pada implementasinya, kontinuitas pasokan dipertahankan melalui sumber redundan, UPS online, atau static transfer switch sehingga proses transfer daya tidak menimbulkan gangguan yang dirasakan oleh beban kritis.

Dengan demikian untuk waktu transfer feeder selama 1 sampai 3 detik namun dengan sistem ZDT waktu padam beban kritis dapat dicapai pada angka 0 detik.

Penerapan ZDT dilakukan melalui konfigurasi jaringan yang memiliki tingkat redundansi tinggi, yaitu dengan menyediakan lebih dari satu sumber pasokan serta jalur penyaluran energi listrik yang saling terhubung. Dengan adanya konfigurasi tersebut, apabila terjadi gangguan pada salah satu penyulang atau sumber, maka suplai listrik dapat segera dialihkan ke sumber atau jalur alternatif melalui proses rekonfigurasi jaringan.

Salah satu prinsip utama dalam sistem ZDT adalah konsep *redundansi*, yang umumnya dinyatakan dalam kriteria N-1 dan N+1. Kriteria N-1 menunjukkan bahwa sistem tetap dapat beroperasi normal meskipun terjadi kegagalan pada satu komponen, sedangkan kriteria N+1 menunjukkan adanya cadangan kapasitas tambahan yang mampu menopang beban sistem ketika terjadi gangguan. Penerapan prinsip ini bertujuan untuk meningkatkan keandalan sistem serta meminimalkan risiko terjadinya pemadaman.

Selain itu, sistem ZDT sangat bergantung pada kemampuan pengoperasian jaringan secara fleksibel, khususnya dalam hal *switching* dan rekonfigurasi jaringan secara real time. Proses ini memungkinkan perubahan jalur aliran daya dilakukan dengan cepat sehingga gangguan yang terjadi tidak berdampak pada sisi pelanggan. Dalam implementasinya, sistem ini sering didukung oleh teknologi otomasi dan sistem pengendalian seperti SCADA untuk mempercepat proses pengalihan suplai.

Meskipun secara konseptual sistem ZDT mampu meningkatkan keandalan dan kontinuitas suplai, penerapan konfigurasi jaringan dengan multi sumber dan multi penyulang juga menimbulkan kompleksitas dalam operasi sistem. Proses pengalihan beban akibat gangguan dapat menyebabkan perubahan distribusi aliran daya, peningkatan pembebanan pada penghantar tertentu, serta fluktuasi tegangan pada sistem. Oleh karena itu, diperlukan analisis teknis seperti analisis aliran daya (*load flow*) untuk mengevaluasi kondisi

*steady-state* serta analisis kestabilan transien (*transient stability*) untuk mengkaji respons sistem terhadap gangguan.

Dengan demikian, konsep ZDT tidak hanya berfokus pada aspek keandalan, tetapi juga memerlukan evaluasi menyeluruh terhadap kinerja sistem tenaga listrik agar tetap berada dalam batas operasi yang aman dan stabil pada berbagai kondisi operasi.

Oleh karena itu, analisis terhadap sistem ZDT menjadi penting untuk memastikan bahwa konfigurasi jaringan yang dirancang tidak hanya andal secara konsep, tetapi juga memenuhi kriteria teknis dalam operasi sistem tenaga listrik.

#### 2.4 Analisis Aliran Daya (*Load Flow*)

Analisis aliran daya merupakan salah satu metode utama dalam studi sistem tenaga listrik yang digunakan untuk menentukan kondisi operasi sistem pada keadaan tunak (*steady-state*). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui distribusi aliran daya aktif dan reaktif pada setiap komponen sistem, serta untuk mengevaluasi parameter penting seperti profil tegangan, pembebanan penghantar, dan rugi-rugi daya dalam jaringan.

Dalam analisis *load flow*, sistem tenaga listrik direpresentasikan dalam bentuk model jaringan yang terdiri dari bus (*node*) dan saluran transmisi atau distribusi yang saling terhubung. Setiap bus memiliki parameter tertentu, seperti tegangan, daya aktif, dan daya reaktif, yang digunakan untuk menghitung kondisi sistem secara keseluruhan.

Berdasarkan karakteristiknya, bus dalam sistem tenaga listrik umumnya diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu *slack bus*, *PV bus*, dan *PQ bus*. *Slack bus* berfungsi sebagai referensi sistem dengan nilai tegangan dan sudut fase yang diketahui, *PV bus* merupakan bus dengan daya aktif dan tegangan yang diketahui, sedangkan *PQ bus* merupakan bus dengan daya aktif dan reaktif yang diketahui. Klasifikasi ini digunakan dalam proses perhitungan untuk menentukan variabel yang belum diketahui pada sistem.

Tujuan utama dari analisis *load flow* adalah untuk mengevaluasi apakah sistem tenaga listrik beroperasi dalam kondisi yang aman dan sesuai dengan batas yang ditentukan. Parameter yang dianalisis meliputi profil tegangan pada setiap bus, aliran daya pada saluran, rugi-rugi daya sistem, serta tingkat pembebanan penghantar. Hasil analisis ini sangat penting dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga listrik, khususnya untuk memastikan bahwa tidak terjadi pelanggaran batas tegangan maupun *overload* pada peralatan.

Dalam penelitian ini, analisis *load flow* digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem ZDT pada berbagai kondisi operasi, baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan dan proses rekonfigurasi jaringan. Melalui analisis ini, dapat diketahui perubahan profil tegangan, distribusi aliran daya, serta tingkat pembebanan penghantar akibat modifikasi konfigurasi jaringan secara real time.

Metode perhitungan *load flow* yang umum digunakan antara lain metode *Gauss-Seidel*, *Newton-Raphson*, dan *Fast Decoupled*. Di antara metode tersebut, metode *Newton-Raphson* banyak digunakan karena memiliki tingkat konvergensi yang tinggi dan akurasi yang baik dalam menyelesaikan sistem persamaan *nonlinier* pada sistem tenaga listrik.

## 2.5 Kestabilan Sistem Tenaga (*Transient Stability*)

Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan kemampuan sistem untuk mempertahankan kondisi operasi yang seimbang setelah mengalami gangguan. Salah satu jenis kestabilan yang penting dalam analisis sistem tenaga adalah kestabilan transien (*transient stability*), yaitu kemampuan sistem untuk tetap sinkron dan kembali ke kondisi stabil setelah mengalami gangguan besar dalam waktu singkat.

Gangguan yang dimaksud dapat berupa hubung singkat (*fault*), pelepasan beban secara tiba-tiba, kehilangan sumber pembangkit, maupun proses switching atau rekonfigurasi jaringan. Gangguan tersebut menyebabkan

perubahan mendadak pada parameter sistem seperti tegangan, arus, frekuensi, dan sudut rotor generator.

Pada kondisi gangguan, sistem akan mengalami perubahan dinamis yang ditandai dengan osilasi sudut rotor dan fluktuasi tegangan. Sistem dikatakan stabil apabila setelah gangguan diatasi, parameter sistem dapat kembali menuju kondisi *steady-state* tanpa kehilangan sinkronisasi antar sumber. Sebaliknya, jika sistem tidak mampu kembali ke kondisi stabil, maka dapat terjadi kehilangan sinkronisasi yang berpotensi menyebabkan pemadaman sebagian atau seluruh sistem.

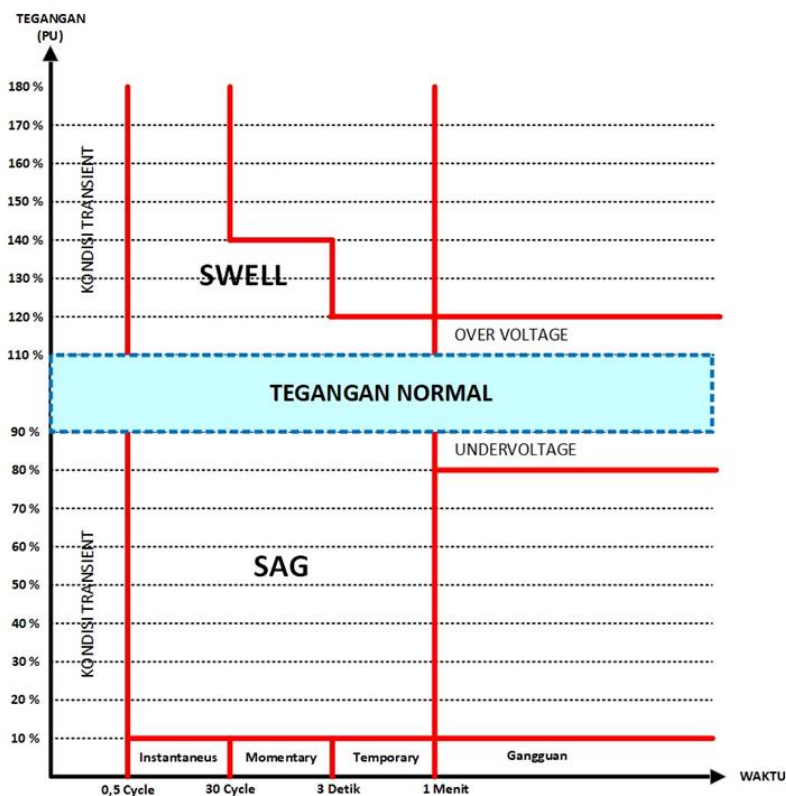
Analisis *transient stability* dilakukan untuk mengevaluasi respons sistem terhadap gangguan dalam rentang waktu yang sangat singkat, biasanya dalam orde milidetik hingga beberapa detik. Parameter yang diamati dalam analisis ini meliputi perubahan sudut rotor, tegangan, serta frekuensi sistem terhadap waktu. Hasil analisis ini digunakan untuk menentukan apakah sistem tetap stabil atau mengalami ketidakstabilan setelah gangguan terjadi. Dalam penelitian ini, analisis *transient stability* digunakan untuk mengkaji respons sistem ZDT terhadap gangguan dan proses rekonfigurasi jaringan secara real time. Analisis ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem tidak hanya mampu menjaga kontinuitas suplai, tetapi juga tetap berada dalam kondisi stabil setelah terjadi perubahan konfigurasi jaringan.

## 2.6 Kualitas Tegangan dan Gangguan Tegangan

Kualitas tegangan merupakan salah satu aspek penting dalam sistem tenaga listrik yang menunjukkan kemampuan sistem dalam menyediakan tegangan yang stabil dan sesuai dengan nilai nominal yang dipersyaratkan. Tegangan yang baik adalah tegangan yang memiliki nilai dan bentuk gelombang yang berada dalam batas toleransi tertentu, sehingga tidak mengganggu kinerja peralatan listrik yang terhubung pada sistem.

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, kualitas tegangan umumnya diukur berdasarkan besarnya deviasi tegangan terhadap nilai nominal serta kestabilannya selama operasi. Standar mutu tegangan biasanya mengacu

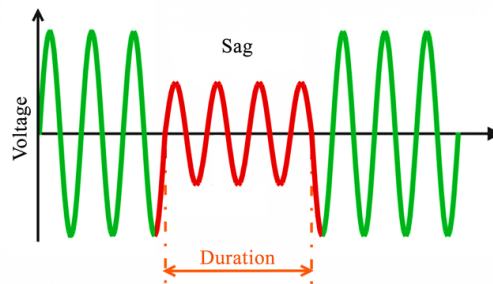
pada ketentuan yang berlaku, di mana tegangan harus berada dalam rentang tertentu, misalnya  $\pm 5\%$  hingga  $\pm 10\%$  dari tegangan nominal. Penyimpangan di luar batas tersebut dapat dikategorikan sebagai gangguan kualitas daya. Gangguan tegangan (*voltage disturbance*) merupakan kondisi di mana terjadi perubahan nilai tegangan dari kondisi normal dalam jangka waktu tertentu. Gangguan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti gangguan hubung singkat, perubahan beban secara tiba-tiba, *switching* jaringan, maupun proses rekonfigurasi sistem. Dalam penelitian sistem tenaga, gangguan tegangan menjadi salah satu parameter penting yang dianalisis untuk mengetahui keandalan dan kestabilan sistem.



Gambar 2.7 Definisi *Voltage Magnitude Event* berdasarkan Standar IEEE 1159-195.

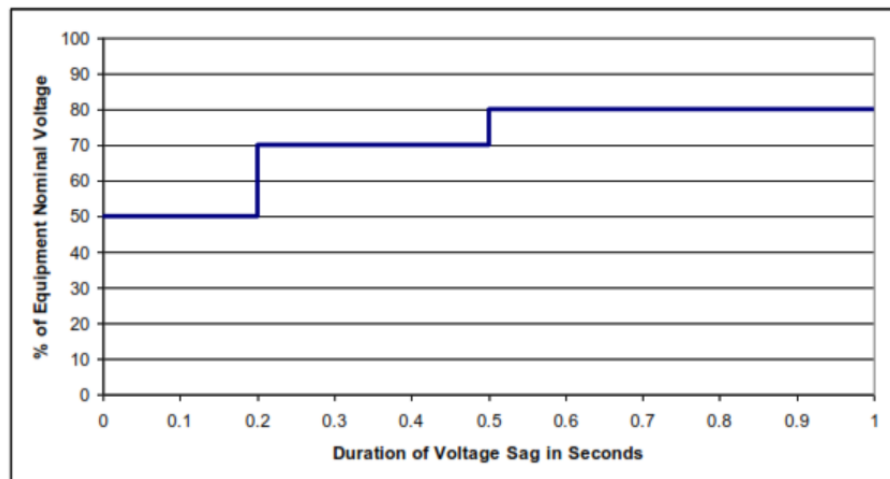
Gangguan kestabilan tegangan jangka pendek mengakibatkan kedip tegangan (*voltage sags*) dan kenaikan tegangan (*swells*). Kedip Tegangan (*voltage Sag*) adalah fenomena penurunan *magnitude* tegangan efektif terhadap harga nominalnya selama periode antara 0,5 *cycle* hingga 1 menit.

Kenaikan Tegangan merupakan fenomena peningkatan *magnitude* tegangan efektif terhadap harga nominalnya dengan durasi antara 0,5 *cycle* hingga 1 menit. Gangguan kestabilan tegangan jangka panjang mengakibatkan tegangan lebih (*overvoltage*) dan tegangan kurang (*undervoltage*).



Gambar 2.8 Voltage Sag

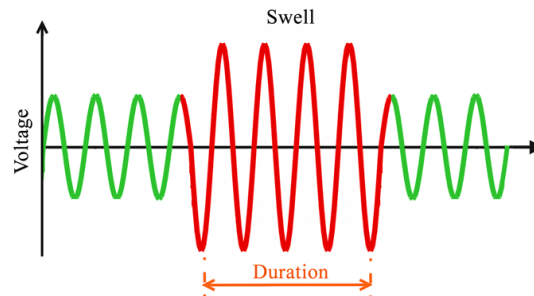
Berdasarkan sumber lainnya yaitu SEMI F47-0706 *Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity* kedip tegangan yang diijinkan diklasifikasikan seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.9 Durasi *Sag Voltage* untuk komponen Peralatan SEMI F47-0706

*Voltage Swell* adalah suatu fenomena dimana tegangan listrik mengalami kenaikan secara tiba-tiba dan sesaat. Pada *voltage swell* kenaikan tegangan efektif (RMS) melebihi tegangan normal, antara 110% hingga 180%, dengan durasi yang serupa dengan *voltage sag* yaitu berada di rentang 0,5

cycle sampai 1 menit. *Voltage swell* terjadi akibat pelepasan beban mendadak atau gangguan lainnya dalam sistem pasokan daya.



Gambar 2.10 Voltage Swell

Tegangan lebih merupakan peningkatan nilai efektif tegangan hingga melebihi 110% dari tegangan nominal ketika melebihi satu menit. Tegangan kurang merupakan penurunan nilai efektif tegangan hingga melebihi 90% dari tegangan nominal ketika melebihi satu menit.

Dalam konteks penelitian ini, kualitas tegangan dianalisa untuk memastikan apakah sistem ZDT mampu menjaga kondisi tegangan tetap dalam batas yang diizinkan, termasuk saat terjadi gangguan dan proses rekonfigurasi jaringan secara real time.

## 2.7 Tingkat Mutu Pelayanan (TMP) PLN

TMP PLN adalah standar kualitas layanan yang ditetapkan pemerintah dan harus dipenuhi oleh PLN untuk memastikan keandalan dan kualitas layanan listrik bagi pelanggan, salah satu point dari TMP ini mengatur tentang standar tegangan yang wajib diterima oleh pelanggan. Nilai tegangan pada TMP PLN ini diatur oleh Kementerian ESDM melalui Keputusan Menteri ESDM Republik Indonesia Nomor: 185.K/TL.04/DJL.3/2024 Tentang Besaran Tingkat Mutu Pelayanan PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2024 Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia yang ditetapkan pada 1 April 2024. Standar tegangan berdasarkan Keputusan Menteri itu sebesar  $\pm 5\%$  untuk tegangan menengah dan  $\pm 10\%$  untuk tegangan rendah dengan demikian maka batasan tegangan yang wajib pada level tegangan menengah adalah 21 kV untuk tegangan tertinggi dan

19 kV untuk tegangan terendah, sementara untuk tegangan rendah batas tegangan tertinggi sebesar 440 Volt dan tegangan terendah sebesar 360 Volt.

## 2.8 Aplikasi ETAP dalam Analisis Sistem Tenaga

### 2.8.1 Pengertian ETAP

ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) merupakan sebuah perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisa, mensimulasikan sebuah sistem kelistrikan, dan membuat perencanaan pembangunan atau modifikasi suatu sistem tenaga listrik. Fitur ETAP banyak digunakan untuk melakukan beberapa analisa diantaranya analisis aliran daya (*load flow*), analisis hubung singkat (*short circuit*), koordinasi proteksi, serta analisis kestabilan sistem tenaga listrik.

ETAP pertama kali dikembangkan oleh Brown, K, Shokooh, F, Abcede, H, dan Donner, G yang tergabung dalam Oper. Technology. Inc, Irvine, CA. USA, 1990 pada paper “*Interactive simulation of Power System: ETAP Application and Technique*”.



Gambar 2.11 ETAP versi 19

Pada aplikasi ETAP pengguna bisa memodelkan sistem tenaga listrik secara terintegrasi dalam bentuk diagram satu garis (*single line diagram*), sehingga memudahkan dalam melakukan simulasi dan evaluasi kinerja sistem pada berbagai kondisi operasi.

### 2.8.2 Fitur dan Modul ETAP

Aplikasi ETAP memiliki berbagai fitur dan modul untuk melakukan analisa dalam studi sistem tenaga listrik. Namun dalam penelitian ini,

modul yang digunakan difokuskan pada dua modul Analisa kelistrikan yaitu:

- a. *Load Flow Analysis*, yang digunakan untuk menganalisis kondisi *steady-state*, seperti profil tegangan, aliran daya, rugi daya, dan pembebanan penghantar. Load flow analysis adalah suatu analisa yang mempelajari aliran daya pada suatu sistem kelistrikan dari suatu titik ke titik lain dan tegangan pada bus-bus yang berada pada sistem tersebut. Analisa aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya aktif, faktor daya dan daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu jaringan sistem tenaga listrik pada keadaan pengoperasian normal, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan akan terjadi di masa yang akan datang[14].
- b. *Transient Stability Analysis*, yang digunakan untuk menganalisis respons dinamis sistem terhadap gangguan, termasuk perubahan tegangan, frekuensi, dan kestabilan sistem setelah terjadi gangguan maupun even switching pada saat rekonfigurasi berlangsung yang terjadi dalam waktu singkat. Kondisi dinamis yang diamati adalah kondisi tegangan transient saat switching terjadi pada kondisi pola operasi rekonfigurasi sistem ZDT terjadi.

Dengan penggunaan kedua modul ini evaluasi sistem dapat dilakukan secara menyeluruh, baik pada kondisi normal maupun saat terjadi gangguan dan perubahan konfigurasi jaringan.

### 2.8.3 Penerapan ETAP dalam Penelitian

Dalam penelitian ini, aplikasi ETAP digunakan sebagai alat bantu untuk memodelkan sistem distribusi 20 kV dengan konfigurasi *Zero Down-Time (ZDT)*. Model sistem dibangun berdasarkan data teknis yang tersedia di lapangan meliputi parameter penghantar, sumber, serta beban yang terhubung dalam jaringan. Selanjutnya, simulasi dilakukan

dengan beberapa skenario operasi yang sudah direncanakan sesuai dengan pola operasi pada beberapa kondisi, yaitu:

- a. Kondisi operasi normal
- b. Kondisi gangguan pada salah satu penyulang atau sumber
- c. Kondisi rekonfigurasi jaringan secara real time

Dengan simulasi ini kita dapat melakukan analisa terhadap beberapa parameter sistem seperti profil tegangan, aliran daya, pembebanan penghantar, rugi daya, dan respons sistem terhadap gangguan.

#### 2.8.4 Keunggulan Penggunaan Etap

Penggunaan ETAP dalam analisis sistem tenaga listrik memiliki beberapa keunggulan, antara lain:

- a. Dapat memodelkan sistem tenaga listrik secara detail dan terintegrasi.
- b. Menyediakan hasil simulasi dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi.
- c. Memiliki kemampuan analisa untuk kondisi *steady-state* dan kondisi dinamis dalam satu aplikasi.
- d. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk visual sehingga memudahkan dalam proses analisa data dan implementasi di lapangan.

#### 2.9 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai penggunaan konfigurasi sistem Zero Down-Time (ZDT) sudah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti diantaranya:

- a. Penelitian oleh A. Imam Kismanto dan Syarif Hidayat pada tahun 2022 dengan Judul “Analisis Perencanaan Rekonfigurasi Kelistrikan Labuan Bajo untuk Mendukung Program Kawasan Strategis Pariwisata Nasional (KSPN) Dengan Sistem *Zero Down Time* (ZDT)”, namun pada penelitian ini konfigurasi close loop yang digunakan sebagai sumber pengaman masih menggunakan ATS sehingga perpindahan sumber

pasokan masih terdapat delay sekitar 3 detik. Selain itu juga pada penelitian ini baru dilakukan analisa pada kondisi *steady-state* saja.

- b. Penelitian oleh Mayang Agustini pada tahun 2022 dengan judul “Peningkatan Sistem Jaringan *Zero Down Time* dengan Dua Transformator berbeda di Gardu Induk New Jakabaring”, pada penelitian ini pembahasan berfokus kepada sistem proteksinya sehingga tidak diperoleh data mengenai kondisi tegangan dan pembebanan.
- c. Penelitian oleh Fadhli Ramanda pada tahun 2019 dengan judul penelitian “Studi Keandalan Jaringan Listrik Dengan Sistem *Zero Down Time* Di Jakabaring *Sport City*”, pada penelitian ini konfigurasi ZDT yang disiapkan yaitu dua penyulang berbeda dari satu GI yang sama dengan konfigurasi *spot-load* secara garis besar alur konfigurasi hampir mirip dengan penelitian yang penulis susun namu perbedaannya terdapat pada sistem pasokan cadangan yang disiapkan serta analisa yang dilakukan hanya kondisi *steady-state*.

Dari beberapa penelitian terdahulu yang pernah dilakukan, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada analisis *steady-state* dan pada sistem koordinasi proteksi, belum secara spesifik mengkaji penerapan konsep ZDT dengan konfigurasi multi penyulang dan multi sumber yang melibatkan proses rekonfigurasi jaringan secara real time serta penelitian pada kondisi dinamis pada saat terjadi *switching*.

## 2.10 Kabel Tanah NA2XSEYBY

Kabel NA2XSEYBY merupakan kabel tenaga tegangan menengah dengan konduktor aluminium dan isolasi XLPE yang dirancang khusus untuk instalasi saluran kabel tanah (SKTM). Kabel ini dilengkapi lapisan semikonduktor untuk memastikan distribusi medan listrik yang merata serta layar tembaga yang berfungsi sebagai pengendali medan elektromagnetik dan jalur arus gangguan tanah. Struktur armour baja memberikan ketahanan mekanis tinggi terhadap tekanan tanah dan gangguan eksternal, sementara selubung PVC melindungi kabel dari kelembaban dan pengaruh

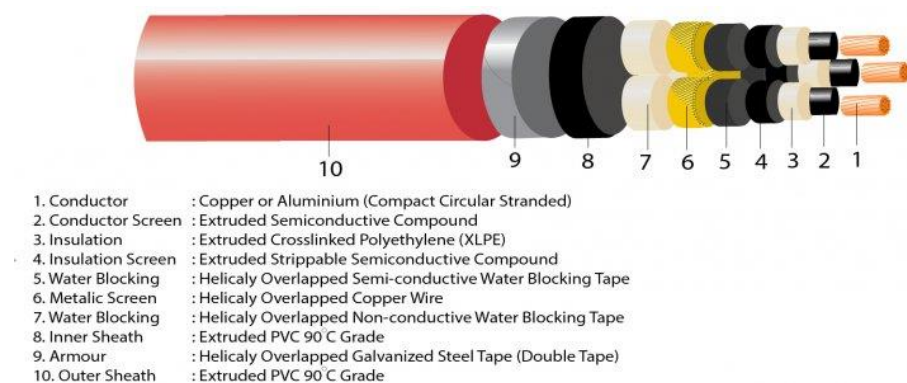
lingkungan. Dengan rugi dielektrik yang rendah, reaktansi kecil, dan stabilitas termal yang baik, NA2XSEYBY mampu memberikan rugi daya rendah, jatuh tegangan kecil, serta keandalan operasi yang tinggi pada sistem distribusi tegangan menengah. Kuat Hantar Arus (KHA) dari kabel NA2XSEYBY dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 2.1 Nilai KHA kabel NA2XSEYBY

Jenis Instalasi pada suhu 30°	KHA Maksimal (Amp)		
	70 mm <sup>2</sup>	150 mm <sup>2</sup>	240 mm <sup>2</sup>
Di Udara	199	318	425
Di Dalam Tanah	191	292	385

NA2XSEBY merupakan kode standar untuk sebuah kabel dengan rincian sebagai berikut:

- a. NA : Menunjukkan bahwa jenis penghantar terbuat dari bahan Aluminium.
- b. 2X : Menunjukkan isolasi XLPE (*Cross-linked polyethylene*)
- c. SE : Menunjukkan lapisan pelindung
- d. BY : Menunjukkan selubung luar PVC (*Polyvinyl Chloride*)



Gambar 2.12 kabel NA2XSEYBY

Kabel tegangan menengah NA2XSEYBY memiliki rugi daya yang relatif kecil dan kestabilan tegangan yang baik karena konstruksi listrik dan mekaniknya yang teroptimasi. Penggunaan isolasi XLPE menghasilkan rugi dielektrik yang rendah serta ketahanan termal yang tinggi, sehingga karakteristik listrik tetap stabil pada kondisi

pembebanan kontinu. Keberadaan lapisan semikonduktor di antara penghantar dan isolasi memungkinkan distribusi medan listrik yang merata, sehingga menekan terjadinya pelepasan parsial dan meningkatkan keandalan isolasi. Selain itu, layar tembaga berfungsi mengendalikan medan elektromagnetik dan menyediakan jalur impedansi rendah bagi arus gangguan tanah, sehingga mengurangi tegangan induksi dan fluktuasi tegangan. Dengan geometri instalasi kabel tanah yang kompak, reaktansi induktif menjadi lebih kecil dibandingkan dengan saluran udara, yang berdampak pada penurunan jatuh tegangan sepanjang penyulang. Lebih lanjut, pelindung baja dan selubung PVC menjaga integritas mekanis serta melindungi kabel dari pengaruh lingkungan, sehingga mencegah peningkatan resistansi penghantar seiring waktu. Kombinasi karakteristik tersebut berkontribusi terhadap minimisasi rugi daya dan peningkatan kestabilan tegangan pada sistem distribusi tegangan menengah.

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Metode Penelitian**

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode berbasis model (*model-based analysis*), di mana sistem tenaga listrik dimodelkan ke dalam perangkat lunak ETAP sesuai dengan data teknis yang tersedia. Model sistem tersebut kemudian digunakan untuk melakukan simulasi pada berbagai skenario pola operasi yang sudah dirancang dengan proses modifikasi konfigurasi jaringan secara real time.

Analisis dilakukan dengan dua metode yaitu metode *load flow* dan metode *transient stability* dimana metode *load flow* digunakan untuk mengevaluasi parameter *steady-state* seperti profil tegangan, aliran daya, pembebanan penghantar, dan rugi daya, sedangkan metode *transient stability* dilakukan untuk menganalisis kondisi tegangan ketika proses pemindahan sumber pasokan tenaga listrik sesuai dengan pola operasi pada sistem ZDT yang sudah disiapkan.

#### **3.2 Lokasi dan Objek Penelitian**

Penelitian dilakukan pada sistem distribusi tenaga listrik untuk PT Pacrim Nusantara Lestari Foods yang berlokasi di Desa Srengsem, Kecamatan Panjang, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung. PT Pacrim sendiri merupakan salah satu pelanggan Tegangan Menengah di PT PLN (Persero) UP3 Tanjung Karang dengan daya terpasang sebesar 5.540 kVA dan berencana menambah daya layanan ke daya 8.660 kVA pada tahapan selanjutnya.

Sistem pasokan 20 kV yang diaplikasikan adalah sistem pasokan *Zero Down Time* (ZDT). Sistem ZDT adalah sebuah konsep sistem penyaluran tenaga listrik yang dirancang untuk beroperasi berkelanjutan tanpa adanya pemadaman pada pelanggan, baik akibat gangguan teknis pada jaringan maupun ketika jaringan perlu dilakukan pemeliharaan terencana. Tujuannya adalah meningkatkan keandalan layanan melalui konfigurasi jaringan yang

redundan, di mana suplai listrik cadangan dapat otomatis dialihkan saat sumber utama terganggu.



Gambar 3.1 Peta Geografis Sistem ZDT Pacrim

Konfigurasi ZDT ini terdiri dari empat penyulang 20 kV khusus dengan sumber pasokan dari dua Gardu Induk (GI) 150/20 kV yang berbeda yaitu GI Tarahan dan GI New Tarahan. Selain itu juga sumber pasokan didukung oleh tiga trafo tenaga yang berbeda juga sehingga dengan sistem ZDT ini memungkinkan adanya redundansi pasokan serta pengalihan beban melalui proses rekonfigurasi jaringan secara real time apabila terjadi gangguan pada salah satu sumber atau penyulang.

Sistem ZDT yang di aplikasikan di PT Pacrim ini merupakan kombinasi antara konfigurasi spotload dan konfigurasi spindel yang di rancang sedemikian rupa sehingga terbentuklah suatu sistem pasokan yang andal baik itu dari segi keberlangsungan pasokan maupun untuk penyediaan kapasitas yang besar

### 3.3 Data Penelitian

#### 3.3.1 Data Pelanggan

Pelanggan yang menjadi pokok bahasan adalah PT Pacrim Nusantara Lestari Foods dengan daya terpasang sebesar 5.540 kVA tegangan 20 kV.

### 3.3.2 Data Gardu Induk

Sumber pasokan berasal dari dua Gardu Induk 150/20 kV dengan data sebagai berikut:

Tabel 3.1 Data Gardu Induk

No	Nama GI	Jumlah Trafo	Kapasitas (MVA)
1	GI 150/20 kV Tarahan	2	120
2	GI 150/20 kV New Tarahan	2	90

### 3.3.3 Data Trafo Tenaga

Tabel 3.2 Data Trafo Tenaga 150/20 kV

No	Unit Trafo	Kapasitas (MVA)	Beban (MVA)	Gardu Induk
1	Trafo #1 TRH	60	19,11	Tarahan
2	Trafo #2 TRH	60	15,00	Tarahan
3	Trafo #1 NTH	60	23,67	New Tarahan

### 3.3.4 Data Penyulang

PT Pacrim dipasok melalui empat penyulang dengan data sebagai berikut:

Tabel 3.3 Data Penyulang 20 kV Pasokan ZDT

No	Nama	Gardu Induk	Unit Trafo	Status
1	TRH 18	Tarahan	Trafo #1	Pasokan Utama
2	TRH 19	Tarahan	Trafo #1	Pasokan Utama
3	Samudra	Tarahan	Trafo #2	Backup 1
4	NWT 17	New Tarahan	Trafo #1	Backup 2

Berikut detail penyulang berdasarkan status pasokan untuk Sistem ZDT untuk PT Pacrim:

#### a. Pasokan Utama

Penyulang utama dari sistem ZDT PT Pacrim adalah Penyulang TRH 18 dan TRH 19 yang bersumber dari Trafo Daya #1 GI 150/20 kV Tarahan dengan kapasitas 60 MVA. Penyulang Utama disetting dengan konfigurasi *spotload*. Jenis jaringan 20 kV Penyulang TRH18 dan Penyulang TRH19 adalah SKTM sepanjang 2,4 kms dengan jenis

penghantar kabel NA2XSEYBY dengan penampang penghantar adalah 240 mm.

b. Backup 1

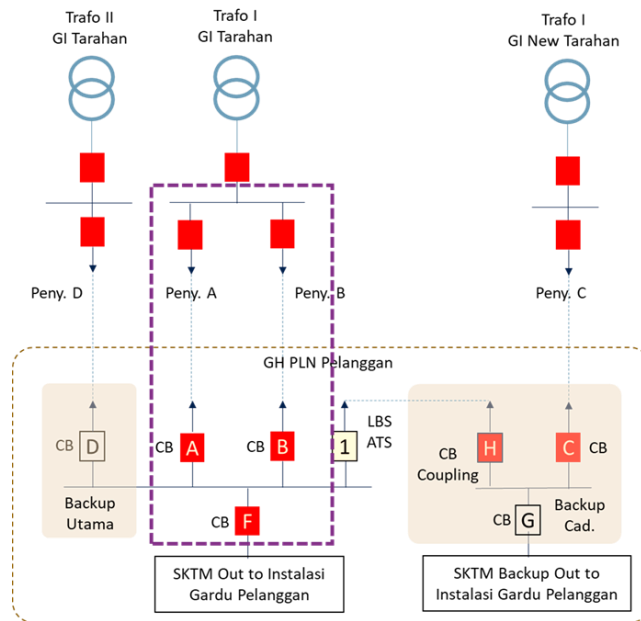
Penyulang Backup 1 dari sistem ZDT PT Pacrim ini adalah Penyulang Samudra yang bersumber dari Trafo Daya #2 GI 150/20 kV Tarahan dengan kapasitas 60 MVA. Penyulang Backup 1 disetting standby dengan posisi *Circuit Breaker* (CB) adalah *Normally Open* (NO) di GH Pacrim. Penyulang Samudra diposisikan seperti *express feeder* pada konfigurasi spindel dimana posisi CB akan secara otomatis berganti ke kondisi *Normally Close* (NC) ketika konfigurasi pasokan utama mengalami gangguan. Jenis jaringan Penyulang Samudra adalah SUTM sepanjang 2,4 kms dengan jenis penghantar kabel AAAC dengan penampang penghantar adalah 150 mm.

c. Backup 2

Penyulang Backup 2 dari Sistem ZDT PT Pacrim adalah Penyulang NWT 17 yang bersumber dari Trafo Daya #1 GI 150/20 kV New Tarahan dengan kapasitas 60 MVA. Posisi Penyulang backup 2 berada pada Bus 20 kV yang berbeda dengan Bus 20 kV Pasokan Utama dan Backup 1 namun dilengkapi komponen *Automatic Transfer Switch* (ATS) yang akan beroperasi ketika pola Operasi Utama dan Pola Operasi Backup Utama mengalami kegagalan. Jenis jaringan Penyulang NWT17 adalah gabungan antara SUTM sepanjang 1,6 kms dengan penghantar AAACS 240 mm dan SKTM sepanjang 2,3 kms dengan penghantar NA2XSEYBY penampang 240 mm.

### 3.4 Pemodelan Sistem

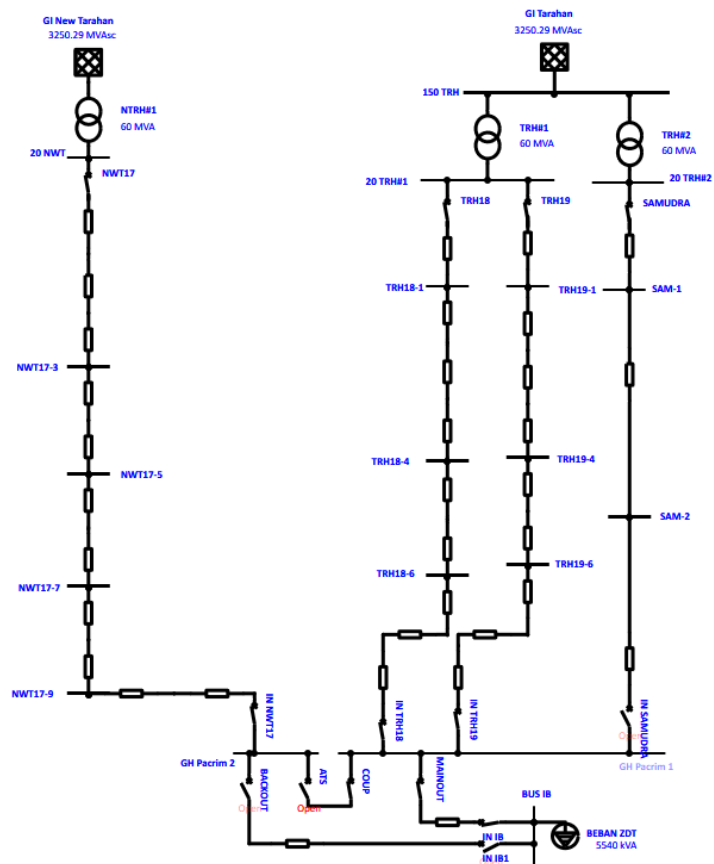
Sistem ZDT untuk PT Pacrim terdiri dari empat penyulang 20 kV dengan sumber pasokan dari dua Gardu Induk 150/20 kV serta dari tiga trafo tenaga 150/20 kV berikut single line diagramnya:



Gambar 3.2 Konfigurasi Sistem ZDT PT Pacrim

Pola operasi dari sistem ZDT PT Pacrim terdiri dari tiga opsi pasokan yang akan bekerja secara otomatis sesuai dengan urutan pola operasi yang direncanakan.

Pemodelan pada ETAP dibuat sedemikian rupa dengan memperhatikan masing-masing komponen pada jaringan dan diupayakan mendekati kondisi di lapangan agar hasil simulasi diperoleh seakurat mungkin. Berikut gambaran pemodelan untuk sistem ZDT PT Pacrim:



Gambar 3.3 Pemodelan Sistem ZDT PT Pacrim

Simulasi yang akan dilakukan berupa Analisa Aliran Daya, Analisa Hubung Singkat dan Analisa Transient Stability pada masing masing pola operasi.

### 3.5 Skenario Simulasi

Dalam sistem ZDT Pacrim ini terdapat tiga skenario konfigurasi yang akan berjalan menyesuaikan kondisi di lapangan sebagai berikut:

#### 3.5.1 Skenario Konfigurasi ZDT

Skenario ini merupakan implementasi dari sistem ZDT dimana masing masing Penyulang mampu memikul beban penuh dari beban total sehingga ketika terjadi gangguan di salah satu penyulang utama maka penyulang utama lainnya mampu beroperasi normal sehingga tidak terjadi pemadaman di pelanggan. Simulasi dilakukan dengan melepas salah satu penyulang utama dan

mengamati bagaimana kondisi dari penyulang utama lainnya ketika memikul beban keseluruhan, simulasi ini merupakan rekonfigurasi jaringan tahap satu.

#### 3.5.2 Skenario Konfigurasi Pasokan Backup 1

Skenario ini akan bekerja ketika kedua penyulang utama kehilangan tegangan, Ketika kondisi ini terjadi maka CB Penyulang Backup 1 akan beroperasi secara otomatis dari posisi NO ke posisi NC sehingga pelanggan tetap mendapatkan pasokan daya meskipun ada kondisi keding pada saat switching terjadi. Simulasi menggambarkan rekonfigurasi jaringan tahap dua dimana kedua pasokan penyulang utama mengalami gangguan kemudian sumber pasokan diganti dengan pasokan penyulang Backup 1.

#### 3.5.3 Skenario Konfigurasi Pasokan Backup 2

Skenario Backup 2 akan dieksekusi secara otomatis ketika sistem tidak merasakan adanya tegangan pada penyulang utama dan penyulang backup 1. Mekanisme operasinya ATS akan beroperasi dan menyalurkan tegangan dari Penyulang Backup 2. Simulasi ini menggambarkan rekonfigurasi jaringan tahap tiga dimana penyulang utama 1, penyulang utama 2 dan penyulang backup 1 kehilangan tegangan yang selanjutnya beban di ambil alih oleh penyulang backup 2.

### 3.6 Metode Analisa

#### 3.6.1 Analisa Load Flow

Analisa load flow merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi operasi sistem tenaga listrik pada keadaan *steady-state*. Beberapa parameter yang ingin diperoleh dari Analisa Load Flow disina antara lain:

##### a. Kondisi Tegangan

Kondisi tegangan yang diamati adalah kondisi tegangan kirim dan tegangan terima pada kondisi setiap konfigurasi.

##### b. Pembebanan Penyulang

Pembebanan per penyulang diamatai pada kondisi normal dan kondisi ketika sistem dilakukan rekonfigurasi sesuai pola operasi yang ada.

c. Rugi Rugi Daya

Analisa ini dilakukan untuk mengetahui besaran susut teknis pada penyulang yang bisa dijadikan acuan dalam pemilihan konfigurasi jaringan.

3.6.2 Analisa *Transient Stability*

Analisis *transient stability* digunakan untuk mengevaluasi respons dinamis sistem tenaga listrik akibat gangguan atau perubahan kondisi operasi dalam waktu singkat. Kondisi dinamis yang diamati adalah kondisi tegangan transient saat switching terjadi pada kondisi pola operasi rekonfigurasi sistem ZDT terjadi.

Modul *transient stability* pada ETAP merupakan analisa *transient* untuk tegangan RMS terhadap waktu bukan betuk gelombang sinusoida instant seperti pada osiloskop. Output dari *transient stability* ETAP ini berupa Tegangan RMS, Frekuensi, Daya Aktif dan Daya Reaktif.

Pada studi *transient stability* fenomena stabilitas diamati dalam orde 0,1 detik sampai 10 detik dimana langkah waktu yang dipakai antara rentang 1 ms sampai dengan 20 ms.

3.7 Parameter Evaluasi

Parameter evaluasi digunakan sebagai acuan dalam menilai kinerja sistem tenaga listrik berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan. Parameter ini disusun untuk menjawab rumusan masalah penelitian serta mengevaluasi kondisi sistem pada berbagai skenario pola operasi rekonfigurasi sistem ZDT dilakukan. Berikut beberapa parameter yang dijadikan acuan dalam penelitian ini:

Tabel 3.4 Data Parameter Evaluasi

No	Parameter	Satuan	Kriteria	Tujuan
1	Tegangan	p.u.	0.95-1.05	Kualitas Tegangan
2	Aliran Daya	kW		Distribusi Daya
3	Pembebanan	%	$\leq 80\%$	Kemampuan Termal
4	Rugi Daya	kW	Minimum	Efisiensi
5	Tegangan vs Waktu	-	Dalam Batas	Sag & Swell

### **3.8 Batasan Analisa**

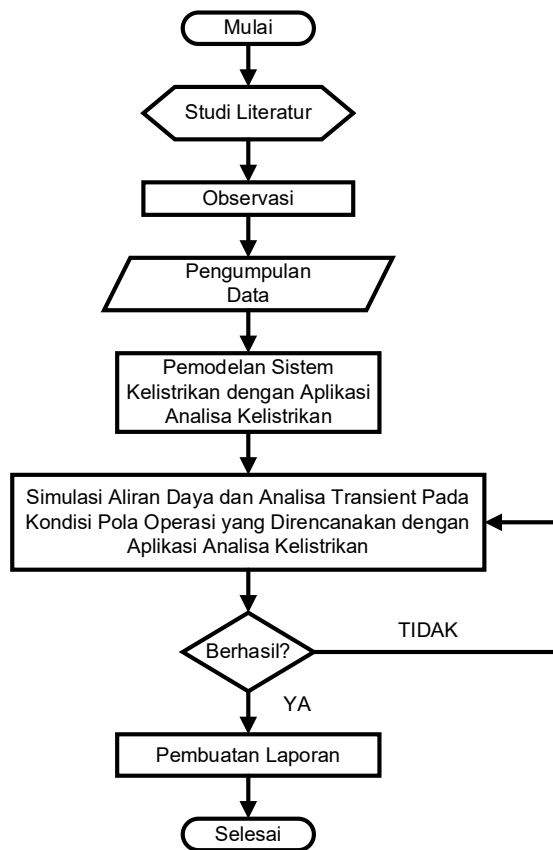
Batasan analisa dalam penelitian ini ditetapkan untuk memperjelas ruang lingkup kajian serta memastikan bahwa penelitian tetap terfokus pada tujuan yang telah ditentukan. Analisis yang dilakukan fokus kepada aspek teknis sistem tenaga listrik dengan menggunakan pendekatan simulasi berbasis model khususnya kondisi tegangan, pembebanan, aliran daya, rugi daya dan kondisi tegangan transient saat *switching* dilakukan.

Dalam penelitian ini tidak membahas perhitungan ekonomi, proteksi sistem secara detail, maupun aspek keandalan berbasis indeks seperti SAIDI dan SAIFI.

Selain itu juga batasan analisa tidak mencakup simulasi elektromagnetik Transient (EMT) yang memerlukan rentang waktu 100 sampai 1000 titik per siklus atau sekitar 0,2 milidetik sampai dengan 20 mikrodetik agar menghasilkan gelombang sinusoida yang halus.

### **3.9 Diagram Alir Penelitian**

Untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai tahapan penelitian, disusun diagram alir penelitian yang menunjukkan urutan proses secara sistematis dari awal hingga akhir penelitian, berikut diagram alir penelitian ini:



Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian

### 3.10 Waktu dan Tempat Penelitian

Penyusunan dan pelaksanaan tesis ini dimulai pada bulan September 2025 s.d. Desember 2025 bertempat di jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung. Penelitian dilakukan dengan simulasi dengan bantuan *software* analisa kelistrikan.

Table 3.5 *Time Line* Penelitian

No	Kegiatan	Waktu Pelaksanaan															
		Sept 25				Okto 25				Nove 25				Dese 25			
		M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	
1	Studi Literatur	■	■	■	■												
2	Seminar Proposal					■											
3	Perancangan Simulasi					■	■	■	■								
4	Pengujian Hasil Simulasi					■	■	■	■								
5	Penulisan Laporan, Analisa Data dan Pembahasan					■	■	■	■	■	■	■	■				
6	Komprehensif													■			
7	Revisi													■	■	■	

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis kinerja sistem *Zero Down Time* (ZDT) yang telah dilakukan, diperoleh beberapa hasil yang dapat digunakan untuk menjawab rumusan masalah penelitian. Kesimpulan dan saran yang disajikan pada bab ini merupakan rangkuman dari hasil penelitian serta rekomendasi untuk pengembangan sistem maupun penelitian selanjutnya.

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan, seluruh konfigurasi sistem menunjukkan kinerja yang masih berada dalam batas operasi yang aman. Nilai tegangan pada setiap konfigurasi penyulang berada pada rentang 0,95–1,05 p.u. sesuai standar yang berlaku, sementara tingkat pembebanan penghantar pada masing-masing penyulang tidak melebihi 80% dari Kapasitas Hantar Arus (KHA) yang diizinkan. Selain itu, susut jaringan yang terjadi pada seluruh konfigurasi tergolong sangat baik karena nilainya berada di bawah 5% dari daya yang disalurkan, sehingga masih memenuhi ketentuan SPLN No. 72 Tahun 1987.

Hasil analisis transien menunjukkan bahwa konfigurasi *Zero Downtime* (ZDT) memberikan respons tegangan yang berbeda terhadap berbagai jenis gangguan, dimana gangguan LG, LL, dan LLG menyebabkan *voltage sag* dengan tegangan minimum pada rentang 0,32–0,66 p.u., sedangkan gangguan tiga fasa menghasilkan penurunan tegangan terdalam hingga 0,005 p.u. yang menurut klasifikasi IEEE Std 1159 termasuk kategori *voltage sag* sesaat.

Di sisi lain, analisa proses *switching* menunjukkan bahwa konfigurasi backup 1 dan backup 2 masih mengalami kehilangan tegangan sesaat yang ditandai dengan penurunan tegangan hingga 0 p.u., sehingga proses pengalihan sumber belum sepenuhnya dapat berlangsung tanpa interupsi dan masih terdapat jeda waktu selama perpindahan pasokan.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diberikan beberapa saran sebagai berikut:

- a. Meskipun profil tegangan, pembebanan penghantar, dan susut jaringan pada seluruh konfigurasi sistem telah memenuhi batas operasi yang diizinkan, pemantauan dan evaluasi secara berkala tetap perlu dilakukan untuk memastikan kinerja sistem tetap optimal seiring pertumbuhan beban dan perubahan pola operasi jaringan.
- b. Untuk mengurangi dampak penurunan tegangan sesaat (*voltage sag*) yang terjadi akibat gangguan, khususnya pada gangguan tiga fasa, perlu dilakukan kajian lebih lanjut terhadap koordinasi sistem proteksi dan waktu pemutusan gangguan (*fault clearing time*) sehingga durasi gangguan dapat diminimalkan.
- c. Berdasarkan hasil analisa *transient stability*, proses pengalihan pasokan pada konfigurasi backup 1 dan backup 2 masih menyebabkan kehilangan tegangan sesaat yang ditunjukkan oleh penurunan tegangan hingga mencapai 0 p.u. Oleh karena itu, dapat dipertimbangkan penerapan teknologi transfer sumber berkecepatan tinggi, seperti *Static Transfer Switch* (STS) atau teknologi sejenis, untuk mempercepat proses perpindahan sumber dan meminimalkan interupsi tegangan selama proses *switching*. Dengan berkurangnya waktu perpindahan sumber, keberlanjutan pasokan listrik dapat ditingkatkan sehingga penerapan konsep *Zero Down Time* (ZDT) dapat mendekati kondisi ideal tanpa gangguan pada sisi pelanggan.
- d. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan analisis koordinasi proteksi, keandalan sistem, serta evaluasi kualitas daya secara lebih komprehensif agar diperoleh gambaran menyeluruh mengenai kinerja sistem Zero Down Time pada berbagai kondisi operasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Gönen, *Electric Power Distribution Engineering*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- [2] B. M. Weedy, B. J. Cory, N. Jenkins, J. B. Ekanayake, and G. Strbac, *Electric Power Systems*, 5th ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2012.
- [3] C. L. Wadhwa, *Electrical Power Systems*, New Delhi: New Age International, 2006.
- [4] A. A. Chowdhury and D. O. Koval, *Power Distribution System Reliability*, Hoboken: Wiley, 2009.
- [5] H. Saadat, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1999.
- [6] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [7] R. C. Dugan et al., *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 2012.
- [8] SEMI F47-0706, *Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity*.
- [9] D. Committee of the IEEE Power and E. Society, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality IEEE Power & Energy Society," 2009.
- [10] N. Harziargyriou dkk, "Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended". *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume: 36, pp. 3271 – 3281, 2021.
- [11] PERMEN ESDM No.37 Tahun 2008, *Aturan Sistem Tenaga Listrik Sumatera*.
- [12] Agung Warsito dkk, *Simulasi Tegangan Dip Pada Jaringan tegangan Menengah Menggunakan Model EMTP*, 2009.
- [13] KEPMEN ESDM Republik Indonesia Nomor: 185.K tahun 2024, *Besaran Tingkat Mutu Pelayanan PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2024 Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia*, 2024.

- [14] S. Rudi Salman, Mustamam, “Simulasi dan Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Perangkat Lunak Electrical Transient Analyser Program (ETAP) Versi 4.0.”
- [15] J. J. Grainger, “William d. Stevenson, JR.,“,”Power Syst. Anal. McGraw-Hill, Inc, 1994
- [16] Perusahaan Umum Listrik Negara, “SPLN 72 : 1987 Spesifikasi Desain untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR), Lampiran Surat Keputusan Direksi PLN No.060/DIR/87 tanggal 4 Juli 1987,” Dep. Pertamb. dan Energi, p. 15, 1987
- [17] Gusmedi, H., Hakim, L., & Ramadan, R. (2024). EVALUASI KEANDALAN JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV PENYULANG STROBERI 2 PT. PLN (PERSERO) ULP KOTA METRO DENGAN METODE FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA). *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 12(1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i1.3617>
- [18] M. A. Christine, L. S. Patras, and S. Silimang, "Reconfiguration of the Distribution Network to Improve Electrical Energy Efficiency in the Distribution System," 2025.
- [19] R. Fatima, H. Z. Butt, and X. Li, "Optimal Dynamic Reconfiguration of Distribution Networks," 2023.
- [20] E. O. Santos and J. S. B. Martins, "Distribution Power Network Reconfiguration in the Smart Grid," 2018.
- [21] O. Zebua and I. M. Ginarsa, "Rekonfigurasi Jaringan Distribusi untuk Meminimisasi Rugi-Rugi pada Penyulang Kabut di Gardu Induk Teluk Betung Menggunakan Metode Binary Particle Swarm Optimization (BPSO)," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 5, no. 1, pp. 110–117, Mar. 2016, <https://doi: 10.20449/jnte.v5i1.198>.
- [22] Energize, "What Is a UPS System and Why Does It Matter for Your Business," Energize, 2025. [Online]. Available: What Is a UPS System and Why Does It Matter for Your Business. Diakses 6 juni 2026.